

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТИХОНОВ МИКОЛА ВІКТОРОВИЧ

УДК 654.1-192

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ З
УРАХУВАННЯМ ВІДМОВ ТА ЗБОЇВ ПРОГРАМНОГО
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА КОМБІНОВАНОГО РЕЗЕРВУ ЧАСУ

172 Телекомунікації та радіотехніка

17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ М.В. Тихонов

Науковий керівник КОНОНОВА Ірина Віталіївна,
кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2025

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	6
ABSTRACT	9
ВСТУП	13
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ	19
1.1. Аналіз факторів, що впливають на надійність функціонування програмних засобів електронного комунікаційного обладнання	20
1.1.1. Обґрунтування необхідності дослідження надійності програмного забезпечення ЕКО ЕКМ	20
1.1.2. Аналіз надійності програмного забезпечення, яке використовується в ЕКО ЕКМ	24
1.2. Аналіз наукових результатів у дослідженні функціонування електронної комунікаційної мережі.....	34
1.3. Постановка наукового завдання	38
1.4. Обґрунтування загальної методології і структурно-логічної схеми дисертаційного дослідження.....	45
Висновки до розділу 1	53
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ВІДМОВ ТА КОМБІНОВАНИМ РЕЗЕРВОМ ЧАСУ ПРИ ПОВНІЙ ВИХІДНІЙ ІНФОРМАЦІЇ	55
2.1. Особливості функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з часовим резервуванням та показники їх надійності	56

2.1.1. Сутність часового резервування і способи використання та виконання резервів часу.	56
2.1.2. Показники надійності функціонування об'єктів з часовим резервуванням	60
2.2. Постановка задачі дослідження та обґрунтування методу її розв'язання.....	64
2.2.1. Модель функціонування системи з комбінованим резервом часу та постановка задачі	64
2.2.2. Обґрунтування методу розв'язання задачі та алгоритму його практичної реалізації	70
2.3. Моделі оцінювання надійності об'єктів з різними типами відмов і комбінованим резервом часу	81
2.3.1. Розрахункові формули для показників надійності систем з часовим резервуванням	81
2.3.2. Оцінювання відносної похибки наближених формул	86
2.4. Моделі оцінювання надійності об'єктів з комбінованим резервом часу при розбитті виконуваного завдання на етапи.....	90
2.4.1. Повне або часткове збереження попереднього напрацювання.....	91
2.4.2. Повне або часткове знецінювання попереднього напрацювання	95
Висновки до розділу 2	100
РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ДВОСТОРОННІХ ОЦІНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ З КОМБІНОВАНИМ РЕЗЕРВОМ ЧАСУ ПРИ ОБМЕЖЕНІЙ ВИХІДНІЙ ІНФОРМАЦІЇ.....	102
3.1. Особливості розв'язання задач оцінки надійності в умовах апріорної невизначеності.....	103
3.1.1. Апріорна невизначеність та її види	103

3.1.2. Можливі підходи щодо оцінювання надійності об'єктів при обмеженій вихідній інформації	106
3.2. Постановка задачі і вибір аналітичного методу її вирішення в умовах апіорної невизначеності	108
3.2.1. Постановка задачі	108
3.2.2. Аналітичний метод визначення двосторонніх оцінок показників надійності об'єктів з часовим резервуванням.....	110
3.3. Удосконалена методика побудови двосторонніх оцінок показників надійності систем з комбінованим резервом часу.....	113
3.3.1. Сутність методики	113
3.3.1. Побудова двосторонніх оцінок (нижніх і верхніх границь) для базового функціоналу	114
3.4. Двосторонні оцінки (нижні та верхні границі) показників надійності систем з комбінованим резервом часу при різних типах відмов об'єкта ..	119
3.4.1. Граничні значення показників надійності при незнецінюючих або повністю знецінюючих відмовах об'єкта.....	121
Висновки до розділу 3	127
РОЗДІЛ 4 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З КОМБІНОВАНИМ ЧАСОВИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ ТА ОБГРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЇХ ПОЛІПШЕННЯ	129
4.1. Загальна методика комплексного оцінювання показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим часовим резервуванням	130
4.2. Результати комплексного оцінювання показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання при відмовах і збоїв технічних та програмних засобів	136

4.2.1. Оцінювання надійності об'єктів з різними типами відмов	136
4.2.2. Урахування розбиття виконуваних завдань на етапи	145
4.3. Висновки за результатами комплексного оцінювання показників надійності об'єктів.....	150
4.3.1. Ефективність комбінованого часового резервування і доцільність його використання для поліпшення показників надійності об'єктів.....	150
4.3.2. Деякі особливості та властивості моделей оцінювання надійності функціонування об'єктів з комбінованим часовим резервуванням.....	152
4.4. Рекомендації щодо практичного використання результатів дисертаційного дослідження для поліпшення показників надійності об'єктів	155
Висновки до розділу 4	158
ВИСНОВКИ.....	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	164
Додаток А.....	183

АНОТАЦІЯ

Тихонов М.В. Методи побудови моделей оцінки надійності телекомунікаційного обладнання мереж зв'язку з урахуванням відмов та збоїв програмного забезпечення та комбінованого резерву часу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю: 172 Телекомунікації та радіотехніка. – Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, 2025.

Актуальність тематики дисертаційної роботи визначається наявністю на даний час протиріч між високими вимогами до показників надійності електронного комунікаційного обладнання (ЕКО) і реальною експлуатаційною надійністю цього обладнання (на практиці) та між обмеженими можливостями відомих наукових результатів і необхідністю сумісного урахування основних факторів при оцінці надійності (у теорії).

У дисертації вирішено наукове завдання, яке полягає в удосконаленні науково-методичного апарату комплексної оцінки надійності ЕКО на основі декомпозиції загальної моделі функціонування на дві взаємопов'язані моделі: регенеруючого і марківського випадкових процесів – з наступним синтезом часткових результатів, що забезпечує сумісне урахування відмов і збоїв обладнання та їх наслідків, характеристик часової надлишковості і обмеженості вихідної інформації.

Основними науковими результатами дисертаційної роботи, є:

1. Удосконалено метод і моделі комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО при повній вихідній інформації.

Наукова новизна та відмінність від інших відомих методів, полягає в декомпозиції загальної моделі функціонування об'єкта ЕКО з комбінованим

резервом часу на дві взаємопов'язані часткові моделі функціонування, які реалізуються окремо. Перша з них – математична модель регенеруючого випадкового процесу забезпечує перевірку дотримання часового обмеження, яке задається поповнюваною складовою t_d . Друга – математична модель марківського процесу спеціального виду – перевіряє виконання часового обмеження, що накладається непоповнюваною складовою t_p з урахуванням вибраного варіанта взаємодії складових t_d і t_p комбінованого резерву часу. Реалізація удосконаленого методу спрощує процес формалізації та отримання математичних моделей комплексного оцінювання надійності об'єктів ЕКО з урахуванням сукупного впливу множини факторів, що визначають функціонування мережі зв'язку.

2. Удосконалено методику і моделі оцінювання надійності об'єктів ЕКО електронної комунікаційної мережі (ЕКМ) при апіорній невизначеності (обмеженій вихідній інформації).

Наукова новизна та відмінність від відомих підходів, полягає у виборі нового базового функціоналу, який відображає вплив відмов і збоїв на надійність функціонування об'єктів ЕКО. Побудова верхньої та нижньої границь даного функціоналу забезпечує можливість отримання нових математичних моделей надійності та двосторонніх оцінок показників надійності об'єктів ЕКО, які дозволяють проводити комплексне оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО за умов обмеженій вихідній інформації, а також сумісного врахуванні як поповнюваної, так і непоповнюваної складових комбінованого резерву часу, різних типів відмов і збоїв.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

розроблений у дисертації науково-методичний апарат комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО дає можливість розв'язувати важливі практичні задачі, які виникають в процесі удосконалення існуючих та розробки перспективних об'єктів ЕКО ЕКМ, а саме:

оцінювати ефективність використання комбінованого часового резервування для зменшення впливу наслідків відмов і збоїв технічних та програмних засобів на функціонування ЕКО ЕКМ;

здійснювати якісний і кількісний аналіз надійності функціонування ЕКО з комплексним урахуванням найбільш суттєвих факторів, що впливають на надійність обладнання, на етапах модернізації існуючих та розробки перспективних ЕКМ;

виявляти важливі загальні та часткові властивості комбінованого часового резервування, оцінювати ефективність методу забезпечення надійності функціонування ЕКО;

зменшувати вплив негативних наслідків відмов та збоїв технічних та програмних засобів ЕКО на процес функціонування ЕКМ;

розробляти рекомендації щодо забезпечення безперебійного функціонування системи з урахуванням збоїв та відмов у процесі модернізації існуючих та створення перспективних ЕКМ.

Ключові слова: електронне комунікаційне обладнання, надійність, електронні комунікаційні мережі, показники надійності, відмови, збій, резервування, знецінюючі та незнецінюючі відмови.

ABSTRACT

Tykhonov M.V. Methods of model building for assessing the reliability of telecommunication equipment of communication networks, taking into account software failures and failures and combined time reserve. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty: 172 Telecommunications and Radio Engineering. – Educational and Scientific Institute of Telecommunication Systems of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2025.

The relevance of the topic of the dissertation is determined by the current contradictions between the high requirements for the reliability of electronic communication equipment and the actual operational reliability of this equipment (in practice) and between the limited capabilities of known scientific results and the need to jointly take into account the main factors in assessing reliability (in theory).

The thesis solves the scientific problem, which is to improve the scientific and methodological apparatus for a comprehensive assessment of the reliability of ECE based on the decomposition of the general model of functioning into two interrelated models: regenerative and Markov random processes – with the subsequent synthesis of partial results, which ensures the joint consideration of equipment failures and failures and their consequences, characteristics of temporal redundancy and limited initial information.

The main scientific results of the dissertation are:

1. The scientific novelty and difference from other known methods lies in the decomposition of the general model of the functioning of an ECO object with a combined time reserve into two interrelated partial models of functioning, which are implemented separately. The first of these, a mathematical model of a regenerating random process, ensures compliance with the time constraint set by the replenishable

component t_a . The second is a mathematical model of a special type of Markov process, which verifies compliance with the time constraint imposed by the non-replenishable component t_r , taking into account the selected option for the interaction of the components t_a and t_r the combined time reserve. The implementation of the improved method simplifies the process of formalization and obtaining mathematical models for comprehensive assessment of the reliability of ECE objects, taking into account the cumulative impact of a set of factors that determine the functioning of the communication network.

2. The methodology and models for assessing the reliability of ECE objects in the SPCN under a priori uncertainty (limited initial information) have been improved.

The scientific novelty and difference from known approaches lies in the choice of a new basic functionality that reflects the impact of failures and malfunctions on the reliability of ECE objects. The construction of the upper and lower limits of this functionality makes it possible to obtain new mathematical models of reliability and bilateral assessments of the reliability indicators of ECE objects, which allow for a comprehensive assessment of the reliability of ECE objects under conditions of limited initial information, as well as the joint consideration of both replenishable and non-replenishable components of the combined time reserve and various types of failures and malfunctions.

The practical significance of the results obtained is as follows:

The scientific and methodological apparatus developed in the thesis for a comprehensive assessment of the reliability of ECE facilities in the face of failures and malfunctions of hardware and software in real operating conditions makes it possible to solve important practical problems that arise when improving existing and developing future ECE facilities of the SPCN:

to assess the effectiveness of the combined time redundancy to reduce the impact of the consequences of failures and malfunctions of hardware and software on the functioning of the ECE communication networks;

to conduct qualitative and quantitative analysis of the reliability of the ECE functioning with a comprehensive consideration of the most significant factors affecting the reliability of equipment at the stages of modernization of existing and development of future communication networks;

identify important general and specific properties of combined time redundancy, evaluate the effectiveness of the method of ensuring the reliability of the ECE functioning;

to reduce the impact of negative consequences of failures and malfunctions of hardware and software of the ECE on the process of functioning of communication networks;

to develop recommendations for ensuring the normal functioning of the system, taking into account failures and failures in the process of modernization of existing and creation of future SPCN.

Keywords: electronic communication equipment, reliability, special-purpose communication networks, reliability indicators, failures, refusal, redundancy, impairing and nonimpaired failures

Список публікацій здобувача за темою дисертації.

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Тихонов М.В., Кононова І.В. Методика комплексного оцінювання показників надійності електронного комунікаційного обладнання з комбінованим часовим резервуванням. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 3 (1), № 3. С. 13 – 18. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-1>

2. Тихонов М.В., Кононова І.В. Удосконалена методика побудови двосторонніх оцінок показників надійності функціонування комунікаційного обладнання мереж зв'язку. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 3. С. 86 – 90. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/13>.

3. Тихонов М.В. Удосконалений метод побудови моделей комплексної оцінки надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 349 № 2. С. 422 – 434. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-61>.

4. Кононова І.В., Тихонов М.В. Комплексна оцінка показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74) № 1. С. 45 – 50. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/07>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Тихонов М.В. Удосконалений метод побудови моделей оцінки надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу. *Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем: матеріали XVII Міжнародної наук.-тех. Конф. «Перспективи телекомунікацій»*, Київ, 18–21 квітня 2023 року. С. 65–67. <https://conferenc.its.kpi.ua/2023/paper/view/27434/18939>

6. Тихонов М.В. Кононова І.В. Особливості розв'язання задач оцінки показників надійності в умовах апріорної невизначеності. *Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-комунікаційних систем: матеріали VII наук.-практ. конф. курсантів (студентів), аспірантів, докторантів та молодих учених*, Київ, 12 червня 2024 року. С. 232.

7. Тихонов М.В. Кононова І.В. Вихідні обмеження і передумови для побудови моделей надійності електронного комунікаційного обладнання. *Кібербезпека державних інституцій та подолання кризових станів: матеріали III наук.-практ. конф. 14 листопада 2024 року*, Київ – Прага – Таллінн – Тернопіль. С. 282 –283.

ВСТУП

Актуальність теми. Досвід останніх локальних війн, збройних конфліктів, а також бойових дій проти РФ доводить важливість постійного вдосконалення системи державного управління [1–3].

Ефективність цієї системи значною мірою залежить від надійності системи зв'язку, технічною основою якої є ЕКМ [4].

Електронні комунікаційні мережі повинні забезпечувати стабільний, захищений і оперативний обмін інформацією між органами державної влади в різних умовах – у мирний час, під час надзвичайного стану та в особливий період. Такі мережі є ключовими для забезпечення ефективного управління державними структурами, підтримки національної безпеки та координації дій у кризових ситуаціях. Вони повинні бути стійкими до зовнішніх впливів та внутрішніх відмов обладнання, захищеними від кібератак і здатними до швидкої адаптації в умовах кризи [5].

На даний час ЕКМ мають тенденцію до всебічного розвитку та модернізації шляхом переоснащення новітніми високотехнологічними засобами зв'язку і переходу на сучасні цифрові технології [6 – 8]. Процес удосконалення існуючих ЕКМ вимагає наукового обґрунтування різноманітних задач, які вирішуються на усіх етапах реформування системи державного управління. Однією з таких задач є забезпечення стійкого управління органами державної влади в умовах впливу різноманітних чинників.

Важливою складовою, що визначає необхідний рівень стійкості ЕКМ, є надійність телекомунікаційного обладнання (в подальшому, електронне комунікаційне обладнання (ЕКО)) [9, 10]. Незважаючи на значні досягнення в галузі розробки надійного обладнання, завдання забезпечення безперебійної роботи систем зв'язку залишається актуальним [11]. Наявний науково-

методичний апарат не повною мірою дозволяє проводити оцінювання показників надійності ЕКО та забезпечити прийняття обґрунтованих рішень під час виконання комплексу завдань з підвищення надійності існуючого та перспективного обладнання. Широке використання обчислювальних елементів та спеціалізованого програмного забезпечення в сучасному ЕКО призводить до виникнення нових джерел відмов – збоїв у роботі протоколів маршрутизації та програмного забезпечення обладнання. Такі збої суттєво впливають на загальні показники надійності ЕКО [12 – 15]. Таким чином, на даний час відбувається загострення протиріччя між високими вимогами до показників надійності ЕКО і реальною експлуатаційною надійністю цього обладнання.

Тому актуальним є **наукове завдання**, яке спрямовано на вирішення вказаних вище протиріч і полягає в **удосконаленні науково-методичного апарату комплексного оцінювання надійності ЕКО на основі декомпозиції загальної моделі функціонування на дві взаємопов'язані моделі: регенеруючого і марківського випадкових процесів – з наступним синтезом часткових результатів, що забезпечує сумісне урахування відмов і збоїв обладнання та їх наслідків, характеристик часової надлишковості і обмеженості вихідної інформації.**

Розвитку теоретичних основ у сфері дослідження ЕКМ присвячені роботи вітчизняних та зарубіжних вчених Бобала Ю.Я., Василюшина В.І., Жердєва М.К., Креденцера Б.П., Могилевича Д.І., Вишнівського В.В., Гніденка М.П., Ленкова С.В., Гнатюка С.Є., Саковича Л.М., Ігнатенка О.Г., Яковина В.С., Сеніва М.М., Барковського В.В., Павлова О., Базаргура Б., Лі Л., Ахмед Н., Хасан О., Літтлевуд Б. та інших [16 – 41].

Однак отримані в цих роботах теоретичні результати не враховують фактори, які впливають на функціонування ЕКМ. Отже, на даний час відбувається загострення протиріччя між обмеженими можливостями відомих наукових результатів і необхідністю комплексного оцінювання надійності ЕКО ЕКМ з урахуванням надлишковості в моделях надійності.

Тому вирішення сформульованого науково-технічного завдання має важливу технічну спрямованість при науковому обґрунтуванні рішень в процесі виконання комплексу задач, спрямованих на забезпечення необхідного рівня надійності ЕКО та підвищення можливостей існуючих та перспективних ЕКМ.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є обґрунтування рекомендацій щодо підвищення показників надійності ЕКО за рахунок комплексного урахуванні відмов, збоїв та застосування комбінованого резерву часу.

Для досягнення мети в дисертаційній роботі сформульовані і вирішені **часткові взаємопов'язані задачі досліджень:**

1. Обґрунтування загального підходу до розв'язання сформульованої наукової задачі.
2. Розробка удосконаленого методу і моделей комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО при повній вихідній інформації.
3. Розробка удосконаленого методу і моделей оцінювання надійності об'єктів ЕКО при апіорній невизначеності (обмеженій вихідній інформації).
4. Розробка загальної методики комплексного оцінювання надійності електронного комунікаційного обладнання при використанні комбінованого часового резервування.

Об'єктом досліджень дисертаційної роботи є процес функціонування ЕКО ЕКМ в реальних умовах експлуатації, **предметом дослідження** – моделі, методи та методики оцінювання показників надійності ЕКО з комбінованим часовим резервуванням при комплексному урахуванні сукупності факторів, які впливають на процес функціонування обладнання.

Методи дослідження. Для вирішення наукового завдання застосовані такі методи: ймовірностей, надійності, марківських та напівмарківських процесів – в процесі розробки удосконаленого методу і моделей комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання при повній вихідній інформації та в умовах апіорної статистичної невизначеності.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено метод і моделі комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО при повній вихідній інформації.

Наукова новизна та відмінність від інших відомих методів, полягає в декомпозиції загальної моделі функціонування об'єкта ЕКО з комбінованим резервом часу на дві взаємопов'язані часткові моделі функціонування, які реалізуються окремо. Перша з них – математична модель регенеруючого випадкового процесу забезпечує перевірку дотримання часового обмеження, яке задається поповнюваною складовою t_d . Друга – математична модель марківського процесу спеціального виду – перевіряє виконання часового обмеження, що накладається непоповнюваною складовою t_p з урахуванням вибраного варіанта взаємодії складових t_d і t_p комбінованого резерву часу. Реалізація удосконаленого методу спрощує процес формалізації та отримання математичних моделей комплексного оцінювання надійності об'єктів ЕКО з урахуванням сукупного впливу множини факторів, що визначають функціонування мережі зв'язку.

2. Удосконалено методику і моделі оцінювання надійності об'єктів ЕКО ЕКМ при апіорній невизначеності (обмеженій вихідній інформації).

Наукова новизна та відмінність від відомих підходів, полягає у виборі нового базового функціоналу, який відображає вплив відмов і збоїв на надійність функціонування об'єктів ЕКО. Побудова верхньої та нижньої границь даного функціоналу забезпечує можливість отримання нових математичних моделей надійності та двосторонніх оцінок показників надійності об'єктів ЕКО, які дозволяють проводити комплексне оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО за умов обмеженій вихідній інформації, а також сумісного врахуванні як поповнюваної, так і непоповнюваної складових комбінованого резерву часу, різних типів відмов і збоїв.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

розроблений у дисертації науково-методичний апарат комплексного

оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО дає можливість розв'язувати важливі практичні задачі, які виникають в процесі удосконалення існуючих та розробки перспективних об'єктів ЕКО ЕКМ, а саме:

оцінювати ефективність використання комбінованого часового резервування для зменшення впливу наслідків відмов і збоїв технічних та програмних засобів на функціонування ЕКО ЕКМ;

здійснювати якісний і кількісний аналіз надійності функціонування ЕКО з комплексним урахуванням найбільш суттєвих факторів, що впливають на надійність обладнання, на етапах модернізації існуючих та розробки перспективних ЕКМ;

виявляти важливі загальні та часткові властивості комбінованого часового резервування, оцінювати ефективність методу забезпечення надійності функціонування ЕКО;

зменшувати вплив негативних наслідків відмов та збоїв технічних та програмних засобів ЕКО на процес функціонування ЕКМ;

розробляти рекомендації щодо забезпечення безперебійного функціонування системи з урахуванням збоїв та відмов у процесі модернізації існуючих та створення перспективних ЕКМ.

Результати досліджень реалізовані у в/ч А4043 (акт реалізації від 19.03.2025 р. № 1), у ТОВ «Софнет груп» (акт реалізації від 18.03.2025 р. № 1).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані особисто. Зі спільних публікацій дисертаційна робота містить лише результати отримані здобувачем особисто: в [42] проведено оцінку результатів теоретичного дослідження впливу різних факторів на показники надійності функціонування об'єктів ЕКО в умовах обмеженої надійності технічних та програмних засобів; в [43] розроблено удосконалення науково-методичного апарату комплексного оцінювання показників надійності електронного комунікаційного обладнання; в [44] розроблено удосконалену методику побудови двосторонніх оцінок показників надійності функціонування комунікаційного обладнання з комбінованим

резервом часу; в [45] розроблено методики комплексного оцінювання показників надійності ЕКО, в яких застосовується комбіноване часове резервування.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на щорічних науково-технічних та науково-практичних конференціях (семінарах): на XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи телекомунікацій» «Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем» (НН ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2023); на науково-практичній конференції курсантів (студентів), аспірантів, докторантів та молодих учених «Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-комунікаційних систем» (ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2024); на III Міжнародній науково-практичній конференції «Кібербезпека державних інституцій та подолання кризових станів» (ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 2024).

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковані в 4-х наукових статтях у наукових спеціалізованих виданнях України у встановлені терміни, 3-х тезах доповідей.

Структура і об'єм. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Матеріал роботи викладено на 184 сторінках, з яких 28 сторінок займають ілюстрації, таблиці, список використаних джерел зі 176 найменувань та 1 додатку.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Метою даного розділу є аналіз впливу ЕКМ у різних сферах суспільства, а також доведення необхідності врахування збоїв та відмов програмного забезпечення ЕКО при оцінюванні показників надійності обладнання. Результати цього аналізу дають можливість обґрунтувати актуальність тематики даної дисертаційної роботи, визначити основні поняття об'єкта і предмета дослідження, а також сформулювати мету і наукове завдання даного дослідження.

В результаті аналізу наявного науково-методичного апарату і його можливостей для вирішення сформульованого наукового завдання необхідно обґрунтувати загальний підхід до рішення задачі та досягнення мети дисертаційного дослідження, яке повинно визначити основні напрямки досліджень та їх черговість.

Розділ завершується розробкою структурно-логічної схеми виконання дисертаційної роботи, що містить основні часткові завдання дослідження, їх зміст та взаємозв'язок.

1.1. Аналіз факторів, що впливають на надійність функціонування програмних засобів електронного комунікаційного обладнання

Сучасний світ переживає безпрецедентну цифрову трансформацію, де електронні комунікації [46] стали невід'ємною частиною повсякденного життя. Діяльність глобальних корпорацій і невеликих підприємств, урядів та окремих громадян залежить від надійних і швидких ЕКМ. Різноманітні мережі, наприклад інтернет, не просто з'єднує людей, він формує нові економічні моделі, змінює соціальні структури і впливає на політичні процеси.

1.1.1. Обґрунтування необхідності дослідження надійності програмного забезпечення ЕКО ЕКМ. Війна росії проти України наочно продемонструвала, наскільки критично важливими є електронні комунікаційні мережі для функціонування сучасного суспільства. Стабільне функціонування мережі інтернет та мобільного зв'язку стало одним з найважливіших факторів, що впливають на здатність України протистояти агресору, доводячи, що ЕКМ є не просто зручністю, а життєво необхідною інфраструктурою, від якої залежить економіка, суспільство та держава. Незважаючи на пошкодження, під час війни, близько 25% фіксованих мереж українські телекомунікаційні компанії швидко відновлювали інфраструктуру. Завдяки їхнім зусиллям, 98% населення мали доступ до мобільного зв'язку, а 89% – до фіксованого інтернету [47].

Розглянемо детальніше вплив ЕКМ у різних сферах.

З початком війни багато українських компаній перейшли на віддалений режим роботи, використовуючи ЕКМ для забезпечення безперервності бізнес-процесів. Це дозволило зберегти робочі місця та підтримати економічну активність навіть під час активних бойових дій.

Стабільна робота електронних платіжних систем на основі ЕКМ забезпечила безперебійність фінансових операцій. Незважаючи на військові

ризика, банківська система України продовжувала функціонувати, дозволяючи громадянам та підприємствам здійснювати необхідні платежі та перекази.

Електронні комунікаційні мережі стали ключовим інструментом у боротьбі з російською пропагандою. Завдяки оперативному поширенню достовірної інформації через офіційні канали та соціальні мережі, українське суспільство отримувало правдиві відомості про ситуацію на фронті та в тилу, що сприяло збереженню морального духу та єдності нації.

Соціальні мережі та месенджери, що також застосовують ЕКМ, стали основними каналами для оперативного інформування громадян, координації волонтерської допомоги та мобілізації ресурсів. Це дозволило швидко реагувати на потреби суспільства та забезпечити ефективну взаємодію між різними групами населення [48].

Державні органи активно використовують ЕКМ для донесення офіційної позиції, спростування фейків та координації з міжнародними партнерами. Це сприяло формуванню позитивного іміджу України на міжнародній арені та залученню підтримки від інших країн.

Україна активно застосовує цифрові платформи для комунікації з міжнародною спільнотою, привертаючи увагу до актуальних подій та викликів, пов'язаних з війною. Це дозволяє ефективно доносити інформацію про реальний стан справ та мобілізувати міжнародну підтримку.

Отже, досвід України показав, що інвестиції в розвиток надійних і стійких ЕКМ є стратегічно важливим кроком для будь-якої країни та гарантією національної безпеки та економічного розвитку.

Зростаюча залежність від цифрових технологій призводить до підвищення вимог до надійності електронного комунікаційного обладнання як невід'ємної складової ЕКМ.

Особливістю та важливим елементом сучасних та перспективних ЕКМ, а також ЕКО є програмне забезпечення різного призначення [49]. Водночас, як свідчить вітчизняний і світовий досвід, чим складніше і об'ємніше програмне

забезпечення (ПЗ), тим більше в ньому дефектів (помилоч). Підтвердженням даної тези є результати досліджень складних програмних продуктів, виконаних компанією *Coverity* [50]. Аналіз показав, що програмне забезпечення, навіть розроблене професійними колективами, містить сотні помилок, виявлення та усунення яких вимагає значних інтелектуальних, часових та фінансових ресурсів.

Ігнорування помилок програмного забезпечення ЕКО при аналізі надійності мережі зв'язку може призвести до суттєвих втрат часових та людських ресурсів [51]. Наведемо приклади.

1. Під час першої війни в Перській затоці (1990 – 1991 років) американській системі протиракетної оборони *Patriot*, встановленої в Саудівській Аравії, не вдалося перехопити атаку іракських ракет Склад (*Scud*). Ракетами були знищені армійські казарми і солдати, які в них перебували під час атаки.

Причина: помилка програмного забезпечення через некоректне округлення (при переводі десятих часток секунди в секунди) було неправильно розраховано час, внаслідок чого система *Patriot* просто проігнорувала ракети *Scud*, що наближалися. Похибка склала всього близько 0,34 секунди, але за цей час ракета долає відстань в півкілометра.

2. Через незначні механічні пошкодження відмовив всього один телефонний комутатор в одному з 114 центрів зв'язку найбільшої телефонної компанії США – *AT&T*, а внаслідок перестав функціонувати весь центр зв'язку. Коли через деякий час центр відновив роботу, він автоматично відправив повідомлення всім іншим комутаційним центрам, які, зі свого боку, також припинили роботу і зупинили всю мережу *AT&T* на 9 годин [52].

Причина: один помилковий рядок у програмному коді в комплекті оновлення програмного забезпечення, призначеного для прискорення виклику, породила незвичайний хвильовий ефект, який змусив «замовчати» цілу телефонну мережу.

3. Збій у системі глобального позиціонування *GPS* призвів до проблем в роботі навігаційного обладнання та систем зв'язку у всьому світі. Інцидент стався наприкінці січня 2016 року, відразу після того, як Військово-повітряні Сили США вивели зі складу групування супутник *SVN 23* для його подальшої заміни на *GPS Block IIF*. Збій, який призвів до проблем з устаткуванням, пройшов глобально по всьому світу в різний час зі зміщенням, що відповідав тому, як супутники *GPS* рухалися вздовж своїх орбіт. Тривалість цього інциденту склала близько 12 годин. Обладнання операторів зв'язку стало видавати попередження обслуговуючому персоналу, причому кількість цих попереджень збільшувалася за наростаючою. У ряді випадків уникнути серйозних наслідків допомогли резервні системи синхронізації часу [53].

Причина: в ході процедури в програмному забезпеченні, яке застосовується в наземній інфраструктурі *GPS*, виник збій, внаслідок якого на 13 мікросекунд сталося відключення переданого *GPS*-супутниками сигналу Всесвітнього координованого часу.

4. Наслідки збою в *GPS* можна порівняти з наслідками, що виникли внаслідок відмови російської навігаційної системи ГЛОНАСС, який стався в квітні 2014 року і тривав близько 10 годин [53].

Причина: помилкове завантаження коригувальних даних супутника ГЛОНАСС.

5. У 2020 році винищувачі-бомбардувальники п'ятого покоління *Lockheed Martin F-35 Lightning II* (є «літаючим комп'ютером» з понад 8 мільйонами рядків комп'ютерного коду) отримали помилкове оновлення програмного забезпечення до версії *Block 4* вартістю 14 мільярдів доларів. Програмне забезпечення для *F-35 Lightning II* розробляється та оновлюється блоками. *Block 1A* і *Block 1B* уможливили розпочати первинну льотну підготовку. *Block 2B* дозволив літакам Корпусу морської піхоти отримати бойові можливості, а *Block 3i* зробив це можливим для ВПС США.

Причина: помилки у програмному забезпеченні версій *Block 2B* та *Block 3i*. Згідно зі статистикою, *Block 2B* дає збій один раз на 8 годин, а *Block 3i* –

один раз на 15 годин [54].

У 2016 році на авіабазі «Хілл» (*Hill*) у штаті Юта по тривозі зміг піднятися в небо лише один *Lockheed Martin F-35 Lightning II* із шести.

Причина: на п'яти F-35, що залишилися стався збій ПЗ і частина бортового обладнання просто не запрацювала.

6. Американський виробник літаків *Boeing* запустив одну зі своїх новітніх моделей *737 Max* і її комерційний рейс зазнав аварії біля берегів Індонезії в жовтні 2018 року. Внаслідок цієї катастрофи загинули всі 189 людей, які перебували на борту. Через кілька місяців після цього, у березні 2019 року, розбився літак тієї ж моделі, який належав *Ethiopian Airlines*. Жертвами аварії стали 157 людей.

Причина: помилка в програмному забезпеченні *MCAS*, через яку у певній ситуації, нос машини хилило донизу, незважаючи на дії пілота, які не могли утримати його навіть при активації стабілізаторів [55].

7. Супутникова мережа *Eutelsat OneWeb* зіткнулася з масштабним збоєм. Проблеми розпочалися 31 грудня 2024 року й тривали до 2 січня 2025 року, спричинивши перебої в роботі системи супутникового інтернету.

Причина: помилка в програмному забезпеченні, яка виникла через високосний 2024 рік, що призвела до неправильної синхронізації GPS з UTC [56].

Ці та інші приклади демонструють, наскільки навіть малі відхилення в складній системі, викликані збоями, здатні призвести до ненавмисних глобальних наслідків, а також обґрунтовують гостру необхідність враховувати відмови та збої програмного забезпечення при оцінці надійності ЕКО ЕКМ.

1.1.2. Аналіз надійності програмного забезпечення, яке використовується в ЕКО ЕКМ. Результати проведеного аналізу процесів функціонування ЕКО існуючих і перспективних ЕКМ дозволяє представити ЕКО як складний апаратно-програмний комплекс (АПК), що складається з двох взаємопов'язаних підсистем:

1) апаратного комплексу (АК) – сукупності технічних засобів, до складу якого входять апаратура каналоутворення, пристрої комутації і маршрутизації, сервери, апаратура IP-шифрування, кінцеве та інше обладнання;

2) програмного комплексу (ПК) – сукупності програмних засобів (ПЗ) («м'якого» обладнання АПК – software), в складі якого зазвичай виділяють три частини: математичне забезпечення (сукупність математичних моделей, методів і алгоритмів), інформаційне забезпечення (бази даних з системами управління, файлові структури з каталогами, константи та інші елементи) та програмне забезпечення (системне та функціональне) [57].

Під програмним засобом будемо розуміти об'єкт, який складається з програм, процедур, правил, а також, якщо передбачено, супутніх їм документації і даних, що відносяться до функціонування ЕКО [58].

Аналіз показав, що ПЗ є найбільш розвинутою за структурою та функціональними зв'язками складовою частиною апаратно-програмних комплексів ТКО. Дефекти та помилки ПЗ можуть виявлятися випадковим чином та мати наслідки, аналогічні наслідкам, викликаними відмовами технічних засобів, а саме: втратою окремих функцій чи затримку їх виконання, спотворення інформації або керуючих впливів та ін. У цьому сенсі й говорять про обмежену надійність ПЗ (відмовах і збоях програмних засобів).

Більш того, при складній взаємодії технічних і програмних засобів часто важко ідентифікувати першоджерело порушення нормального функціонування ЕКО. Тому важливо не тільки забезпечити високу надійність ПЗ, але й врахувати її при оцінці надійності функціонування ЕКО загалом.

Таким чином, програмний комплекс є важливою складовою частиною ЕКО, який має обмежену надійність та суттєво впливає на ефективність функціонування ЕКМ. Цей вплив має тенденцію зростати у міру ускладнення задач, що вирішуються ЕКМ.

Проведений аналіз наукової літератури дозволив визначити фактори, що впливають на надійність функціонування ПЗ ЕКО, та поділити їх на внутрішні

і зовнішні. До внутрішніх факторів надійності функціонування ПЗ можна віднести:

1. Системні помилки проєктування в процесі визначення цілей і завдань створення ПЗ, при формулюванні вимог до функцій і характеристик ПЗ. Системні помилки і недоліки визначення вимог до ПЗ характеризуються, насамперед, неповною інформацією про реальні процеси функціонування ЕКО. Крім того, ці процеси часто залежать від самих алгоритмів і тому не можуть бути достатньо визначені та описані заздалегідь без дослідження функціонування ПЗ у взаємодії із зовнішнім середовищем. На початкових етапах розробки не завжди вдається точно і повно сформулювати цільове завдання всієї системи, а також цільові завдання основних функціональних груп програм, і ці завдання уточнюються в процесі проєктування. Відповідно до цього уточнюються і конкретизуються специфікації на функціональні компоненти і виявляються відхилення від уточненого завдання вимог, які можуть кваліфікуватися як системні помилки. У багатьох випадках відсутня повна адекватність умов отримання передбачуваних і реальних характеристик зовнішнього середовища, що може бути причиною складних помилок, які важко виявити. Це посилюється тим, що часто неможливо заздалегідь передбачити все розмаїття можливих зовнішніх умов і реальних варіантів сценаріїв функціонування та застосування версій програмних продуктів. В процесі супроводу системні помилки, зазвичай, переважають (близько 60 – 80% від усіх помилок) [59].

2. Помилки визначення характеристик системи та умов і параметрів зовнішнього середовища, прийнятих в процесі розробки ПЗ за вихідні, можуть бути результатом аналітичних розрахунків, моделювання або дослідження аналогічних систем. У ряді випадків може бути відсутня повна адекватність передбачуваних і реальних характеристик, що є причиною складних системних помилок, які важко виявити. Ситуація з такими помилками додатково ускладнюється тим, що експерименти з перевірки взаємодії ПЗ з реальним зовнішнім середовищем у всій області змін характеристик часто

складні і дорогі, а в окремих випадках, при створенні небезпечних ситуацій, неприпустимі. У цьому разі доводиться використовувати моделювання й імітацію зовнішнього середовища з явним спрощенням її окремих елементів і характеристик, хоча ступінь спрощення не завжди можна оцінити з необхідною точністю. Однак, повної адекватності моделей зовнішнього середовища та реальної системи домогтися важко, а в багатьох випадках і неможливо, що може бути причиною значного числа дефектів [60].

3. Алгоритмічні помилки розробки при безпосередній специфікації функцій ПЗ, при визначенні структури і взаємодії компонентів ПЗ, а також при використанні інформації з баз даних. До цих помилок можна віднести перш за все помилки, обумовлені некоректною постановкою функціональних завдань, коли в специфікаціях не в повному обсязі обумовлені всі умови, необхідні для отримання правильного результату. Помилки даного типу, виникають через неповне урахування всіх умов вирішення завдань, і є найпоширенішими більш частими в цій групі і становлять до 70% всіх алгоритмічних помилок або близько 30% загальної кількості помилок на початкових етапах проєктування. Проведений аналіз показав, що до алгоритмічних помилок також слід віднести помилки зв'язків модулів і функціональних груп ПЗ. Цей вид помилок становить 6 – 8% від загальної кількості. Алгоритмічні помилки виявляються в неповному обліку діапазонів зміни змінних, в неправильній оцінці точності використовуваних і одержуваних величин, в неправильному обліку зв'язків між різними змінними, в неадекватному поданні формалізованих умов рішення задачі в специфікаціях або схемах, які підлягають програмуванню.

4. Помилки програмування в текстах програм і описах даних, а також у вихідній та результуючій документації на компоненти і ПЗ в цілому. В процесі налаштування основна частина помилок в програмах виявляється та усувається, проте завжди є ризик пропустити декілька помилок. Будь-яке налаштування ПЗ може показати наявність помилок, але не може довести їх відсутність. В процесі тестування і налаштування ПЗ практично неможливо виконання абсолютно повних перевірок, які гарантуватимуть відсутність

неперевірених компонентів програми і повне виявлення всіх можливих помилок. Внаслідок цього в ПЗ завжди існує певна кількість невиявлених помилок [61].

5. Недостатня ефективність використовуваних методів і засобів оперативного захисту програм і даних від збоїв і відмов та забезпечення надійності функціонування ПЗ в умовах випадкових негативних впливів.

Зовнішніми факторами, які впливають на надійність функціонування ПЗ ЕКО, є:

1. Кваліфікація оперативного та обслуговуючого персоналу, що визначає їх дії в процесі експлуатації та проведення технічного обслуговування ЕКО. Спотворення вихідної інформації, що поступає від користувачів. У підготовці та введенні вихідних даних в ЕКО задіяна людина. Це призводить до того, що певна частина даних характеризується невисокою достовірністю з ймовірністю помилки близько 10^{-3} на 1 байт. В автоматичних пристроях підготовки та передавання інформації ймовірність помилки може бути значно нижчою і досягати значення 10^{-6} – 10^{-7} . Але і при такій достовірності дані не завжди придатні для обробки без проведення контролю і попередньої селекції, та можуть залишатися істотною причиною відмов або збоїв під час їх обробки. Підвищення достовірності вихідної інформації може проводитись з використанням надлишковості, в процесі підготовки первинних даних і при введенні їх в ЕКО. Ця надлишковість використовується для виявлення спотворень і виключення помилкових даних, а в окремих випадках і для виправлення помилок.

2. Спотворення в каналах передавання інформації мереж зв'язку, що надходить від зовнішніх джерел, а також неприпустимі для конкретного ЕКО характеристики потоків трафіку.

3. Зміна складу і конфігурації ЕКО за межі, які перевірені під час випробування або сертифікації і відображені в експлуатаційній документації.

4. Збої і відмови у ЕКО. Відмови і збої в ЕКО є фактором, що істотно впливають на надійність функціонування ПЗ. За останні роки досягнуто

значних успіхів в підвищенні надійності ЕКО. Особливо це стосується зниження ймовірності повної відмови ЕКО. Існують системи, які характеризуються середнім часом напрацювання на відмову, що обчислюються десятками тисяч годин, однак при використанні в ЕКО однопроцесорних систем середній час напрацювання на відмову, здебільшого, вимірюється сотнями годин. Значно частіше відбуваються збої. Більшість з них виявляється і усувається засобами апаратного контролю та не впливає на виконання програм. Однак деяка частина збоїв ЕКО може призвести до спотворень виконання програм або до спотворення змінних. Причинами таких збоїв є переважно зовнішні впливи на ЕКО. Ще частіше відбуваються збої, які не вдається виявити і зафіксувати при функціонуванні ПЗ в процесі нормальної обробки інформації та управління. Такі збої проявляються у випадкові моменти часу і практично неможливо добитися їх повторюваності. Труднощі їх реєстрації і вивчення, а також незацікавленість фірм, які виробляють ЕКО, у виявленні характеристик збоїв призводять до того, що достовірні дані про них практично відсутні. Проте спотворення змінних і процесу виконання ПЗ через збої ЕКО іноді призводять до зациклення, призупинення виконання програм або спотворення масивів даних [62].

Таким чином, на відміну від апаратного забезпечення (АЗ), відмови ПЗ можуть бути спричинені неправильним алгоритмом, некоректною реалізацією алгоритму («запис елемента програми»), некоректністю програмної документації, що матиме наслідком неправильні дії користувача. При цьому відмови ПЗ можуть залежати від даних, які в поточний момент обробляє програма. Крім того, відмови ПЗ можуть бути спричинені збоями АЗ внаслідок впливу зовнішніх факторів (іонізуючого випромінювання, температури тощо), і, в деяких випадках, можуть бути усунені шляхом перезавантаження ПЗ [63]. Крім того, для обчислювальної техніки характерними є збої, тобто відмови, що самоусуваються [64].

Отже, надійність технічних засобів АК та надійність програмного забезпечення, незважаючи на взаємозв'язок, суттєво відрізняються між собою

[65]. Надійність в технічних системах визначається, переважно двома чинниками: надійністю компонент та помилками в конструкції, допущеними в процесі проєктування чи виготовлення. Відносно невисока надійність компонент, їх глибокий взаємозв'язок і здатність до руйнування, старіння або зниження надійності в процесі експлуатації призвели до того, що цей чинник виявився переважним для надійності більшості комплексів апаратури [66].

Надійність складних програмних комплексів визначається тими самими двома факторами. Проте відношення їх впливу інше. Зберігання програм на зовнішніх носіях за відсутності зовнішнього втручання характеризується дуже високою надійністю. Навіть за час багаторічної експлуатації малоймовірні ситуації спотворення програм в наслідок старіння носіїв. Домінуючим для надійності комплексу програм є другий чинник – помилки проєктування. Прояв помилок проєктування обумовлено перш за все конкретними ситуаціями та поєднанням даних, що підлягають обробці. Тільки за визначених вихідних даних в процесі їх обробки виявляється кожна помилка в проєктуванні програми, внаслідок чого спотворюються вихідні дані або виникає відмова [67].

Таким чином, проведений аналіз показав, що порушення працездатності (відмови і збої) програмних комплексів ЕКО можуть призводити до не менш важких наслідків, чим відмови апаратного комплексу. Тому питанням забезпечення і підтримки надійності програмних засобів необхідно приділяти серйозну увагу. Однак методи оцінювання надійності ПЗ почали розроблятися відносно недавно, в той час як сучасна теорія надійності, яка протягом тривалого часу (понад 60 років) займається переважно питаннями оцінювання і забезпечення надійності техніки, накопичила велику кількість корисних, перевірених на практиці результатів. Тому теорія надійності ПК досі не має методик оцінювання надійності ПЗ, досліджених настільки ретельно, як методики оцінювання надійності АК. При цьому відсутні чіткі, усталені визначення таких базових понять в теорії і практиці надійності, з яких починається будь-яке дослідження надійності, як «відмова», «збій»,

«працездатність» програмного комплексу, а також немає єдності в трактуванні показників надійності ПЗ і характеристик їх властивостей, як це зроблено ДСТУ [68] для технічних систем.

Наведемо визначення основних понять теорії надійності ПК, спираючись на результати аналізу відомих робіт в даній предметній області. Ці поняття будемо в подальшому використовувати в процесі виконання дисертаційного дослідження.

Під надійністю ПК (програмного засобу) будемо розуміти «сукупність властивостей, що характеризує здатність програмного засобу зберігати заданий рівень придатності в заданих умовах протягом заданого інтервалу часу». Указана вище сукупність властивостей містить: стабільність (maturity), стійкість (fault tolerance) та відновлюваність (recoverability). При цьому стабільність і стійкість характеризують безвідмовність ПК, для кількісної оцінки якої можливе використання показників, що характеризують безвідмовність технічних систем: ймовірність безвідмовної роботи, середнє напрацювання до відмови, середнє напрацювання на відмову, інтенсивність відмов [69].

Під відновлюваністю ПК (програмного засобу) розуміють «сукупність властивостей програмного засобу, що характеризує трудомісткість та тривалість дій по відновленню необхідного рівня якості функціонування» [70]. Для кількісної оцінки даної властивості (сукупності властивостей) програмних засобів доцільно використовувати тривалість (час) відновлення функціонування програм в процесі перезапуску або перезавантаження ЕКО [71]. При цьому слід враховувати, що час відновлення функціонування програмних засобів складається не тільки з часу перезавантаження ЕКО але й з часу, необхідного для оновлення даних та повторення всього або частини попереднього напрацювання. Цей час у ряді випадків може значно перевищувати тривалість перезавантаження.

Узагальненням характеристик безвідмовності і відновлюваності є комплексний показник надійності ПК – коефіцієнт готовності, під яким

розуміють ймовірність того, що програмний засіб виявиться в працездатному стані в довільний момент часу t , достатньо віддаленому від початку експлуатації (при $t \rightarrow \infty$). Значення коефіцієнту готовності відповідає частці часу корисної роботи програмних засобів на достатньо великому інтервалі часу, що містить відмови і відновлення.

Зазвичай, в технічних умовах на ЕКО відсутні дані щодо надійності програмного забезпечення. Це пов'язано з тим, що неможливо передбачити та заздалегідь перевірити всі поєднання вихідних даних, які виникають при експлуатації програм, і даних, що передаються за допомогою мережевих протоколів. Тому при визначенні поняття «відмова ПК» слід виходити з аналізу часових характеристик функціонування програми і динамічних характеристик ЕКО, отриманих в процесі функціонування програмних засобів. Граничний час відновлення (допустимий час відновлення t_d) працездатного стану системи, при перевищенні якого необхідно фіксувати відмову (зрив функціонування), близький до періоду вирішення задач для підготовки інформації (даних) відповідного ЕКО.

Таким чином, для будь-якого ЕКО існує допустимий час відсутності даних від програми, при якому його характеристики знаходяться в допустимих межах. Виходячи з цього часу, можна встановити границі часової зони, яка розділяє працездатний і непрацездатний стан програмного забезпечення і дозволяє використовувати ці границі в якості критерію відмов (зривів функціонування).

У загальному випадку відмова ПК (програмного засобу) можна визначити як припинення функціонування програми (спотворення нормального ходу її виконання, зациклення) на час, що перевищує допустиме значення t_d , або на час, що не перевищує допустиме значення t_d , але з втратою усіх або частини оброблювальних даних чи з необхідним перезавантаженням ЕКО, на якому функціонує програмне забезпечення [72]. Оскільки відновлення працездатного стану програмного забезпечення може виникнути без

втручання оператора (перезавантаження ЕКО (маршрутизатора, комутатора, концентратора, тощо) не вимагається), або ж за участю оператора (перезавантаження ЕКО (маршрутизатора, комутатора, концентратора, тощо) необхідне). Тоді всі відмови у програмному забезпеченні можна трактувати як збої. В ДСТУ [16] під збоєм розуміється самоусувна відмова або одноразова відмова, яку незначним втручанням усуває оператор, тобто короткочасне порушення працездатності програмно-управляючих розрахункових комплексів, при якому функціонування відновлюється без проведення ремонтних робіт.

Відмову ПК (програмного засобу) будемо називати стійкою, якщо після закінчення допустимого часу t_d (резервного часу) на відновлення працездатності витрачається деякий час.

За характером наслідків всі відмови і збої програмних засобів можна розділити на три групи: незнецінюючі, частково знецінюючі та повністю знецінюючі попереднє напрацювання [71]. Відмову вважають незнецінюючою, якщо об'єкт ЕКО з резервом часу після відновлення працездатності може відновити роботу з того самого місця, на якому була перервана. При цьому все напрацювання між сусідніми відмовами є корисним. У випадку з повністю знецінюючими відмовами ПК доводиться всю роботу, зроблену до моменту відмови, виконувати заново. Все напрацювання до виникнення відмови виявляється марним, якщо воно менше заданої величини, і повинно бути додано до втрат робочого часу. Корисною ж являється тільки та частина напрацювання, яка не переривалася відмовами. Можливі і проміжні випадки, коли знецінюється лише частина виконаної роботи. Частково знецінюючі відмови характерні для об'єктів ЕКО з неперервним або періодичним контролем працездатності, в яких періодично фіксуються і зберігаються проміжні результати роботи. В об'єктах ЕКО можуть виникати у певних пропорціях всі три розглянутих типи відмов.

Таким чином, доведено важливість ЕКМ для стабільного та ефективного функціонування економіки, суспільства та держави. Проведено аналіз факторів, що впливають на надійність функціонування ПЗ ЕКО, та надано визначення основних понять теорії і практики надійності, що відносяться до програмних комплексів ЕКО, які використовуються в наукових роботах в цій предметній області.

1.2. Аналіз наукових результатів у дослідженні функціонування електронної комунікаційної мережі

Електронна комунікаційна мережа має всі ознаки складної технічної системи. До числа основних характерних ознак та особливостей можна віднести такі:

1. Наявність великої кількості взаємопов'язаних і складним чином взаємодіючих між собою різномірних елементів, об'єднаних у систему для досягнення єдиної мети.

У формалізованій схемі ЕКМ елемент виступає як об'єкт, що не підлягає подальшому розподілу на складові (в умовах розглянутої задачі). При цьому враховуються тільки ті властивості елемента, які визначають його взаємодію з іншими елементами та впливають на характер функціонування мережі в цілому.

2. Можливість розбиття розглянутої мережі на окремі об'єкти та підсистеми, мета функціонування яких підпорядкована загальній меті функціонування всієї мережі.

Практична реалізація цієї можливості дозволяє розглядати деяку сукупність елементів (об'єктів) даної мережі разом із зв'язками між ними як

підсистему. В якості підсистеми, зазвичай, виступають самостійні функціонально закінчені частини мережі, які вирішують конкретну задачу.

3. Елементи даної мережі (частина складної системи, яка в умовах даної задачі не підлягає подальшому поділу на частини) функціонують не ізольовано один від одного, а у взаємодії, при якій властивості одного елемента в загальному випадку залежать від умов, обумовлених поведінкою інших елементів.

Такими елементами мережі можуть бути: термінальне обладнання; каналоутворююче та комутаційне обладнання транспортного рівня; захищені Web-портали, на яких розташована різноманітна довідкова інформація.

4. Наявність управління, яке зазвичай, складно організоване та має ієрархічну структуру, а також розгалуженої інформаційної мережі і інтенсивних потоків інформації.

5. Електронна комунікаційна мережа взаємодіє з зовнішнім середовищем і функціонує в умовах впливу випадкових факторів (зовнішніх і внутрішніх, природних і штучних), які впливають на її функціонування [73].

6. При побудові ЕКМ передбачено використання різних видів надлишковості (функціональної, інформаційної, структурної, часової, навантажувальної), які спрямовані на підвищення загальної надійності функціонування системи.

Наприклад, на транспортному рівні канали зв'язку одного напрямку використовують різне середовище передавання, на рівні управління послугами і комутації здійснюється багаторазове резервування керуючих та комутаційних пристроїв.

Таким чином, зазначені вище ознаки й особливості побудови та функціонування ЕКМ дозволяють віднести їх до класу складних технічних систем. Дослідження процесів функціонування таких систем з метою визначення показників якості та надійності являє собою досить складне завдання, тим паче, що це завдання доводиться вирішувати, переважно, в умовах апіорної невизначеності. Тому, зазначені особливості електронних

комунікаційних мереж, а також якісні зміни в області інформаційних та комунікаційних технологій, обумовлені розвитком мікроелектроніки, вдосконаленням засобів зв'язку, обробки, зберігання і розподілу інформації, вимагають адекватного розвитку методологічних основ дослідження розглянутих мереж, особливо на даний час, у період їхнього вдосконалення та переходу на новий більш якісний рівень.

Наразі серед багатьох фахівців у сфері дослідження ЕКМ спостерігається певна скептичність щодо доцільності проведення наукових досліджень та впровадження практичних заходів, спрямованих на кількісне оцінювання та забезпечення надійності цього класу технічно складних систем [74– 77]. Ігнорування питання надійності часто ґрунтується на твердженні, що сучасні засоби зв'язку достатньо надійні, а мережі зв'язку розгалужені та допускають обхідні шляхи. Однак з кожним новим етапом розвитку техніки з'являються нові виклики, які потребують нових рішень. Це повною мірою відноситься і до забезпечення надійності мереж зв'язку.

Проведений аналіз робіт [78 – 87] вітчизняних та зарубіжних авторів свідчить, що оцінювання та забезпечення надійності ЕКО ЕКМ залишається актуальним науково-практичним завданням. Його вирішення потребує комплексного підходу з урахуванням усіх факторів, які впливають на функціонування цих мереж.

Аналіз результатів теоретичних досліджень, отриманих у даній предметній області, дозволяє зробити висновок, що на теперішній час вони не забезпечують усі зростаючі потреби практики. Окремі моделі та методи дослідження надійності мереж зв'язку розроблено в працях Креденцера Б.П., Жердєва М.К., Могилевича Д.І., Вишнівського В.В. [88 – 92].

В цих роботах показано, що якісний і кількісний аналіз надійності вимагає вибору відповідної методики математичного моделювання та аналізу. Моделювання процесів повинно ефективно фіксувати важливі параметри функціонування реальної системи, а техніка аналізу – надати розуміння поведінки системи без запуску (або виконання) реальної системи.

Визначено наявність методів, які можуть забезпечити аналіз на ранній стадії, коли доступні лише початкові данні, а також інші методи, які забезпечують аналіз на пізніших стадіях проєктування, коли доступні більш точні деталі реалізації. Найбільш поширеними методиками для моделювання надійності обладнання мереж зв'язку є: блок-схема надійності, дерево несправностей і ланцюги Маркова. Традиційно моделі, розроблені з використанням цих методів, аналізуються за допомогою аналітичних методів або інструментів імітаційного моделювання.

Дані рішення ґрунтуються на загальних методах дослідження і оптимізації побудови мереж зв'язку, які розроблені в працях Філіпса Д., Гарсія-Діаса А., Шварца М., Стеклова В.К., Беркман Л.Н., Климаша М.М. [93–107] та ін.

Методам синтезу високонадійних структур розподілених інформаційних систем присвячені роботи: синтезу транспортної (магістральної) мережі за критерієм мінімуму вартості при обмеженнях на кількість переданої інформації, час передавання повідомлення, ступінь вузлової зв'язності – роботи [108 – 110], синтезу абонентської мережі на основі мінімально-зв'язного дерева – роботи [11 – 113]; синтезу параметрів мережі при заданій топології – централізованої, кільцевої, радіальної, деревоподібної, радіально-вузлової – роботи [114 – 116]; методології побудови функціонально стійкої розподіленої інформаційної системи, яка функціонує в умовах сучасного інформаційного протиборства – роботи Барабаша О.В. [117 – 120].

Розв'язанню задачі забезпечення надійності функціонування складних систем присвячено ряд наукових праць [121 – 124]. Однак основна увага в них приділяється розв'язанню окремих задач, а саме: побудові резервованих інформаційно-керуючих систем, відмовостійких керуючих обчислювальних систем або адаптивних систем управління. У роботах по дослідженню надійності використовуються відомі класичні результати, засновані на приведенні структури системи до відповідної схеми у вигляді послідовних і

паралельних з'єднань модифікованих елементів [125].

Слід зазначити, що наведені вище наукові результати присвячені дослідженню різноманітних часткових аспектів функціонування мереж зв'язку та отримані, здебільшого, без урахування характеристик надійності.

Разом з тим, як відзначено у низці робіт [126 – 132], такий підхід є необґрунтованим. Велика кількість елементів сучасних і перспективних ЕКМ навіть при досить високій безвідмовності окремих елементів може призвести до помітного погіршення показників безвідмовності мережі та зниженню якості її функціонування.

Таким чином, недостатнє теоретичне опрацювання задач даної предметної області вимагає подальшого розвитку науково-методичного апарату оцінювання надійності електронного комунікаційного обладнання електронних комунікаційних мереж, що надасть можливість комплексно враховувати фактори, які впливають на функціонування такого класу складних технічних систем.

1.3. Постановка наукового завдання

Проведений в п. 1.1 аналіз стану існуючих та перспективних ЕКМ і особливостей їх функціонування показав, що вони не повною мірою відповідають вимогам до надійності електронного комунікаційного обладнання та ефективності інформаційного обміну. В оприлюднених науково-технічних роботах (п.1.2) з дослідження надійності ЕКО відсутній єдиний методологічний підхід та теоретичні положення, які б дозволили комплексно урахувати основні фактори, що впливають на надійність та результати її кількісної оцінки, зокрема, вплив короткочасних перерв (збоїв)

на процеси функціонування ЕКО, сумісного використання різних видів резервування, можливостей ремонтно-відновлювальних органів, обмеженості вихідної інформації. Все це ускладнює прийняття ефективних науково-обґрунтованих рішень при виконанні комплексу завдань, спрямованих на забезпечення необхідного рівня надійності ЕКО та підвищення можливостей існуючих та перспективних ЕКМ.

Таким чином, можна зробити висновок про наявність на даний час таких протиріч:

на практиці – між високими вимогами до показників надійності електронного комунікаційного обладнання і реальною експлуатаційною надійністю цього обладнання;

в теорії – між обмеженими можливостями відомих наукових результатів і необхідністю сумісного урахування основних факторів при оцінюванні надійності.

Тому актуальним є наукове завдання, яке спрямоване на вирішення перелічених вище протиріч і полягає в удосконаленні науково-методичного апарату комплексного оцінювання надійності ЕКО на основі декомпозиції загальної моделі функціонування на дві взаємопов'язані моделі: регенеруючого і марківського випадкових процесів – з наступним синтезом часткових результатів, що забезпечує сумісне урахування відмов і збоїв обладнання та їх наслідків, характеристик часової надлишковості і обмеженості вихідної інформації (рис. 1.1).

Визначимо основні поняття, які будемо використовувати під час проведення дисертаційного дослідження.

Під удосконаленням науково-методичного апарату слід розуміти подальший розвиток в прикладному плані відомих методів, моделей і методик з метою розширення їх можливостей для комплексного оцінювання надійності функціонування ЕКО мереж зв'язку в умовах впливу сукупності різних факторів. Вплив одних факторів призводить до зниження рівня надійності, вплив інших направлено на забезпечення нормального функціонування ЕКО.



Рисунок 1.1 – Наукове завдання дисертаційного дослідження

Комплексність оцінювання надійності передбачає можливість сумісного урахування в моделях, що розроблюються, найбільш суттєвих факторів, впливаючих на надійність функціонування об'єктів, основними з яких є:

- обмежена надійність технічних та програмних засобів, яка призводить до відмов та збоїв ЕКО;
- різні наслідки відмов і збоїв: при незначущих відмовах після закінчення відновлення працездатності функціонування об'єкта продовжується з урахуванням зробленої роботи до моменту відмови роботи;
- при значущих відмовах все напрацювання об'єкта (або тільки його частини) до виникнення відмови виявляється марним і його доводиться повторювати заново після закінчення ремонту;
- сумісне урахування двох складових комбінованого резерву часу: поповнювана складова t_d – для боротьби зі збоями, непоповнювана складова 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 значущих відмовах;
- рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу (операторів), який характеризується часом відновлення працездатності об'єкта;
- апріорна невизначеність – неповнота (обмеженість) вихідної інформації.

Об'єкт ЕКО в даній дисертації виступає як узагальнене поняття. Під цим будемо розуміти окремі типові пристрої обладнання, а також сукупність певним чином пов'язаних між собою пристроїв, утворюючих комунікаційні маршрути (шляхи). В подальшому вказану вище сукупність типових пристроїв, утворюючих маршрути, буде представлено одним узагальненим структурним елементом (об'єктом), при функціонуванні якого використовується комбінований резерв часу (рис. 2.1).

Метою теоретичного дослідження процесів функціонування об'єктів ЕКО є побудова моделей комплексного оцінювання надійності, під якими будемо розуміти аналітичні залежності, що встановлюють зв'язок між показниками надійності функціонування об'єктів, характеристиками відмов та

збоїв, а також сукупність технічних параметрів об'єктів, які визначають умови їх функціонування з урахуванням часових обмежень, обумовлених використанням комбінованого резерву часу.

Слід відмітити, що зазначений вище комплексний підхід щодо оцінювання надійності електронного комунікаційного обладнання ЕКМ є відмінною особливістю даної дисертаційної роботи і характеризує новизну отриманих в ній наукових результатів.

Наведемо в загальному вигляді формалізовану схему процесу дослідження надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання ЕКМ [133, 134].

Дано: структуру мережі зв'язку представлено у виді графу $G(N, M)$, де $N\{n_i\}$ – множина вершин (маршрутизатори, комутаційні центри), $M\{m_{ij}\}$ – множина ребер. Шлях (маршрут):

$$\pi = n_1^0 \cap n_2^\tau \cap n_3^\tau \cap \dots \cap n_{k-1}^\tau \cap n_k^0,$$

де $n_1^0, n_k^0 \in N^0$; $n_2^\tau, n_3^\tau, \dots, n_{k-1}^\tau \in N^\tau$;

n^0 – кінцевий маршрутизатор;

n^τ – транзитний маршрутизатор.

Напрямок зв'язку:

$$n_1^0(\pi_1) = n_1^0(\pi_2) = \dots = n_1^0(\pi_k) \text{ і } n_k^0(\pi_1) = n_k^0(\pi_2) = \dots = n_k^0(\pi_k),$$

тобто всі шляхи одного напрямку зв'язку містять ті самі (n_1^0 та n_k^0) кінцеві маршрутизатори.

Шляхи π_1 та π_2 одного напрямку зв'язку є незалежними, якщо $n_i^\tau(\pi_1) \notin N^\tau(\pi_2)$, а $n_i^\tau(\pi_2) \notin N^\tau(\pi_1)$, тобто шляхи одного напрямку зв'язку не містять ті самі транзитні маршрутизатори.

Нехай відомі (або задані) вихідні дані, які характеризують процес функціонування вказаного вище об'єкта електронного комунікаційного обладнання, надійність якого являється предметом дослідження в даній роботі:

– характеристики безвідмовності об'єкта

$$B_0 = \{b_i, i = 1, 2, \dots, |B_0|\};$$

– характеристики ремонтпридатності

$$R_0 = \{r_j, j = 1, 2, \dots, |R_0|\};$$

– характеристики часової надлишковості

$$U_0 = \{u_l, l = 1, 2, \dots, |U_0|\};$$

– умови використання і поповнення резервів часу

$$\Omega_0 = \{w_k, k = 1, 2, \dots, |\Omega_0|\};$$

– характеристики обурюючих впливів «агресивних» факторів і їх наслідків

$$V_0 = \{v_n, n = 1, 2, \dots, |V_0|\};$$

– характеристики вихідних випадкових величин і умов функціонування об'єкта ЕКО

$$F_0 = \{f_z, z = 1, 2, \dots, |F_0|\}.$$

Сформульовано критерії відмови (зриву функціонування) об'єкта:

з поповнюваним (t_d) резервом часу

$$t_b > t_d; \quad (1.1)$$

з непоповнюваним (t_p) і комбінованим (t_d, t_p) резервом часу

$$\sum_{i=1}^{n(t)} t_{hi} < t_3 / i : t_{hi} \in [0, t]; \quad (1.2)$$

$$\forall t_{hi} \geq \frac{t_3}{\sum_{i=1}^{n(t)} t_{hi}} = t, \quad (1.3)$$

де t_b – тривалість відновлення працездатності об'єкта після відмови (або збою);

t_{hi} – корисне напрацювання після виникнення i відмов, $i = \overline{1, n(t)}$;

$t = t_3 + t_p$ – інтервал оперативного часу, виділеного об'єкту для виконання

завдання тривалістю t_3 ;

$\forall t_{hi} \geq t_3$ – квантор спільності: «для всіх $t_{hi} \geq t_3$ ».

Формула (1.2) справедлива для випадку незнецінюючих відмов об'єкта, а формула (1.3) – для знецінюючих відмов.

Вибрано показники надійності функціонування об'єкта P_h , $h=1,2,\dots$, а також задано обмеження та допущення:

1. Контроль працездатності об'єкта повний, неперервний і достовірний, що дозволяє виявляти відмови обладнання будь-якого типу в момент їх виникнення;
2. Напрацювання об'єкта між відмовами розподілено за тим же законом, 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 $t = t_3 + t_p$ не обмежується.

Необхідно побудувати модель оцінювання надійності – отримати аналітичні залежності для показників надійності функціонування об'єктів в електронному комунікаційному обладнанні, в яких використовується комбінований резерв часу, що містить дві складові – поповнюваний (t_d) і непоповнюваний (t_p) резерв:

$$P_h(t_3, t_d, t_p) = f(B_0, R_0, U_0, \Omega_0, V_0, F_0), \quad h=1, 2, \dots \quad (1.4)$$

Використовуючи отриманий в дисертації удосконалений науково-методичний апарат, необхідно провести теоретичне дослідження взаємопов'язаного впливу різних факторів на процес функціонування електронного комунікаційного обладнання електронної комунікаційної мережі для оцінки ефективного використання комбінованого часового резервування і обґрунтування рекомендацій щодо поліпшення показників надійності.

1.4. Обґрунтування загальної методології і структурно-логічної схеми дисертаційного дослідження

Розв'язання сформульованого в дисертації наукового завдання передбачає комплексний взаємозалежний розгляд великого кола наукових та прикладних питань, які з методологічної точки зору доцільно звести в декілька основних напрямків дослідження, тісно пов'язаних між собою єдиною методологією. Суть розробленої методології містить формулювання розв'язуваного наукового завдання, характеристики компонентів науково-технічного дослідження: об'єкта вивчення і його основних особливостей, мети і взаємопов'язаних часткових задач дослідження, сукупності шляхів і методів розв'язання наукового завдання, а також виділення основних складових взаємопов'язаних частин цього завдання та визначення послідовності їх розгляду для досягнення поставленої мети [135, 136].

В попередньому підрозділі (п. 1.3) сформульовано і обґрунтовано наукове завдання, яке розв'язується в даній дисертаційній роботі – удосконалення науково-методичного апарату комплексного оцінювання надійності ЕКО на основі декомпозиції загальної моделі функціонування на дві взаємопов'язані моделі: регенеруючого і марківського випадкових процесів – з наступним синтезом часткових результатів, що забезпечує сумісне урахування відмов і збоїв обладнання та їх наслідків, характеристик часової надлишковості і обмеженості вихідної інформації.

Об'єктом дослідження є надійність функціонування ЕКО ЕКМ в реальних умовах експлуатації.

Предмет дослідження – методи і моделі оцінювання надійності ЕКО з комбінованим часовим резервуванням при комплексному урахуванні сукупності факторів, які впливають на процес функціонування мережі.

Мета дисертаційного дослідження полягає в обґрунтуванні

рекомендацій щодо поліпшення показників надійності ЕКО при сумісному використанні поповнюваної і непоповнюваної складових комбінованого резерву часу на основі аналізу результатів теоретичного дослідження отриманих в дисертації нових моделей надійності.

Відповідно до поставленої мети дослідження, що проводиться, розв’язуване в дисертації наукове завдання доцільно розбити на ряд складових взаємопов’язаних частин, які визначають напрямки дослідження та черговість їх виконання.

Перший напрямок пов’язаний з обґрунтуванням загального підходу до розв’язання сформульованого наукового завдання, який дозволив визначити методологію дисертаційного дослідження, що проводиться.

Сутність даного підходу полягає в декомпозиції процесу розв’язання загального наукового завдання комплексного оцінювання надійності ЕКО на два взаємопов’язані етапи. На першому етапі – побудова моделі надійності об’єкта ЕКО з поповнюваною складовою (t_d) комбінованого резерву часу, результати дослідження якої використовуються на другому етапі в якості вихідних даних в процесі побудови моделі надійності об’єкта з непоповнюваною складовою (t_p) резервного часу, що забезпечує синтез часткових результатів дослідження цих моделей і отримання загального розв’язання сформульованого наукового завдання.

Реалізація такого підходу стала можливою завдяки обраному в дисертації варіанту взаємодії поповнюваної (t_d) і непоповнюваної (t_p) складових комбінованого резерву часу, який найбільше відповідає реальним процесам функціонування ЕКО ЕКМ.

Такий підхід дозволяє уникнути необхідності побудови громіздкої загальної математичної моделі функціонування об’єкта ЕКО з комбінованим резервом часу, мало придатної для практичного дослідження. Проте він дає можливість помітно спростити розв’язання сформульованого наукового завдання та отримати сукупність нових розрахункових формул для основних

показників надійності, що дозволяють проводити комплексне оцінювання надійності ЕКО ЕКМ.

Другий напрямок дослідження полягає в розробці удосконаленого методу і моделей комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО при повній вихідній інформації.

Розглянута модель функціонування системи об'єкт-час (ОЧ) (рис. 2.1) з комбінованим резервом часу дозволила сформулювати загальну постановку задачі комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО. Проведений аналіз відомих методів розв'язання цієї задачі (методи напівмарківських або багатомірних марківських випадкових процесів, а також інтегральний і диференціальний методи) дозволив зробити висновок, що отримання в явному виді розрахункових формул для основних показників надійності пов'язано з серйозними труднощами.

Для подолання цих труднощів проведено аналіз процесу функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу, який дозволяє виявити деякі специфічні особливості цього процесу, які стали підґрунтям для розробки удосконаленого методу розв'язання задачі. Зокрема, було доведено, що однією з таких важливих особливостей об'єктів ЕКО є передбачені в них одночасно обмеження на час t_v кожного ремонту об'єкта, а також на сумарний час простою в ремонті (при знецінюючих відмовах – і на повторення всього або частини попереднього навантаження) до виконання завдання. Хоча в системі ОЧ, яка розглядається, резерв часу являється єдиним, зручно при аналізі надійності вважати його таким, що складається з двох складових: поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p .

При цьому відмови і збої об'єкта електронного комунікаційного обладнання проходять перевірку на виконання встановлених часових обмежень в два етапи. На першому етапі перевіряється умова $t_v > t_d$, при виконанні якої подальше проведення системи визначається вибраним варіантом взаємодії поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових

комбінованого резерву часу залежно від призначення системи.

Аналіз процесу функціонування об'єкта ЕКО дозволив зробити висновок, що даний об'єкт містить два джерела резерву часу:

1. Функціональна інерційність, що допускає незначні перерви в роботі обладнання мережі на допустимий час t_d , і при виконанні умови $t_b \leq t_d$ об'єкт ЕКО продовжує нормально функціонувати, не реагуючи на такі відмови або збої об'єкта;

2. Непоповнюваний резерв t_p (друга складова комбінованого резерву часу) може створюватися за рахунок збільшення часу, що виділяється об'єкту для виконання завдання тривалістю t_3 і який називається оперативним часом $t = t_3 + t_p$.

Тому в такій системі ОЧ доцільно вибирати варіант взаємодії поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових комбінованого резерву часу:

на першому етапі перевірки часових обмежень при виконанні умови $t_b > t_d$ інтервал часу відновлення $\xi = \min(t_b, t_d)$, що не перевищує допустиме значення t_d , відноситься до корисного часу $T_k(t_p)$, а інтервал часу $t_b - t_d$ включається до сумарного непродуктивного часу $T_{\text{нп}}(t_3)$;

на другому етапі перевірки часових обмежень після виконання умови $t_b > t_d$ непоповнювана складова t_p зменшується на величину $t_b - t_d$ (а при знецінюючих відмовах – ще і на величину знеціненого корисного напрацювання) та перевіряється умова $T_{\text{нп}}(t_3) < t_p$, виконання якої свідчить про те, що непоповнюваний резерв часу t_p не витрачений повністю і при цьому об'єкт ЕКО продовжує нормально функціонувати; при $T_{\text{нп}}(t_3) > t_p$ виникає відмова (зрив функціонування) в момент $t_p = 0$. Завдання виявляється виконаним в момент, коли сумарний корисний час $T_k(t_p)$ досягає величини t_3 раніше, ніж буде витрачена непоповнювана складова t_p комбінованого

резерву часу.

Таким чином, викладені вище особливості функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу є обґрунтуванням для розробки удосконаленого методу розв'язання сформульованого наукового завдання.

Сутність удосконалення полягає в декомпозиції загальної моделі функціонування об'єкта електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу на дві взаємопов'язані часткові моделі функціонування, які реалізуються окремо: перша – математична модель регенеруючого випадкового процесу, призначена для перевірки виконання часового обмеження, що задається непоповнюваною складовою t_d , а друга – математична модель марківського процесу спеціального виду – перевіряє виконання часового обмеження, що накладається непоповнюваною складовою t_p з урахуванням вибраного варіанта взаємодії складових t_d і t_p комбінованого резерву часу.

Взаємозв'язок цих моделей забезпечується тим, що результат дослідження першої моделі використовується в якості вихідної інформації при дослідженні другої моделі, що дозволяє отримати результат розв'язання загального наукового завдання у виді синтезу часткових результатів дослідження вказаних вище моделей.

Реалізація запропонованого удосконаленого методу дає можливість спростити процес отримання наукових результатів дисертаційного дослідження – нових моделей комплексного оцінювання надійності об'єктів ЕКО при сумісному урахуванні сукупності факторів, впливаючих на процес функціонування мережі зв'язку.

Третій напрямок дослідження пов'язаний з розробкою удосконаленої методики і моделей оцінювання надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання ЕКМ при апріорній невизначеності (обмеженій вихідній інформації).

Необхідність проведення такого дослідження можна пояснити тим, що прийняті в багатьох роботах допущення про повну і достовірну вихідну інформацію не завжди виконується на практиці. Через це можуть виникнути серйозні труднощі у проведенні достовірного кількісного аналізу надійності в умовах апріорного «голоду» – обмеженій вихідній інформації про закони розподілу визначаючих випадкових величин, що характеризують надійність об'єктів ЕКО.

Наявність невизначеності (неповноти, недостовірності) вихідної інформації в задачах надійності обумовлено тим, що в багатьох випадках не вдається отримати достатньо великий об'єм вибірки випадкових величин, які характеризують безвідмовність, ремонтпридатність і процес функціонування досліджуваного об'єкта, необхідний для оцінювання ступеня узгодженості теоретичного і статистичного розподілів. Частіше вдається, наприклад, за результатами випробувань або за даними експлуатації достатньо точно визначити тільки математичне очікування і дисперсію випадкової величини. При цьому істину функцію розподілу цієї випадкової величини визначити не вдається, але відомо, що вона належить множині всіх можливих теоретичних розподілів позитивних випадкових величин з фіксованим математичним очікуванням [89].

В цьому випадку отримати точні значення показників надійності досліджуваних об'єктів електронного комунікаційного обладнання не представляється можливим, і задача полягає в знаходженні точних нижніх та верхніх границь цих показників. Математичні основи цього підходу розроблено академіком НАНУ В.С. Корольюком та його учнями [137 – 141].

Саме цей аналітичний метод було покладено у основу методики для розв'язання сформульованої в дисертації науковій задачі. Не дивлячись на те, що на теперішній час загальна теорія розв'язання подібних задач з використанням даного методу розроблена достатньо повно, знаходження екстремумів і граничних розподілів для конкретних функціоналів, які характеризують надійність об'єктів, аналітичними методами, за образним

висловлюванням академіка В.С. Королюком, «залишається скоріше мистецтвом». Тому виникає необхідність подальшого розвитку вказаного вище загального аналітичного підходу в прикладному плані для визначення двосторонніх оцінок (точних граничних значень) показників надійності об'єктів ЕКО ЕКМ.

Четвертий напрямок дослідження полягає в узагальненні отриманих в дисертації наукових і прикладних результатів в рамках загальної методики комплексного оцінювання показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання при використанні комбінованого часового резервування. Дана методика може бути корисною спеціалістам в галузі надійності електронного комунікаційного обладнання ЕКМ при проведенні якісного і кількісного аналізу надійності функціонування ЕКО з комплексним урахуванням найбільш суттєвих факторів, впливаючих на надійність обладнання, на етапах модернізації наявних та розробки перспективних ЕКМ.

Крім того, метою даного напрямку дослідження є отримання і аналіз результатів кількісного оцінювання показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання в різних умовах їх функціонування, зокрема, при знецінюючих та незнецінюючих відмовах і збоїв технічних та програмних засобів з урахуванням можливості розбиття виконуваного завдання на складові взаємопов'язані частини (етапи) із запам'ятовуванням проміжних результатів.

Таке комплексне теоретичне дослідження дає можливість виявити деякі важливі загальні та часткові властивості комбінованого часового резервування, оцінити ефективність цього методу забезпечення надійності функціонування ЕКО, що дозволяє обґрунтувати низку рекомендацій щодо практичного використання результатів дисертаційної роботи для поліпшення показників надійності.

Основні часткові задачі дисертаційного дослідження, їх склад та взаємозв'язок, що відображають структурно-логічну схему виконання роботи, наведено на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Структурно-логічна схема дисертаційного дослідження

Висновки до розділу 1

1. На даний час є протиріччя між високими вимогами до показників надійності ЕКО і реальною експлуатаційною надійністю цього обладнання та між обмеженими можливостями відомих наукових результатів і необхідністю сумісного урахування основних факторів при оцінці надійності.

2. Показано, що вирішення цих протиріч значною мірою визначається розв'язанням сформульованого наукового завдання – удосконалення науково-методичного апарату комплексного оцінювання надійності ЕКО ЕКМ на основі декомпозиції загальної моделі функціонування на дві взаємопов'язані моделі: регенеруючого і марківського випадкових процесів – з наступним синтезом часткових результатів, що забезпечує сумісне урахування відмов і збоїв обладнання та їх наслідків, характеристик часової надлишковості і обмеженості вихідної інформації.

3. Незважаючи на актуальність цього завдання, питання побудови математичних моделей надійності об'єктів ЕКО при використанні комбінованого часового резервування з урахуванням різних типів виникаючих відмов, характеристик контролю працездатності та деяких інших факторів у відомій літературі досліджені недостатньо, хоча для їх розв'язання є необхідні передумови.

4. Для вирішення сформульованого наукового завдання обґрунтовано сукупність основних взаємопов'язаних напрямків дисертаційного дослідження:

1) обґрунтування загальної методології і структурно-логічної схеми дисертаційного дослідження;

2) розробка удосконаленого методу і моделей комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО ЕКМ при повній вихідній інформації;

3) розробка удосконаленого методу і моделей оцінювання надійності об'єктів ЕКО ЕКМ при апіорній невизначеності (обмеженої вихідної інформації);

4) теоретичне дослідження показників надійності об'єктів ЕКО ЕКМ при використанні комбінованого часового резервування та рекомендації щодо їх практичного використання.

Вирішення комплексу взаємопов'язаних часткових задач дисертаційного дослідження перелічених вище напрямків, визначає структуру та зміст наступних розділів дисертації, а сукупність отриманих при цьому результатів дає вирішення сформульованого наукового завдання.

РОЗДІЛ 2

МЕТОД ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ВІДМОВ ТА КОМБІНОВАНИМ РЕЗЕРВОМ ЧАСУ ПРИ ПОВНІЙ ВИХІДНІЙ ІНФОРМАЦІЇ

Даний розділ присвячено удосконаленню науково-методичного апарату з метою розробки методу та аналітичних моделей комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу при повній вихідній інформації. Для обґрунтованого вибору напрямів удосконалення проведено аналіз, який дозволить виявити основні особливості функціонування досліджуваних об'єктів, обумовлених наявністю в системах двох різних джерел часової надлишковості. Хоча в даній системі резерв часу є єдиним, при аналізі надійності функціонування доцільно вважати його таким, що складається з поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових використовуваного резерву часу.

Результати аналізу дозволили обрати найбільш відповідний варіант вказаної вище взаємодії, який найбільше відповідає особливостям функціонування ЕКО ЕКМ та мало висвітлений у відомій науково-технічній літературі. Ґрунтуючись на це, у розділі сформульовано постановку наукового завдання, для розв'язання якого запропоновано удосконалений метод, заснований на декомпозиції загальної громіздкої математичної моделі функціонування системи з комбінованим резервом часу на дві взаємопов'язані більш прості моделі, що досліджуються окремо. Використання запропонованого методу дає можливість помітно спростити розв'язання сформульованої наукової задачі і дозволяє отримати сукупність нових розрахункових формул для комплексного оцінювання показників надійності функціонування системи з комбінованим резервом часу та різних типів відмов об'єктів ЕКО.

Матеріал даного розділу оприлюднено у статті [43].

2.1. Особливості функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з часовим резервуванням та показники їх надійності

2.1.1. Сутність часового резервування і способи використання та виконання резервів часу.

Часове резервування представляє собою метод забезпечення нормального функціонування технічних об'єктів різного призначення, які виконують певні завдання в умовах впливу випадкових факторів (відмов, збоїв, завад та інше), шляхом призначення та використання резервного (надлишкового) часу. На відміну від інших видів надлишковості (структурної, навантажувальної та інших) тут резервом є час. Цей резерв вноситься не в об'єкт, як, наприклад, при структурному резервуванні, а в порядок (алгоритм) використання (застосування) об'єкта.

В загальному випадку під часовим резервуванням розуміють сукупність правил застосування об'єкта та способів підвищення його надійності, заснованих на збільшенні номінальної продуктивності (пропускної здатності), введенні додаткових пристроїв для збільшення сумарної продуктивності, удосконаленні алгоритмів функціонування та умов взаємодії об'єкта із суміжними об'єктами, використанні функціональної інерційності систем, а також інших способів, що призводять до виникнення у об'єкта або окремих його пристроїв надлишкового часу, яке може бути використано для відновлення працездатності, виявлення та локалізації відмов, реконфігурації технічної структури, повторення робіт, інформаційного відновлення, підключення структурного резерву та інше [142].

Об'єкт з часовим резервуванням може розглядатися як сукупність вихідного об'єкта і резервного часу (рис. 2.1). Схема використання резерву часу якісно аналогічна схемі ненавантаженого дублювання апаратури, так як

після відмови технічного об'єкта починає діяти резерв часу. Отже, втрата об'єктом працездатності не означає одночасно відмови об'єкта з часовим резервуванням, якщо відновлення працездатності закінчиться до витрачення резервного часу.

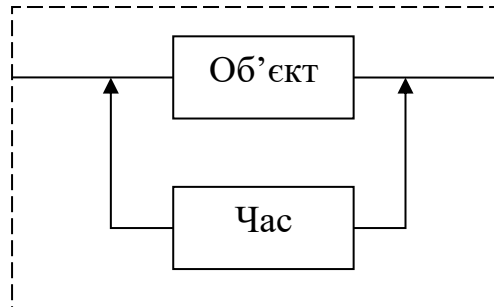


Рисунок 2.1 – Схема використання резерву часу в об'єктах з часовим резервуванням

В подальшому для стислості будемо писати «система ОЧ» (об'єкт-час) або просто «система», маючи на увазі під цим об'єкт ЕКО з часовим резервуванням (рис. 2.1).

Відмови об'єкта можуть відрізнятись за наслідками. Якщо відмова викликає лише затримку виконання завдання, але не призводить до повторення робіт, знецінених відмовою, то її називають незнецінюючою, а в протилежному випадку – знецінюючою. Знецінювання може бути повне або часткове. У зв'язку з наявністю знецінюючих відмов об'єкта все напрацювання системи ОЧ можна розділити на корисне та знецінене. Корисним є напрацювання, не знецінене відмовами об'єкта, а знецінене – напрацювання, не включене в корисне.

За способом використання і поповнення резерву часу при функціонуванні системи ОЧ розрізняють непоповнюваний, поповнюваний та комбінований резерв часу.

Непоповнюваний резерв часу t_p встановлюється заздалегідь, до початку роботи, а не зростає при виконанні завдання. При працездатному стані всіх елементів об'єкта (рис. 2.1) поточне значення резерву не змінюється, а при відмовах може зменшуватись або стрибкоподібно (при відмовах, знецінюючих

все попереднє напрацювання), або в лінійній залежності від часу при відновленні працездатності.

В системах з поповнюваним резервом часу після кожної відмови об'єкта виділяється один і той же допустимий час відновлення t_d , який не залежить від кількості попередніх відмов і часу, витраченого на їх усунення. В момент закінчення ремонту резерв часу негайно поповнюється до початкового рівня t_d (миттєво поповнюваний резерв часу).

В одному і тому об'єкті з часовим резервуванням можуть використовуватися обидва види резерву часу – непоповнюваний t_p та поповнюваний t_d . В цьому випадку резерв часу називають комбінованим та встановлюють обмеження одночасно на сумарний час простою в ремонті (іноді і на час повторення попереднього напрацювання) до виконання завдання, а також і на час кожного ремонту. В подальшому будемо вважати $t_d = \text{const}$ і $t_p = \text{const}$.

З урахуванням вищевикладеного під відмовою (зривом функціонування) об'єкта з часовим резервуванням будемо розуміти подію, яка полягає в порушенні працездатності об'єкта, що має недопустимі наслідки або незнешкоджена за допустимий час.

На основі цього загального визначення для кожного випадку використання конкретного виду резерву часу необхідно формулювати свої критерії відмови об'єкта. Зокрема, в об'єкті з поповнюваним резервом часу, який характеризується лише одним обмеженням (на час відновлення працездатності об'єкта t_b), відмова системи ОЧ виникає в момент, коли витрати часу t_b перевищують використовуваний резерв часу t_d . В об'єкті з непоповнюваним резервом часу t_p відмова (зрив функціонування) виникає в момент τ , коли сумарний непродуктивний час $T_{\text{нч}}(t_3)$ до виконання завдання тривалістю t_3 досягає значення виділеного резерву часу t_p , а корисне

напрацювання $T_k(t_p)$ об'єкта при цьому менше необхідної величини t_3 . В системах, в яких за умовами функціонування прийнято декілька обмежень на використання резервів часу (наприклад, в системах з комбінованим резервом часу, що містить, поповнювану t_d і непоповнювану t_p складові), відмова системи є складною подією. Виникнення цієї події залежить від характеру порушення обмежень. Зокрема, до відмови системи може призвести порушення хоча б одного будь-якого обмеження або ж всіх прийнятих обмежень разом.

Таким чином, головною особливістю об'єктів з часовим резервуванням є те, що їх надійність оцінюється за результатами виконання встановлених часових обмежень до всією траєкторією функціонування об'єкта або за результатами виконання деякого завдання. Виконання завдання – це подія, що полягає в завершенні заданого об'єму робіт зі встановленими обмеженнями на час виконання всіх робіт і окремих етапів та заданими вимогами до якості роботи системи. Порушення встановлених вимог та обмежень призводить до зриву виконання завдання і розглядається як відмова (зрив функціонування) системи.

Отже, систему з часовим резервуванням (систему ОЧ) можна розглядати як своєрідний перетворювач потоку відмов: вхідним є потік відмов об'єкта, а вихідним – потік відмов системи (рис. 2.1). За рахунок дії резерву часу вихідний потік системи містить в середньому менше число відмов в одиницю часу, чим вхідний потік, – виникає розрідження вихідного потоку відмов системи ОЧ. Ефект розрідження проявляється тим сильніше, чим більше виділяється і використовується резервного часу.

До переваг розглянутого вище підходу до аналізу та забезпеченню надійності об'єктів ЕКО можна віднести наступні:

1. Поліпшення показників надійності функціонування об'єкта часто не пов'язано зі збільшенням додаткових засобів, а засновано на введенні або використанні вже маючих в об'єкті резервів часу;

2. Урахування резерву часу дозволяє відобразити істину надійність, тобто дає можливість більш об'єктивно оцінити можливості системи ОЧ нормально функціонувати в умовах впливу різних дестабілізуючих факторів. Саме наявністю резерву часу можна в багатьох випадках пояснити, чому об'єкти виконують свої задачі успішніше, ніж це слід за показником безвідмовності обладнання;

3. Більш глибоке проникнення в сутність досліджуваних процесів функціонування складних технічних об'єктів дозволяє виявити та обґрунтувати нові ефективні методи підвищення їх надійності в реальних умовах експлуатації.

Разом з цим, метод часового резервування має недоліки: підвищення надійності функціонування супроводжується погіршенням деяких інших характеристик системи, зокрема, зменшенням реальної продуктивності, погіршенням точності, ускладненням алгоритмів функціонування, підвищенням вимог щодо обладнання контролю працездатності та пошуку дефектів, до системи технічного обслуговування і ремонту. Необхідно також відмітити, що в системі ОЧ іноді важко виявити відмову, так як для цього не завжди достатньо мати обладнання контролю працездатності, а необхідно неперервно вести статистику втрат робочого часу та мати чіткі ознаки, які б дозволяли своєчасно фіксувати момент відмови об'єкта з часовим резервуванням.

2.1.2. Показники надійності функціонування об'єктів з часовим резервуванням. В попередньому розділі було зазначено, що надійність систем з часовим резервуванням необхідно оцінювати за результатом виконання встановлених часових обмежень до всієї траєкторії функціонування об'єкта або за результатами виконання деякого завдання. Ця обставина призвела до необхідності уточнення поняття відмови системи ОЧ та внесло деякі нові елементи у визначення показників надійності таких систем.

Наведемо ймовірнісне визначення основних показників надійності функціонування систем ОЧ, підкреслюючи при цьому особливості,

обумовлені використанням резервного часу.

Позначимо через $T_0(t_p)$ напрацювання до першої відмови (зриву функціонування) системи ОЧ:

$$T_0(t_p) = T_{\kappa}(t_p) + t_p,$$

де $T_{\kappa}(t_p)$ – корисне напрацювання системи до першої відмови, тобто до закінчення резерву часу t_p . У випадку непоповнюваного резерву часу $T_{\kappa}(t_p) \in$ корисне напрацювання до моменту часу, коли вперше виконується умова $T_{\text{нп}}(t_3) > t_p$, де $T_{\text{нп}}(t_3)$ – сумарний непродуктивний час до виконання завдання тривалістю t_3 . Тоді ймовірність безвідмовного функціонування $P_{\text{бф}}$ можна представити у вигляді ймовірності того, що напрацювання до першої відмови $T_0(t_p)$ перевищить заданий оперативний час $t = t_3 + t_p$, тобто

$$P_{\text{бф}} = P_1(t, t_d, t_p) = P\{T_0(t_p) > t\}. \quad (2.1)$$

Ймовірність (2.1) відповідає випадку використання в системі комбінованого резерву часу (t_d, t_p) . При використанні тільки поповнюваного t_d або непоповнюваного t_p резерву часу зазвичай пишуть відповідно $P(t, t_d)$, $P(t_3, t_p)$ або $P(t_3, t)$.

Наведене вище визначення ймовірності безвідмовного функціонування справедливе для будь-якого способу використання і поповнення резерву часу та об'єктів різного призначення. Необхідно тільки для кожного конкретного способу часового резервування, а також виду відмови об'єкта формулювати критерії відмови системи ОЧ і уточнювати, які інтервали часу входять в корисний час системи.

Зокрема, для системи з поповнюваним резервом часу t_d критерієм відмови є виконання умови $t_b > t_d$, де t_b – тривалість відновлення працездатності об'єкта. Час $T_0(t_p)$ – це напрацювання системи до моменту

першого виконання нерівності $t_b > t_d$.

При оцінці надійності системи ОЧ з непоповнюваним резервом часу у низці випадків зручніше користуватись іншими визначеннями ймовірності $P_{\text{бф}}$.

Ймовірність безвідмовного функціонування $P_{\text{бф}}$ (або ймовірність виконання завдання в оперативному інтервалі часу $[0, t]$) – це ймовірність того, що реальний час виконання завдання $T_{\text{вз}}(t_3)$ до отримання заданого напрацювання t_3 буде не більше $t = t_3 + t_p$, тобто

$$P_{\text{бф}} = P_2(t_3, t) = P\{T_{\text{вз}}(t_3) \leq t\}. \quad (2.2)$$

Під ймовірністю безвідмовного функціонування $P_{\text{бф}}$ системи ОЧ можна також розуміти ймовірність $P(t_3, t_p)$ перевищення тривалості завдання t_3 корисного напрацювання $T_{\text{к}}(t_p)$ системи в інтервалі оперативного часу $[0, t]$:

$$P_{\text{бф}} = P_3(t_3, t_p) = P\{T_{\text{к}}(t_3) \geq t_p\}. \quad (2.3)$$

Можна використовувати ще один вираз для ймовірності безвідмовного функціонування системи ОЧ. Оскільки $T_{\text{вз}}(t_3) = T_{\text{нп}}(t_3) + t_3$, тоді з урахуванням (2.2) можна записати

$$P_{\text{бф}} = P_4(t_3, t_p) = P\{T_{\text{нп}}(t_3) \leq t_p\}. \quad (2.4)$$

Формула (2.4) представляє собою функцію розподілу сумарного непродуктивного часу $T_{\text{нп}}(t_3)$ до напрацювання t_3 .

Слід зауважити, що всі наведені вище співвідношення для ймовірності безвідмовного функціонування системи ОЧ (формули (2.1) – (2.4)) є еквівалентними. Вибір найбільш доцільного з них визначається вихідними умовами задачі, яка розв'язується.

Використовуючи формулу (2.1) можна отримати вираз для розрахунку ймовірності невиконання завдання (зриву функціонування) системи ОЧ:

$$Q_1(t, t_d, t_p) = 1 - P_1(t, t_d, t_p) = P\{T_0(t_p) \leq t\}. \quad (2.5)$$

Отримані вище формули для ймовірності безвідмовного функціонування $P_{\text{бф}}$ можуть бути використані для визначення і інших показників надійності функціонування систем з часовим резервуванням.

Показники надійності системи ОЧ, які характеризують інтенсивність відмов $\Lambda(t_3, t_p)$, середнє напрацювання до відмови $\bar{T}_0(t_p)$ і середній час виконання завдання $\bar{T}_{\text{вз}}(t_3)$, визначається співвідношеннями [143]:

$$\Lambda(t_3, t_d, t_p) = \frac{\partial Q_1(t_3, t_d, t_p)}{\partial t_3} / P_1(t_3, t_d, t_p), \quad (2.6)$$

$$\bar{T}_0(t_p) = \int_0^{\infty} x d_x Q_1(t, t_d, t_p) = \int_0^{\infty} P_1(t, t_d, t_p) dx, \quad (2.7)$$

$$\bar{T}_{\text{вз}}(t_3) = \int_0^{\infty} y d_y P_2(t_3, y) = \int_0^{\infty} Q_2(t_3, y) dy = t_3 + \bar{T}_{\text{нп}}(t_3), \quad (2.8)$$

де

$$\bar{T}_{\text{нп}}(t_3) = \int_0^{\infty} y d_y P_4(t_3, y) = \int_0^{\infty} Q_4(t_3, y) dy, \quad (2.9)$$

$$Q_1(t_3, t_d, t_p) = 1 - P_1(t_3, t_d, t_p).$$

При визначенні всіх наведених вище показників передбачалося, що початковий момент часу (момент надходження завдання) співпадає з переходом об'єкта в працездатний (або непрацездатний) стани. Розглянемо тепер випадок, коли завдання поступають в деякий заздалегідь відомий або довільно вибраний момент часу τ . При цьому основним показником надійності резервованих систем є комплексні показники: коефіцієнт оперативної готовності $P_{\text{ог}}(t_3, t_p, \tau)$ і коефіцієнт готовності $K_{\text{г}}(t_p, \tau)$.

Якщо момент часу τ обирається довільно на стаціонарній ділянці функціонуванні системи (при $\tau \rightarrow \infty$), то для простих об'єктів, які можуть знаходитися тільки в двох станах: працездатному ($i=0$) і непрацездатному ($i=1$), формула для $P_{\text{ог}}(t_3, t_p)$ може бути представлена в наступному виді:

$$P_{\text{ог}}(t_3, t_p) = k_{\text{г}} P^{(0)}(t_3, t_p) + (1 - k_{\text{г}}) P^{(1)}(t_3, t_p), \quad (2.10)$$

де $k_r = \bar{t}_h / (\bar{t}_h + \bar{t}_b)$ – коефіцієнт готовності об'єкта; \bar{t}_h, \bar{t}_b – відповідно середнє напруцювання до відмови і середній час відновлення працездатності.

Коефіцієнт готовності системи $K_r(t_p)$ повинен включати в себе два доданки: ймовірність того, що в момент надходження завдання (розглядається стаціонарна ділянка функціонування) об'єкт працездатний і ймовірність того, що заявка на виконання завдання застане об'єкт непрацездатним, але відновлення його працездатності закінчується до закінчення резерву часу. Цей показник в загальному випадку записується наступним чином:

$$K_r(t_p) = k_r + (1 - k_r) P\{t_b \leq t_b^*(t_p)\}, \quad (2.11)$$

де t_b – інтервал часу від моменту надходження завдання до моменту закінчення відновлення працездатності об'єкта; $t_b^*(t_p)$ – деяке порогово допустиме значення t_b , що визначається використовуваним в системі резервом часу. Другий доданок перетворюється в нуль, якщо резерв часу відсутній.

2.2. Постановка задачі дослідження та обґрунтування методу її розв'язання

2.2.1. Модель функціонування системи з комбінованим резервом часу та постановка задачі.

Аналіз, проведений у розд. 1, показав, що в об'єктах ЕКО можуть виникати відмови та збоїв як технічних, так і програмних засобів, обумовлених помилками програмного забезпечення. У відповідності з ДСТУ [144], під збоєм будемо розуміти самоусуваючу відмову або одноразову відмову, що усувається незначним втручанням оператора.

Зокрема, прикладом можуть бути збої програмного забезпечення, одні з

яких не потребує перезавантаження ЕОМ і мають тривалість, що не перевищує поповнюваний резерв часу t_d , при цьому об'єкт не припиняє нормальне функціонування. Інші збої вимагають перезавантаження програмних засобів за участі оператора і для відновлення працездатності програмного забезпечення витрачається час, що перевищує допустиме значення t_d . У цьому випадку в момент витрачання поповнюваного резерву часу t_d виникає відмова об'єкта і закінчується його функціонування.

У подальшому викладенні збої та відмови будемо називати стійкими відмовами (або просто відмовами), якщо після закінчення поповнюваного резерву часу t_d на відновлення працездатності об'єкта витрачається деякий час.

Особливістю функціонування об'єктів з комбінованим резервом часу є те, що в них передбачені одночасно обмеження на час кожного ремонту об'єкта, а також на сумарний час простою в ремонті (при знецінюючих відмовах – і на повторення всієї або частини попереднього навантаження) до виконання завдання. Хоча в цій системі ОЧ резерв часу є єдиним, зручно при аналізі надійності вважати, що він складається з двох складових: поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p .

Умови функціонування такої системи ОЧ при досягненні критичного значення часу відновлення t_v об'єкта, тобто коли воно стає рівним однієї зі складових резерву часу, визначається взаємодією поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових комбінованого резерву.

Розглянемо більш детально вказану вище взаємодію при функціонуванні об'єктів ЕКО. При цьому будемо користуватись рис. 2.2, який пояснює функціонування системи ОЧ з незнецінюючими відмовами, де через τ_i , і Q_i , $i \geq 1$, позначені інтервали, які чередуються, відповідно безвідмовної роботи і тривалості відновлення об'єкта [145].

Як було встановлено вище, відмови та збої об'єкта (рис. 2.2, а) проходять

перевірку на виконання встановлених часових обмежень (рис. 2.2, б) у два етапи. На першому етапі перевіряється умова $t_b > t_d$, при виконанні якої подальша поведінка системи визначається обраним варіантом взаємодії поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових комбінованого резерву часу в залежності від призначення системи.

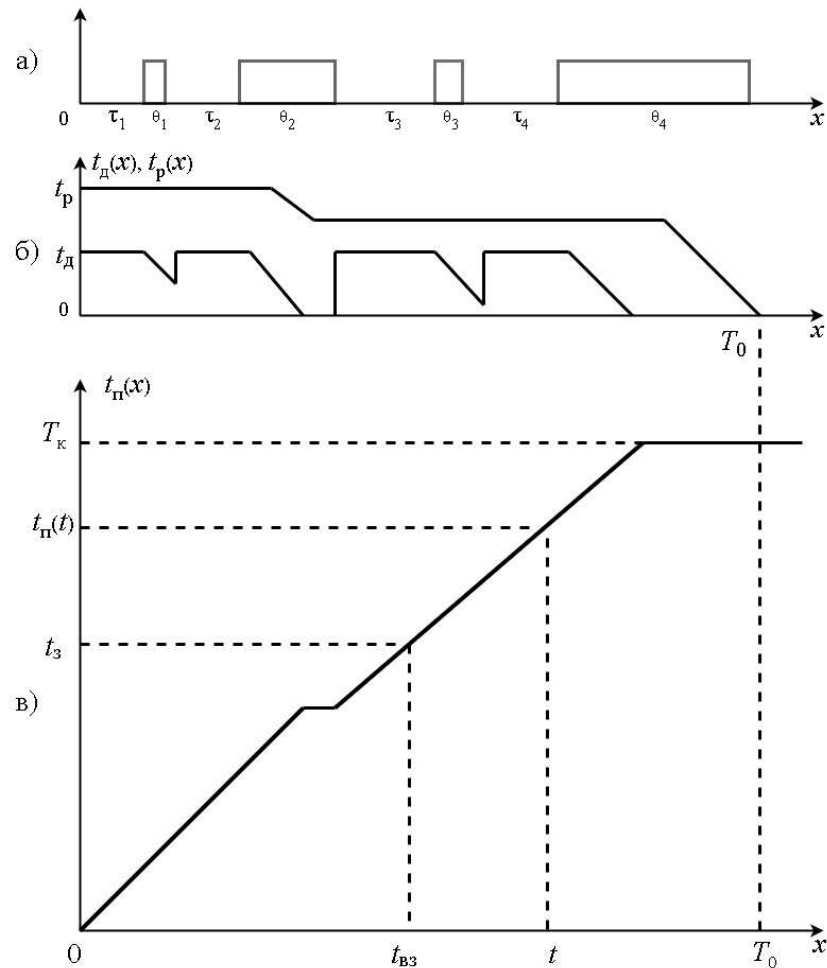


Рисунок 2.2 – Діаграма роботи системи з комбінованим резервом часу до першого зриву функціонування: α – потік незнецінюючих відмов і відновлення об'єкта; δ – зміна резерву часу; β – накопичення корисного часу; T_0 – напруження системи ОЧ до першої відмови

В одних системах умова функціонування такі, що при $t_b > t_d$ інтервал часу відновлення об'єкта, неперевисуючий допустиме значення t_d , відноситься до корисного часу $T_k(t_p)$, при цьому інтервал часу $t_b - t_d$

включається в сумарний непродуктивний час $T_{\text{нп}}(t_3)$ (перший варіант взаємодії (рис. 2.2, в)). В інших системах при виконанні умови $t_b > t_d$ в сумарний непродуктивний час $T_{\text{нп}}(t_3)$ включається весь час відновлення t_b , а до корисного часу відноситься лише відрізки $\xi = \min(t_b, t_d)$ (другий варіант взаємодії).

Слід відмітити, що в реальних об'єктах, в яких використовуються комбінований резерв часу, можливі і інші варіанти взаємодії [146] поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових. Аналіз особливостей функціонування ЕКО ЕКМ, проведений у розд. 1, дозволяє зробити висновок, що для дослідження в даній дисертаційній роботі доцільно обрати перший варіант взаємодії (рис. 2.2), оскільки об'єкти ЕКО містять два різних джерела резерву часу. По-перше, це – функціональна інерційність, яка допускає незначні перерви в роботі на допустимий час t_d , а при виконанні умови $t_b \leq t_d$ система ОЧ продовжує нормально функціонувати, не реагуючи на такі відмови або збої об'єкта. По-друге, непоповнюваний резерв t_p (друга складова комбінованого резерву часу) може створюватися за рахунок збільшення часу, що виділяється об'єкту для виконання завдання тривалістю t_3 і називається оперативним часом $t = t_3 + t_p$.

На другому етапі перевірки прийнятих часових обмежень після виконання умови $t_b > t_d$ відбувається зменшення непоповнюваної складової резерву часу t_p на величину $t_b - t_d$ (система з незнецінюючими відмовами, рис. 2.2, б) і перевіряється умова $T_{\text{нп}}(t_3) < t_p$, де $T_{\text{нп}}(t_3)$ – сумарний непродуктивний час.

Виконання цієї умови свідчить про те, що непоповнюваний резерв часу t_p не витрачено повністю і при цьому система продовжує нормально функціонувати. В протилежному випадку (тобто при $T_{\text{нп}}(t_3) > t_p$) виникає відмова системи з комбінованим резервом часу в момент $t_p = 0$ (рис. 2.2, б).

Завдання виявляється виконаним в момент, коли сумарний корисний час $T_k(t_p)$ досягає величини t_3 раніше, ніж буде витрачена непоповнювана складова t_p резервного часу (t_d, t_p) (рис. 2.2, в).

Розглянемо далі функціонування системи на другому етапі перевірки часових обмежень $(T_{\text{нп}}(t_3) > t_p)$ у випадку виникнення знецінюючих відмов. У такій системі будь-яка відмова об'єкта знецінює всю пророблену роботу і тому непоповнювана складова t_p комбінованого резерву часу витрачається не тільки на відновлення працездатності, але і на повторення знецінюючих робіт. Завдання є виконаним, якщо протягом часу t_3 система працює безвідмовно (рис. 2.3, а).

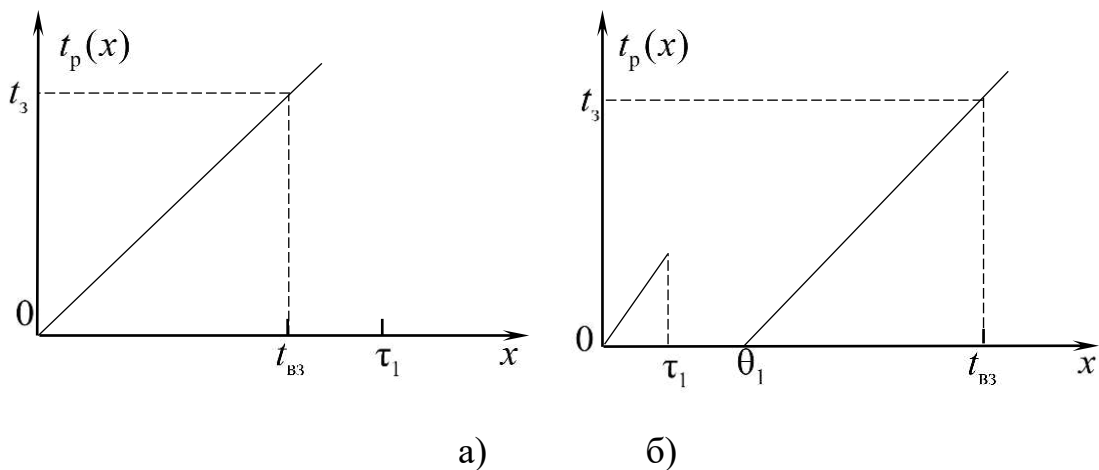


Рисунок 2.3 – Діаграма роботи системи на другому етапі перевірки часових обмежень у випадку знецінюючої відмови об'єкта:

- а – виконання завдання при відсутності відмов;
- б – виконання завдання при відмові об'єкта θ_1 x t_3 t_p

Якщо ж перше порушення працездатності виникне в момент $\tau_1 < t_3$, то вся пророблена робота знецінюється, час τ_1 зараховується в непродуктивний час $T_{\text{нп}}(t_3)$ і після відновлення працездатності за час $\theta_1 = t_3 - \tau_1$ об'єкт знову приступає до виконання завдання (рис. 2.3, б).

Завдання може бути виконане в термін тільки у тому випадку, якщо сума

$T_{\text{нп}}(t_3) = \tau_1 + \theta_1$ виявиться менше непоповнюваного резервного часу t_p і система пропрацює безвідмовно після відновлення працездатності об'єкта протягом часу t_3 . При цьому час відновлення завдання буде дорівнювати $T_{\text{вз}}(t_3) = \tau_1 + \theta + t_3$ і включає в себе корисний час $T_{\text{к}}(t_p) = \min(t_{\text{в}}, t_{\text{д}})$ і непродуктивні витрати $T_{\text{нп}}(t_3) = \tau_1 + \theta_1$. Відмова системи з знецінюючими відмовами виникає при виконанні умови $T_{\text{нп}}(t_3) > t_p$ в момент витрачення непоповнюваної складової t_p комбінованого резерву часу.

Сформулюємо вихідні передумови, обмеження та допущення, при яких будемо вирішувати задачу побудови моделей оцінки надійності об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу, функціонування яких здійснюється у відповідності з розглянутою вище 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 $t_3 = \text{const}$. Позначимо через $F_i(t) = P\{t_{0i} < t\}$ і $F_{\text{в}i}(t) = P\{t_{\text{в}i} < t\}$ – функції розподілу відповідно напрацювання об'єкта до відмови t_{0i} і часу відновлення $t_{\text{в}i}$, $i \geq 1$. 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 $t_{\text{в}i}$ при відмовах i -го типу ($i \geq 1$) – взаємо незалежні 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_d, t_p) з заданими значеннями поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових резерву. Взаємодія цих складових t_d і t_p здійснюється у відповідності з наведеною вище моделлю функціонування об'єкта при незнецінюючих і знецінюючих відмовах. Відмова (зрив функціонування) розглядаємої системи ОЧ виникає при виконанні умови $T_{нп}(t_3) > t_p$ в момент витрачення непоповнюваної складової резерву часу $t_p = 0$ (тут $T_{нп}(t_3)$ – 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_b не залежить від кількості відмов в минулому і розподіляється за законом $F_b(t)$ [147].

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

В розд. 1 наведено постановку даної задачі в формалізованому виді.

2.2.2. Обґрунтування методу розв'язання задачі та алгоритму його практичної реалізації. Аналіз відомих робіт в даній предметній галузі показує,

що для розв'язання задач оцінки надійності системи з часовою надлишковістю найчастіше використовують методи напівмарківських або багатомірних марківських процесів, а також інтегральний і диференціальний методи [148, 149]. 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-Стільтьєса. Однак при такому підході при виконанні зворотнього перетворення з метою отримання оригіналів точних формул для показників надійності зустрічаються серйозні труднощі.

В цих умовах доцільно вводити деякі спрощуючі умови для отримання наближених формул, прийнятних для використання в інженерній практиці. Саме цей шлях ми обираємо для обґрунтування найбільш ефективного методу вирішення сформульованої задачі. Покажемо, що на першому етапі перевірки часових обмежень (рис. 2.2., б) при використанні поповнюваної складової t_d комбінованого резерву часу і виконанні деяких умов 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_d отримана точна формула для ймовірності безвідмовного функціонування $P(t, t_d)$ при експоненціальному розподілу напрацювання до відмови $F(t)$ з параметром λ і часом відновлення $F_v(t)$ з параметром μ [150], 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 $F_b(t)$ за умови $\bar{t}_b \ll \bar{t}_0$, яка, як правило, виконується в сучасних відновлюваних об'єктах. При цьому можна знехтувати відрізками часу $t_b < t_d$ і отримати для ймовірності $P(t, t_d)$ наближену формулу. Покажемо це.

$$\text{Позначимо через } P\{A_n\} = P\left\{\sum_{i=1}^n t_{hi} < t, t_{bi} < t_d, \dots, t_{b(n-1)} < t_d, t_{bn} < t_d\right\}, t > t_d,$$

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_d (тобто $t_{bi} < t_d$, $i = \overline{1, n-1}$); n -й ремонт виявився тривалим ($t_{bn} < t_d$), тобто після закінчення часу t_d після його початку n -а відмова об'єкта перейшла у відмову системи. Використовуючи формулу повної ймовірності, запишемо:

$$\begin{aligned} P(t, t_d) &= 1 - \sum_{n=1}^{\infty} P\{A_n\} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} P\left\{\sum_{i=1}^n t_{hi} < t; t_{bj} < t_d, (j = \overline{1, n-1}); t_{bn} < t_d\right\} = \\ &= 1 - \sum_{n=1}^{\infty} P\left\{t_{bj} < t_d, (j = \overline{1, n-1}); t_{bn} > t_d\right\} \times \\ &\times P\left\{\sum_{i=1}^n t_{hi} < t / t_{bj} < t_d, (j = \overline{1, n-1}); t_{bn} > t_d\right\} = \\ &= 1 - q \sum_{n=0}^{\infty} (1-q)^n F_{n+1}(t), t > t_d, \end{aligned} \quad (2.12)$$

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

$$q = P\{t_b > t_d\} = 1 - F_b(t_d). \quad (2.13)$$

Для деяких розподілів $F(t)$ можна виписати формули для згортки $F_{n+1}(t)$, що входить в (2.12), в явному виді. Зокрема, для експоненціального

розподілу $F(t)$ з параметром $\lambda = 1/\bar{t}_0$ маємо

$$F_{n+1}(t) = 1 - \sum_{i=0}^n \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}, \quad (2.14)$$

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

$$F_{n+1}(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - (n+1)\bar{t}_0}{\sigma_0\sqrt{n+1}}\right), \quad (2.15)$$

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

$$F_{n+1}(t) = 1 - \sum_{i=0}^{(n+1)k-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}. \quad (2.16)$$

Підставляючи вирази (2.14) – (2.16) в (2.12), отримуємо розрахункові співвідношення для ймовірності безвідмовного функціонування $P(t, t_d)$.

Зокрема, після підстановки (2.14) в (2.12) і ряду перетворень маємо

$$P(t, t_d) = \begin{cases} 1, & t \leq t_d, \\ \exp[-\lambda(t - t_d)(1 - F_b)], & t > t_d. \end{cases} \quad (2.17)$$

Вираз (2.17) співпадає з формулою в роботі [151] іншим шляхом.

Порівняння результатів розрахунку за точною [151] і наближеною (2.17) формулам показує, що похибка отриманої наближеної формули цілком прийнятна для інженерної практики вже при порівняно невеликих значеннях відношення \bar{t}_b/\bar{t}_0 і швидко спадає з його зменшенням. Так, при $\bar{t}_b/\bar{t}_0 = 0,1$, і $t = 3t_d$ відносна помилка формули (2.17) складає 2,9 %, якщо $\mu t_d = 1$, і 6,5 %, якщо $\mu t_d = 3$, а при $\bar{t}_b/\bar{t}_0 = 0,05$ вона дорівнює 0,55 % і 1,4 % відповідно для $\mu t_d = 1$ і $\mu t_d = 3$. При цьому формула (2.17) володіє хорошою точністю не тільки при великих значеннях λt , але і при λt , сумірних з λt_d .

Відмітимо, що якщо час t малий у порівнянні з напрацюванням системи ОЧ до відмову, то ряди в точній формулі роботи [151] і у формулі (2.12) достатньо швидко збігаються. При великих значеннях t розрахунки за допомогою цих формул стають громіздкими і трудомісткими. У цих умовах

доцільно користуватися наближеними (асимптотичними), але більш простими виразами. Наведемо один з таких виразів для поширеного в інженерній практиці випадку $\bar{t}_B \ll \bar{t}_0$ і довільних розподілів $F(t)$ та $F_B(t)$ випадкових величин t_0 і t_B . Неважко побачити, що процес функціонування об'єкта з поповнюваним резервом часу t_d добре описується моделлю регенеруючого процесу [141, 142], якщо знехтувати часом відновлення працездатності об'єкту (оскільки $\bar{t}_B \ll \bar{t}_0$) і рідкісна подія A на кожному періоді регенерації (у нашому випадку t_0) розглядати як виконання нерівності $t_B > t_d$. Позначимо через α наступний вираз:

$$\alpha = \frac{Mt_0^2}{\bar{t}^2} q = \left[\int_0^\infty x^2 dF(x) \right] \left[\int_0^\infty x dF(x) \right]^{-2} q,$$

де q – ймовірність здійснення події A при кожній відмові і наступному ремонті об'єкта (формула (2.13)). Тоді при сформульованих вище умовах справедлива наступна асимптотична формула:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} P \left\{ \frac{qT_0(t_d)}{\bar{t}_0} > x \right\} = e^{-x},$$

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

$$P(t, t_d) \approx \begin{cases} 1, & t \leq t_d, \\ \exp \left[-\frac{q(t - t_d)}{\bar{t}_0} \right], & t \geq t_d. \end{cases} \quad (2.18)$$

який справедливий при довільних законах розподілу $F(t)$ напрацювання об'єкта до відмови t_0 і $F_B(t)$ часу відновлення t_B . При експоненціальному розподілі $F(t)$ з параметром $\lambda = 1/\bar{t}_0$ формули (2.18) і (2.17) співпадають.

Оцінімо значення малого параметра (ймовірність q), при яких відносна похибка наближених (асимптотичних) формул (2.18) не перевищує заданих

величин. В якості точних використовуємо вираз (2.12) при нормальному розподілі $F(t)$ і $\bar{t}_b/\bar{t}_0 \geq 0,01$ (при цьому точність даного виразу достатньо висока). З рис. 2.4 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 $t \geq 0,5\bar{t}_0/q$.

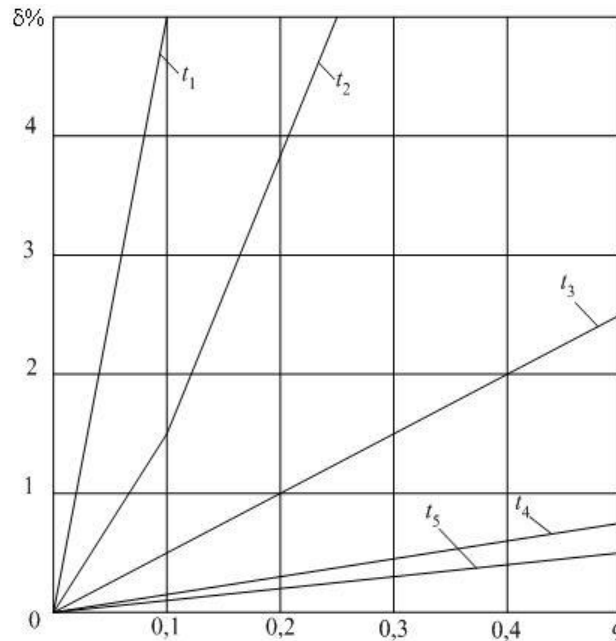


Рисунок 2.4 – Залежність відносної похибки наближеної формули для

$Q(t, t_d) = 1 - P(t, t_d)$ від величини малого параметру q та інтервалу

оперативного часу t : $t_1 - 0,25\bar{t}_0/q$; $t_2 - 0,5\bar{t}_0/q$; $t_3 - \bar{t}_0/q$;

$t_4 - 2\bar{t}_0/q$; $t_5 - 4\bar{t}_0/q$

Таким чином, після першого етапу перевірки часових обмежень і при виконанні деяких умов (при $\bar{t}_b \ll \bar{t}_0$ і ймовірності відмови об'єкта з поповнюваним резервом часу $q = 1 - F_b(t_d) < 0,2$) розподіл напрацювання об'єкта до відмови вельми близько до експоненціального розподілу з параметром λq (формули (2.17), (2.18)). Використовуючи цей результат, можна далі звести розв'язання сформульованої в п. 2.2.1 загальної 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 $F_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i q_i t)$ і $F_{bi}(t) = P\{t_{bi} \leq t\}$ ($i \geq 1$) – функція розподілу відповідно напрацювання об'єкта до відмови i -го типу і часу відновлення працездатності ($q_i = 1 - F_i(t_d)$). Очевидно, що напрацювання об'єкта до будь-якої відмови – випадкова величина з функцією розподілу

$$F_0(t) = P\{t_0 \leq t\} = 1 - \prod_{i \geq 1} [1 - F_i(t)] = 1 - \exp\left(-\sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i t\right). \quad (2.19)$$

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 $t_{\text{вз}}$ 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 $[0, t_{\text{вз}}]$ з підпроцесом $\zeta^*(t)$, але в момент $t_{\text{вз}}$ не обривається, а продовжує еволюціонувати за тим же законом, що і до моменту $t_{\text{вз}}$ (рис. 2.5, а).

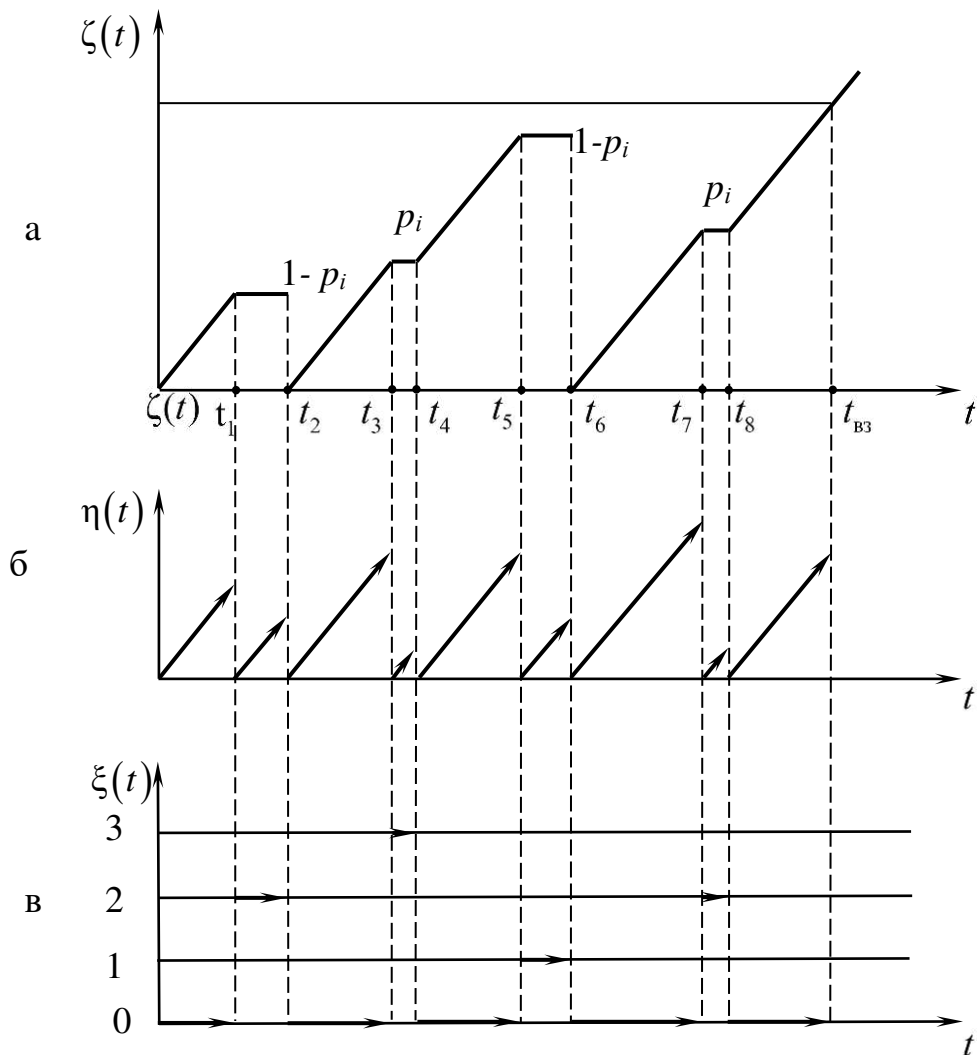


Рисунок 2.5 – Графічне зображення тривимірного випадкового процесу

$$X(t) = \{\zeta(t), \eta(t), \xi(t)\}$$

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

$$\eta(t) = t - \sup\{t_n : n \geq 0, t_n \leq t\},$$

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

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. 2.5, б, в).

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 $F_i(y)$, $F_{bi}(y)$, $i \geq 1$) мають вид:

$$\left. \begin{aligned} P\{(x, y, 0) \xrightarrow{\Delta t} (x + \Delta t, y + \Delta t, 0)\} &= \frac{1 - F_0(y + \Delta t)}{1 - F_0(y)}, \\ P\{(x, y, 0) \xrightarrow{\Delta t} (x + 0(\Delta t), 0(\Delta t), i)\} &= \frac{F_i(y + \Delta t) - F_i(y)}{1 - F_i(y)} + 0(\Delta t), \\ P\{(x, y, i) \xrightarrow{\Delta t} (x + 0(\Delta t), 0(\Delta t), 0)\} &= p_i \frac{F_{bi}(y + \Delta t) - F_{bi}(y)}{1 - F_{bi}(y)} + 0(\Delta t), \\ P\{(x, y, i) \xrightarrow{\Delta t} (0(\Delta t), 0(\Delta t), 0)\} &= (1 - p_i) \frac{F_{bi}(y + \Delta t) - F_{bi}(y)}{1 - F_{bi}(y)} + 0(\Delta t), \\ P\{(x, y, i) \xrightarrow{\Delta t} (x, y + \Delta t, i)\} &= \frac{1 - F_{bi}(y + \Delta t)}{1 - F_{bi}(y)}, i \geq 1, \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

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 (2.20) 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

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

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, розглянута в п. 2.2 модель функціонування системи з комбінованим резервом часу (t_d, t_p) дозволила вибрати найбільш підходящий варіант взаємодії поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових з урахуванням наявності в об'єктах електронного комунікаційного обладнання різних джерел часової надлишковості, а також сформулювати загальну постановку задачі дисертаційного дослідження та обґрунтувати удосконалений метод її розв'язання.

Сутність удосконалення, визначаюча 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_d 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_d і t_p резервного часу, що забезпечує синтез окремих результатів дослідження цих моделей та отримання загального розв'язання сформульованого наукового завдання.

Реалізація запропонованого методу дозволяє спростити отримання наукових результатів дисертаційного дослідження – нових розрахункових формул для основних показників надійності системи з комбінованим резервом часу і дає можливість сумісно враховувати різні типи відмов та збоїв технічних і програмних засобів електронного комунікаційного обладнання 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_d 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_d при виконанні часового обмеження $t_b > t_d$ 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 $q_i = 1 - F_{bi}(t_d)$; 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 $\lambda_i^* = \lambda_i (1 - F_{bi}(t_d))$, $i \geq 1$, і $t_3^* = t_3 - t_d$;

4. Оцінка відносної похибки наближених формул.

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

2.3. Моделі оцінювання надійності об'єктів з різними типами відмов і комбінованим резервом часу

2.3.1. Розрахункові формули для показників надійності систем з часовим резервуванням. Скористаємося розглянутою в п.п. 2.2.2 моделлю тривимірного марківського процесу, що описує функціонування об'єкта з непоповнюваним резервом часу, для отримання розрахункових співвідношень для показників надійності функціонування системи з урахуванням поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових комбінованого резерву часу та різних типів відмов об'єкта (реалізація другого етапу розв'язання задачі). У тому ж розділі було показано, що після виконання першого етапу розв'язання (в результаті дослідження моделі надійності з поповнюваним резервом часу t_d) для напрацювання об'єкта до i -ї відмови на другому етапі розв'язання можна прийняти експоненціальний закон розподілу з параметром λ_i^* , $i \geq 1$, і необхідно зменшити мінімальний час виконання завдання t_3 на величину t_d , оскільки інтервал часу відновлення об'єкта, не перевищуючий допустиме значення t_d , відноситься до корисного часу і не зменшує непоповнювану складову резервного часу (рис. 2.2), тобто:

$$\begin{aligned} \lambda_i^* &= \lambda_i q_i = \lambda_i \left[1 - F_{\text{вн}}(t_d) \right], \quad i \geq 1, \\ t_3^* &= t_3 - t_d. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Введемо декілька позначень, необхідних в подальшому. Нехай є ряд невід'ємних чисел $C_i \geq 0$, таких що $\sum_i C_i = 1$ ($i \geq 1$) і послідовність випадкових величин Θ_i з функціями розподілу $A_i(t)$ ($i \geq 1$). Тоді під

де

$$\tilde{F}_{Bi}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dF_{Bi}(t), \quad (2.26)$$

$$R(s) = s + \lambda - \sum_{i \geq 1} p_i \lambda_i^* \tilde{F}_{Bi}(s), \quad (2.27)$$

$$W(s) = \sum_{i \geq 1} (1 - p_i) \lambda_i^* \tilde{F}_{Bi}(s). \quad (2.28)$$

Застосовуючи метод варіації сталих і враховуючи, що $\phi(s, t_3) \equiv 1$, з (2.25) одержуємо співвідношення

$$\phi(s, x) = \exp[R(s)(x - t_3^*)] + \phi(s) \left[1 - \exp(R(s)(x - t_3^*)) \right] \frac{W(s)}{R(s)},$$

з якого, вважаючи $x = 0$ і $\phi(s, 0) = \phi(s)$, знаходимо

$$\phi(s) = \exp[-t_3^* R(s)] \left\{ 1 - \frac{W(s)}{R(s)} \left[1 - \exp(-t_3^* R(s)) \right] \right\}^{-1}. \quad (2.29)$$

Використовуючи співвідношення

$$\bar{T}_{B3}(t_3, t_d) = \phi'(s) \Big|_{s=0}, \quad DT_{B3}(t_3) = \phi''(s) \Big|_{s=0} - \bar{T}_{B3}^2(t_3, t_d), \quad (2.30)$$

і вираз (2.29), можна отримати формули для математичного очікування $\bar{T}_{B3}(t_3, t_d)$ і дисперсії $DT_{B3}(t_3)$ після підстановки в них замість t_3^* значення $t_3 - t_d$.

$$\bar{T}_{B3}(t_3, t_d) = \frac{1}{a_i} \left(1 + \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i \bar{t}_{Bi} \right) \left(e^{a_i(t_3 - t_d)} - 1 \right), \quad (2.31)$$

де

$$a_i = \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i - \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i p_i, \quad 0 \leq p_i \leq 1. \quad (2.32)$$

В окремому випадку при $i = 1$ і $p_1 = p$, $\lambda_1 = \lambda$, $q_1 = q$ одержуємо вираз

$$\bar{T}_{B3}(t_3, t_d) = \frac{1}{\lambda q (1 - p)} \left(1 + \lambda q \bar{t}_B \right) \left(e^{\lambda q (t_3 - t_d) (1 - p)} - 1 \right), \quad 0 \leq p \leq 1. \quad (2.33)$$

Якщо в об'єкті виникають тільки незнецінюючі відмови, то при $p = 1$ формула (2.33) перетворюється до виду:

$$\bar{T}_{B3}(t_3, t_d) = (t_3 - t_d) (1 + \lambda q \bar{t}_B), \quad (2.34)$$

а, у випадку знецінюючих відмовах при $p = 0$ вона приймає вид:

$$\bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d) = \left(\frac{1}{\lambda q} + \bar{t}_B \right) \left(e^{\lambda q(t_3 - t_d)} - 1 \right), \quad (2.35)$$

Відмітимо, що окремі формули (2.34) і (2.35) при $t_d = 0$ співпадають з відповідними виразами для середнього часу виконання завдання, отриманими в роботі [151] іншим методом.

Отримання точної розрахункової формули для ймовірності безвідмовного функціонування системи з комбінованим резервом часу за допомогою зворотного перетворення формули (2.29) зустрічає серйозні труднощі [152 – 153]. Однак можна отримати достатньо зручну наближену формулу, якщо допустити, що середній час відновлення об'єкта \bar{t}_B настільки малий у порівнянні з мінімальним часом виконання завдання t_3 , що ним можна практично знехтувати ($\bar{t}_B \ll t_3$ – випадок «швидкого» відновлення). Така ситуація має місце в багатьох практичних випадках (наприклад, в системах, які містять велике число резервних елементів, що швидко підключаються замість основних, які відмовили). В цьому випадку, покладаючи у (2.29) $\tilde{F}_{\text{вн}}(s) \equiv 1$ ($i \geq 1$), одержуємо

$$\phi(s) = \frac{(s + a) \exp[-t_3^*(s + a)]}{s + a \exp[-t_3^*(s + a)]}. \quad (2.36)$$

Розкладаючи (2.36) в ряд за степенями експоненти і визначаючи вирахування у полюсі $s = 0$, після деяких перетворень отримаємо наближену формулу для ймовірності безвідмовного функціонування системи з комбінованим резервом часу (t_d, t_p) і різними типами відмов об'єкта:

$$\begin{cases} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_3 \rceil} (-1)^j e^{-(j+1)a_i t_3^*} \frac{a_i (t_p - j t_3^*)^j}{j!} \left(1 + \frac{a_i (t_p - j t_3^*)}{j+1} \right), & 0 \leq p_i < 1, \\ P(t_3, t_d, t_p) = 1, & t_i = 1, \quad i \geq 1, \end{cases} \quad (2.37)$$

де $t_3^* = t_3 - t_d$; a_i – формула (2.31); запис $\lceil t_p/t_3 \rceil$ означає операцію округлення окремого t_p/t_3 до цілого (меншого) числа.

Розглянемо далі випадок, коли в об'єкті виникають відмови лише одного типу, тобто:

$$F_0(t) = F_1(t) = F(t) = 1 - \exp(-\lambda q t), \quad F_{B1}(t) = F_B(t) = P\{t_B \leq t\},$$

$$p_1 = p \text{ і } q = 1 - F_B(t_d).$$

У цьому випадку $a = \lambda q(1 - p)$ і з формули (2.37) визначаємо

$$\left\{ \begin{aligned} P(t_3, t_d, t_p) &= \sum_{j=0}^{\lfloor t_p/t_3 \rfloor} (-1)^j e^{-(j+1)(1-p)\lambda q t_3^*} \frac{[\lambda q(1-p)(t_p - j t_3^*)]^j}{j!} \times \\ &\times \left(1 + \frac{(1-p)\lambda q(t_p - j t_3^*)}{j+1} \right), \quad 0 \leq p_i < 1, \quad t_3^* = t_3 - t_d, \\ P(t_3, t_d, t_p) &= 1, \quad p = 1. \end{aligned} \right. \quad (2.38)$$

Підставимо у формулу (2.38) $t_3^* = t_3 - t_d$ і введемо позначення $\rho = (1-p)\lambda q(t_3 - t_d)$ і $\gamma = (1-p)\lambda q t_p$. Після нескладних перетворень цей вираз зводиться до більш простого вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} P(t_3, t_d, t_p) &= \sum_{j=0}^{\lfloor t_p/(t_3 - t_d) \rfloor} (-1)^j e^{-(j+1)\rho} \frac{(\gamma - j\rho)^j}{j!} \left(1 + \frac{\gamma - j\rho}{j+1} \right), \quad 0 \leq p_i < 1, \\ P(t_3, t_d, t_p) &= 1, \quad p = 1. \end{aligned} \right. \quad (2.39)$$

В окремому випадку формула (2.39) при $p = 0$, $q = 1$ і $t_d = 0$ збігається з формулою (3.2.21) роботи [151], отриманій іншим методом для системи з непоповнюваним резервом часу з знецінюючими відмовами об'єкта.

Використовуючи наведені вище формули для ймовірності безвідмовного функціонування системи з комбінованим резервом часу і вираз (2.6), можна отримати розрахункові співвідношення для інтенсивності відмов системи $\Lambda(t_3, t_d, t_p)$.

Зокрема, при відмовах об'єкта одного типу (формула (2.39)) при $0 \leq p < 1$ визначаємо

$$\Lambda(t_3, t_d, t_p) = \frac{\partial P(t_3, t_d, t_p)}{\partial t_3} = \lambda q(1-p) \frac{\left[(1+\gamma)e^{-\rho} + \sum_{j=0}^{\lfloor t_p/(t_3-t_d) \rfloor} (-1)^j \frac{(\gamma-j\rho)^{j-1}}{(j-1)!} e^{-(j+1)\rho} \times \right.}{P(t_3, t_d, t_p)} \times \left. \left(\left(2 + \frac{1}{j} \right) (\gamma-j\rho) + j + \frac{(\gamma-j\rho)^2}{j} \right) \right], \quad (2.40)$$

де $\rho = \lambda q(1-p)(t_3 - t_d)$; $\gamma = \lambda q(1-p)t_p$; $q = 1 - F_b(t_d)$; $0 \leq p < 1$.

З формули (2.39) виходить, що при $p = 1$ отримуємо

$$\Lambda(t_3, t_d, t_p) = 0. \quad (2.41)$$

2.3.2. Оцінювання відносної похибки наближених формул. При отриманні розрахункової формули для ймовірності $P(t_3, t_d, t_p)$ (п.п. 2.3.1) було прийнято допущення про те, що $\bar{t}_b = 0$, оскільки в багатьох реальних системах, як правило, виконується умова $\bar{t}_b \ll t_3$. Тому похибка цієї формули залежить від співвідношення між середнім часом відновлення об'єкта \bar{t}_b і мінімальним часом виконання завдання t_3 і низки інших факторів: ймовірності збереження попередніх результатів p , величини непоповнюваного резерву часу t_p та інтенсивності відмов об'єкта λ .

Для проведення кількісного оцінювання відносної похибки перетворимо наближену формулу (2.39) при $p = 0$, $q = 1$, $t_d = 0$ і приведемо її до виду:

$$\begin{cases} P(\rho, \gamma) = \sum_{j=0}^{\lfloor t_p/t_3 \rfloor} (-1)^j e^{-(j+1)\rho} \frac{(\gamma + j\rho)^j}{j!} \left(1 + \frac{\gamma + j\rho}{j+1} \right), & p = 0, \\ P(\rho, \gamma) = 1, & p = 1. \end{cases} \quad (2.42)$$

де $\rho = \lambda t_3$, $\gamma = \lambda t_p$.

Відносну похибку будемо оцінювати за формулою:

$$\delta = \frac{|P_T(t_3, t) - P_{\text{нб}}(t_3, t)|}{P_T(t_3, t)} 100 \%, \quad (2.43)$$

де $P_T(t_3, t)$ і $P_{нб}(t_3, t)$ – відповідно точна і наближена розрахункові формули.

В якості точних скористуємося відомими формулами отриманими в [154] для системи з непоповнюваним резервом часу:

а) при знецінюючих відмовах ($p = 0$)

$$P(t_3, t_p) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_3 \rceil - 1} [B_j(t_p - jt_3) - B_{j+1}(t_p - jt_3)] e^{-(j+1)\rho}, \quad (2.44)$$

де

$$B_0 = 1; \quad B_j(x) = \binom{2j-1}{j} (uv)^j + \sum_{k=0}^{j-1} \frac{(j+k-1)! u^j v^k (\lambda x)^{j-k-1}}{j! k! (j-k-1)!} \times \\ \times \left(\frac{j(-1)^{j-k} \lambda x}{j-k} - (j+k) v e^{-(\lambda+\mu)x} \right), \quad j \geq 1; \quad (2.45)$$

$$u = 1 - v = \frac{\mu}{\lambda + \mu};$$

б) при незнецінюючих відмовах ($p = 1$)

$$P(\rho, \gamma) = e^{-\rho} \left[1 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\rho^j}{j!} I(k, \gamma) \right], \quad \rho = \lambda t_3, \quad (2.46)$$

$$I(k, \gamma) = 1 - \sum_{k=0}^{j-1} \frac{\gamma^k}{k!} e^{-\gamma}; \quad (2.47)$$

де

$$\gamma = \mu t_p.$$

На рис. 2.6 показані області можливих значень відносної похибки δ отримані при $\lambda t_3 = 0,1$ і різних значеннях \bar{t}_b/t_3 і t_p/t_3 . З рисунка 2.6 видно, що для прийнятих вихідних даних похибка δ формул (2.41) і (2.42) менше 10% навіть при відносно великому часі відновлення $\bar{t}_b/t_3 \leq 2$.

Аналогічні розрахунки для випадку $\lambda t_3 = 0,05$ дають при тих же вихідних умовах значення похибки $\delta \leq 5\%$. Для випадку $\lambda t_3 = 0,05$ похибка $\delta < 10\%$ забезпечується при $\bar{t}_b/t_3 \leq 0,2$, а при $\lambda t_3 = 1$ – при $\bar{t}_b/t_3 < 0,1$.

Отже, наближені формули (2.37) – (2.39), отримані для оцінювання ймовірності безвідмовного функціонування системи з комбінованим резервом

часу мають цілком прийнятну для інженерних розрахунків похибку ($\delta < 10\%$, а в ряді випадків – менше декількох відсотків) в широкому діапазоні зміни вихідних умов.

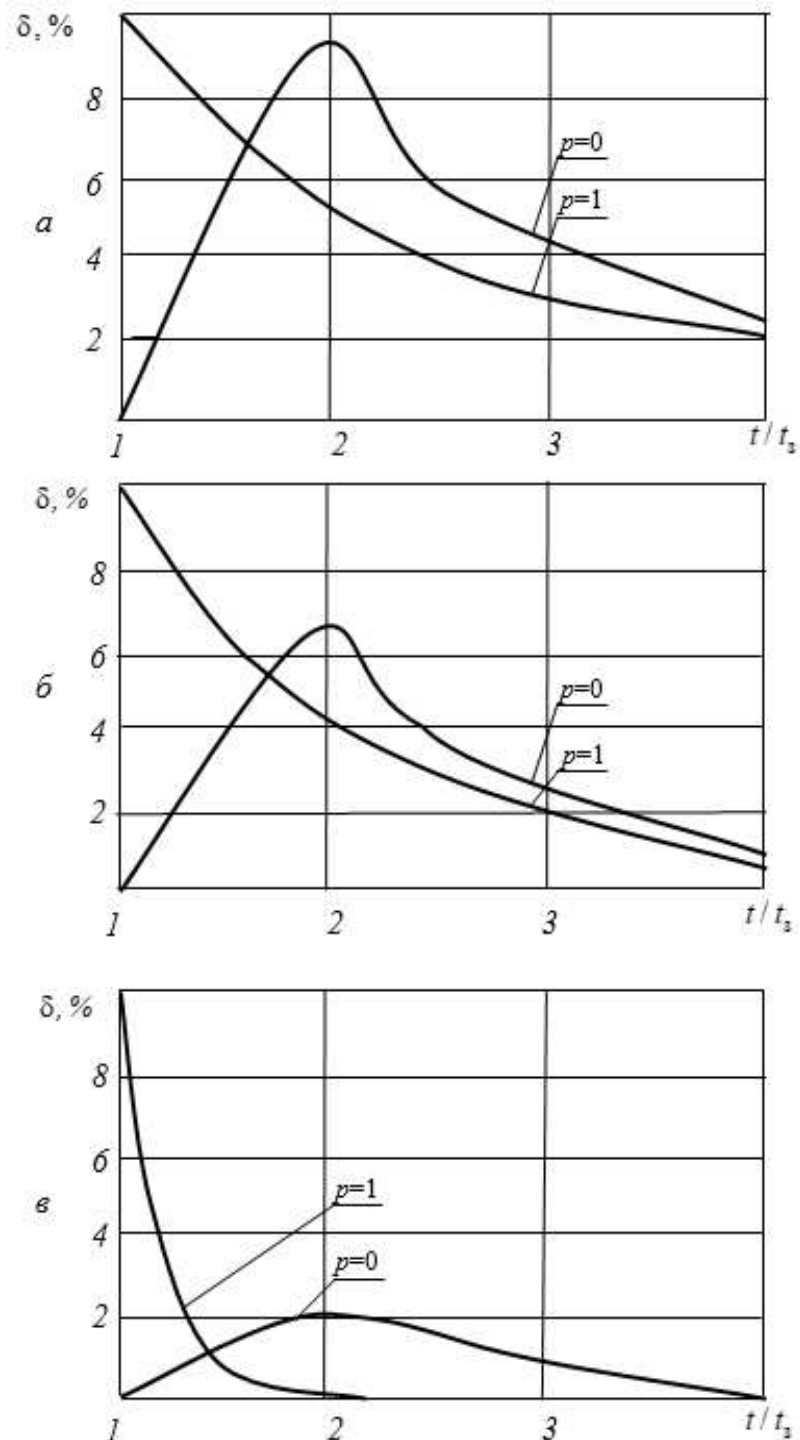


Рисунок 2.6 – Залежності відносної похибки формули (2.42) від величини резерву часу і ймовірності p збереження попередніх результатів:

$$\text{а} - \bar{t}_B/t_3 = 2; \text{б} - \bar{t}_B/t_3 = 1; \text{в} - \bar{t}_B/t_3 = 0,2$$

Для оцінювання відносної похибки δ наближеної формули для інтенсивності відмов $\Lambda_{\text{нб}}(t_3, t_p)$ системи ОЧ з непоповнюваним резервом часу (формула (2.40) при $p = 0$, $q = 1$, $t_d = 0$) скористуємося точною формулою при знецінюючих відмовах ($p = 0$) [155]:

$$\Lambda_{\text{т}}(t_3, t_p) = \frac{a(t_3, t_p)}{P(t_3, t_p)}, \quad (2.48)$$

де $P(t_3, t_p)$ виражається формулами (2.44), (2.45);

$$a(t_3, t_p) = \begin{cases} \lambda[1 - B_1(t_p)]e^{-\lambda t_3} = \lambda P(t_3, t_p), & t_p < t_3, \\ \lambda P(t_3, t_p) + e^{-2\lambda t_3} \left[\lambda B_1(t_p - t_3) - \lambda B_2(t_p - t_3) + \right. \\ \left. + B'_1(t_p - t_3) - B'_2(t_p - t_3) \right], & t_3 \leq t_p \leq 2t_3. \end{cases} \quad (2.49)$$

$$\text{Тут } B'_1(t) = -\lambda u(1 - e^{-x}), \quad B'_2(t) = \lambda^2 u^2 v(x - 2 + (2 + x)e^{-x}), \quad x = (\lambda + \mu)t. \quad (2.50)$$

Розрахунки показали, що відносна похибка наближеної формули для інтенсивності відмов $\Lambda_{\text{нб}}(t_3, t_p)$ (формула (2.40) при $\rho = \lambda t_3$; $\gamma = \lambda t_p$; $p = 0$, $q = 1$) як і у випадку ймовірності $P(\rho, \gamma)$ (формула (2.41)), не перевищує 10% навіть при відносно великому середньому часі відновлення $\bar{t}_b/t_3 \leq 0,2$. Отже, наближена розрахункова формула для інтенсивності відмов $\Lambda(t_3, t_d, t_p)$ системи з комбінованим резервом часу цілком придатна для використання в інженерній практиці при проведенні орієнтовних розрахунків.

У випадку незнецінюючих відмов ($p = 1$) в [156] отримані точні формули для $P(t_3, t_d, t_p)$ і $\Lambda(t_3, t_d, t_p)$ системи з комбінованим резервом часу при $F_b(t) = 1 - \exp(-\mu t)$:

$$P(t_3, t_d, t_p) = \begin{cases} 1, & t_3 \leq t_d, \\ e^{-\rho} \left[1 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\rho^j}{j!} \left(1 - \sum_{k=0}^{j-1} \frac{\gamma^k}{k!} e^{-\gamma} \right) \right], & t_3 > t_d, \end{cases} \quad (2.51)$$

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

$$\Lambda(t_3, t_d, t_p) = \frac{\frac{\partial P(t_3, t_d, t_p)}{\partial t_3}}{P(t_3, t_d, t_p)} = \lambda \exp[-\mu(t_d + t_p) - \rho] \frac{I_0(2\sqrt{\rho\gamma})}{P(t_3, t_d, t_p)}, \quad (2.52)$$

де $I_0(2\sqrt{\rho\gamma})$ – модифікована функція Бесселя нульового порядку [151].

Таким чином, отримаємо розрахункові формули для показників надійності систем ОЧ з комбінованим резервом часу з урахуванням i типів ($i \geq 1$) відмов об'єкта, причому кожна відмова може з ймовірністю i незнецінювати і з ймовірністю p знецінювати попереднє напрацювання: точні формули (2.31) – (2.35) – для середнього часу виконання завдання $\bar{T}_{вз}(t_3, t_d)$ і наближені формули (2.37) – (2.40) – для ймовірності безвідмовного функціонування $P(t_3, t_d, t_p)$ та інтенсивності відмов $\Lambda(t_3, t_d, t_p)$ системи ОЧ. Аналіз відносної похибки наближених формул дозволив зробити висновок, що вони мають допустиму точність для інженерних розрахунків (відносна похибка менше 10%, а в багатьох випадках не перевищує декількох процентів) і можуть бути використані в інженерній практиці.

2.4. Моделі оцінювання надійності об'єктів з комбінованим резервом часу при розбитті виконуваного завдання на етапи

Відмінною особливістю розглянутих в цьому розділі систем є те, що виконання завдання загальною тривалістю t_3 (в ідеальних умовах) розбивається на декілька послідовно реалізуючих етапів. Як було зазначено вище, таке розбиття представляє собою один з можливих методів зменшення наслідків відмов об'єкта. Мінімальний час виконання завдання на кожному

етапі може бути різним. Розглянемо випадок, коли завдання розбивається на n ($n \geq 1$) етапів з однаковим мінімальним часом виконання $\Delta = t_3/n$, і будемо вважати, що таке розбиття не потребує витрат додаткового часу або витрати настільки малі, що ними можна практично знехтувати. Визначимо показники надійності таких систем при різних припущеннях відносно зберігання попереднього напрацювання після відмови об'єкта та проаналізуємо вплив цього методу організації виконання завдання на ефективність часового резервування.

2.4.1. Повне або часткове збереження попереднього напрацювання. Нехай в об'єкті виникають відмови i типів ($i \geq 1$), причому напрацювання між відмовами i -го типу розподілено за експоненціальним законом з параметром λ_i^* (формула (2.21)), так що сумарний потік відмов дорівнює $\lambda^* = \sum_{i \geq 1} \lambda_i^*$. При виникненні відмов на j -м етапі ($j = \overline{1, n}$) виконання завдання затримується на час відновлення працездатності об'єкта, а потім з ймовірністю p_i ($0 \leq p_i \leq 1$) продовжується з урахуванням роботи, що була виконана до моменту останньої відмови, або з ймовірністю $(1 - p_i)$ починається з початку j -го етапу (при цьому час, витрачений на виконання завдання на j -м етапі до моменту виникнення відмови, з ймовірністю $(1 - p_i)$ втрачається).

Нехай контроль працездатності об'єкта ідеальний, а час відновлення працездатності об'єкта – випадкова величина t_{bi} з функцією розподілу $F_{bi}(t)$ і кінцевим математичним очікуванням \bar{t}_{bi} , $i \geq 1$. Як і раніше будемо вважати, що ремонт повністю відновлює вихідні властивості об'єкта, а після його закінчення зразу ж відновлюється виконання завдання.

Для сформульованих вище умов загальний час виконання всього завдання $t_{вз}$ представляє собою суму відрізків часу $t_{взj}$ ($j = \overline{1, n}$), що витрачається на виконання кожного з n етапів. Завдання буде виконано, якщо

всі етапи будуть завершені до закінчення інтервалу оперативного часу. При експоненціальному розподілі напрацювання об'єкта між відмовами через відсутність післядії випадкової величини $t_{взj} (j = \overline{1, n})$ виявляються взаємно незалежними та однаково розподіленими. Це дозволяє скористатися результатами попереднього розділу (п. 2.3).

Нехай випадкова величина $t_{взj}$ має функцію розподілу $P_1(t_3^*/n, t) = P\{t_{взj} < t\}, (j = \overline{1, n})$. Тоді перетворення Лапласа-Стільтьєса $\phi_1(s)$ цієї функції розподілу виражається формулами (2.29), (2.36), якщо замінити в них t_3^* на t_3^*/n . Розподіл суми n незалежних та однаково розподілених випадкових величин виходить як n – стисла згортка розподілу $P_1(t_3^*/n, t)$. Враховуючи це і використовуючи вирази (2.29) і (2.36), запишемо формули для перетворення Лапласа-Стільтьєса $\phi(s, n)$ функції $P(t_3^*, t, n)$ в наступному виді:

$$\phi(s, n) = [\phi_1(s, n)]^n = \exp[-t_3^* R(s)] \left\{ 1 - \frac{W(s)}{R(s)} [1 - \exp(-t_3^* R(s)/n)] \right\}^{-n}, \quad (2.53)$$

$$\phi(s, n) = [\phi_1(s)]^n = \frac{(s + a)^n \exp[-t_3^*(s + a)]}{\{s + a \exp[-t_3^*(s + a)/n]\}^n}. \quad (2.54)$$

Неважко побачити, що для математичного очікування часу виконання завдання залишається справедлива формула (2.33), якщо замінити в ній $t_3 - t_d$ на $(t_3 - t_d)/n$ і помножити всі вирази на число етапів n , тобто

$$\bar{T}_{вз}(t_3, t_d, n) = \frac{n}{\lambda q(1-p)} (1 + \lambda q \bar{t}_b) [\exp(\lambda q t_3^*(1-p)/n) - 1], \quad 0 \leq p \leq 1. \quad (2.55)$$

Розкладаючи (2.54) в ряд за степенями експоненти і виконуючи зворотне перетворення, знаходимо формулу для ймовірності безвідмовного функціонування системи при багатоетапному виконанні завдання:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t_3, t_d, t_p, n) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_3 \rceil} (-1)^j \binom{n+j-1}{j} \exp[a_i t_3^* (1+j/n)] \times \\ \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{[a_i (t_p - j t_3^*/n)]^{k+j}}{(k+j)!}, \quad 0 \leq p_i < 1, \quad (2.56) \\ P(t_3, t_d, t_p, n) = 1, \quad p_i = 1, \quad t_3^* = t_3 - t_d, \quad i \geq 1, \end{array} \right.$$

де, як і раніш, a_i – див. формулу (2.32). Якщо покласти у (2.56) $p = 0$, то можна прийти до формули (3.3.5) роботи [151] при $\bar{t}_b = 0$.

Оскільки при $n=1$ формули (2.56) і (2.37) співпадають, то і похибки їх при цьому будуть однакові. Зі збільшенням кількості етапів n похибка формули (2.56) помітно зменшиться. Так, для прийнятих на рис. 2.7 вихідних умовах ($i=1$; $p=0$; $\lambda t_3 = 0,1$; $\bar{t}_b/t_3 = 1$) відносна похибка δ зменшиться в 2–2,5 рази при збільшенні n з 1 до 6. Отже, формула (2.56) цілком придатна для інженерних розрахунків і при $n > 1$ володіє меншою похибкою, ніж вираз (2.37) (рис. 2.7).

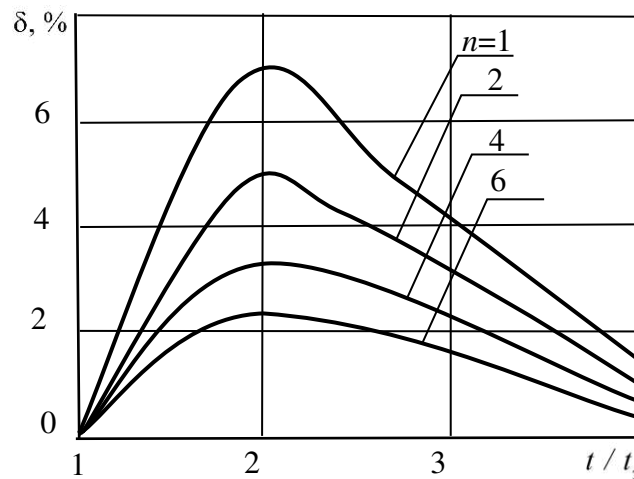


Рисунок 2.7 – Залежності відносної похибки формули (2.56) від величини резерву часу і числа етапів виконання завдання ($\lambda q t_3 = 0,1$; $\bar{t}_b/t_3 = 1$; $p = 0$)

Формули (2.55) і (2.56) не враховують того, що при організації багатоетапного виконання завдання через ускладнення алгоритмів функціонування може витратитись додатковий час, який збільшує

мінімальний час виконання завдання та скорочує реальний резерв часу. Однак в більшості випадків цей додатковий час легко врахувати, змінивши розрахункову формулу.

Якщо додатковий час t_k – величина постійна для кожного етапу і не залежить від t_3 і n , то при збільшенні числа етапів n нарівні зі скороченням знецінюючого напрацювання збільшується тривалість завдання на величину nt_k . Тому можна визначити оптимальне розбиття завдання на етапи та знайти оптимальну тривалість одного етапу.

Розглянемо розв’язання цієї задачі при $p = 0$. Щоб знайти оптимальне число етапів n_0 , замінимо у формулі (2.55) t_3^* на $t_3^* + nt_k$, продиференціюємо $\bar{T}_{вз}(t_3, t_d, n)$ за параметром n і прирівняємо похідну нулю:

$$\frac{\partial \bar{T}_{вз}(t_3, t_d, n)}{\partial n} = \frac{1}{\lambda q(1-p)} (1 + \lambda q \bar{t}_b) \left[\exp \left(\lambda q \frac{(t_3 - t_d)}{n} + t_k \right) \left(1 - \frac{\lambda q(t_3 - t_d)}{n} \right) - 1 \right] = 0. \quad (2.57)$$

Це трансцендентне рівняння не вдається вирішити точно аналітично. Однак при $\lambda q(t_3 - t_d)/n < 1$ можна отримати наближений розв’язок. Для цього

розкладемо (2.57) за степенями показника експоненти $\frac{\lambda q(t_3 - t_d)}{n}$ та відкинемо

члени порядку малості $\left(\frac{\lambda q(t_3 - t_d)}{n} \right)^3$ і вище. Отримане при цьому квадратне

рівняння має розв’язок

$$n_0 = \frac{\lambda q(t_3 - t_d)}{\sqrt{2[\exp(\lambda q t_k) - 1]}} \approx \frac{\lambda q(t_3 - t_d)}{\sqrt{2\lambda q t_k}}. \quad (2.58)$$

Оптимальна тривалість етапу

$$\tau_0 = (t_3 - t_d)/n_0 = \sqrt{2t_k/\lambda q} = \sqrt{2(e^{\lambda q t_k} - 1)/\lambda q}. \quad (2.59)$$

Середній час виконання завдання при оптимальному розбитті

$$\bar{T}_{вз}(t_3, t_d, n_0) = \frac{n_0}{\lambda q} (1 + \lambda q \bar{t}_b) (e^{\lambda q \tau_0} - 1) = \lambda q(t_3 - t_d) (1 + \lambda q \bar{t}_b) f(t_k), \quad (2.60)$$

де

$$f(t_k) = \frac{e^{\sqrt{2(\exp(\lambda q t_k))}} - 1}{\sqrt{2(\exp(\lambda q t_k) - 1)}}. \quad (2.61)$$

Якщо для кожного t_3 обирати оптимальну тривалість етапу, то середній час зростає не експоненціально з ростом t_3 , відповідно (2.55), а лінійно. При $f(t_k) > \exp(\lambda q t_3)$ виконується нерівність $\bar{T}_{вз}(t_3, t_d, n) < \bar{T}_{вз}(t_3, t_d, 1)$, тобто розбиття на етапи бажано. При $f(t_k) < \exp(\lambda q t_3)$ розбиття на етапи зменшує середній час виконання завдання лише при $t_3 > \tilde{t}_3$, де \tilde{t}_3 – корінь рівняння $\exp(\lambda q t_3) - 1 = \lambda q t_3 f(t_k)$.

2.4.2. Повне або часткове знецінювання попереднього напрацювання. В багатьох технічних системах виконання завдання організується таким чином, що після відмови об'єкта відбувається повне або часткове знецінювання попередніх результатів. Визначимо показники надійності таких систем при тих же вихідних передумовах, що і в попередній задачі, але будемо вважати, що після закінчення відновлення працездатності об'єкта (відмова i -го типу ($i \geq 1$) виникає на j -му етапі) виконання завдання продовжується з ймовірністю p_i з початку j -го етапу ($j = \overline{1, n}$) або з ймовірністю $(1 - p_i)$ – з самого початку ($0 \leq p_i \leq 1$).

Позначимо через t_{2k-1} і t_{2k} ($k \geq 1$) моменти відповідно відмови та закінчення відновлення працездатності об'єкта, і нехай $t_0 = 0$ є початковим моментом розгляду процесу. Поставимо у відповідності процесу функціонування системи випадковий процес $\zeta(t)$, який визначимо наступним чином (рис. 2.8). Процес $\zeta(t)$ лінійно зростає на відрізках часу $[t_{2k-2}, t_{2k-1})$, постійний в інтервалах $[t_{2k-1}, t_{2k}]$, а в моменти t_{2k} ($k \geq 1$) може з ймовірністю p_i робити стрибки до найближчого рівня jt_3/n ($j = \overline{0, n-1}$) або з ймовірністю $(1 - p_i)$ – до нульового рівня ($i \geq 1$). Процес $\zeta(t)$ будемо вважати без

обмеження спільності неперервним праворуч та вважати, що $\zeta(0) = 0$ з ймовірністю одиниця.

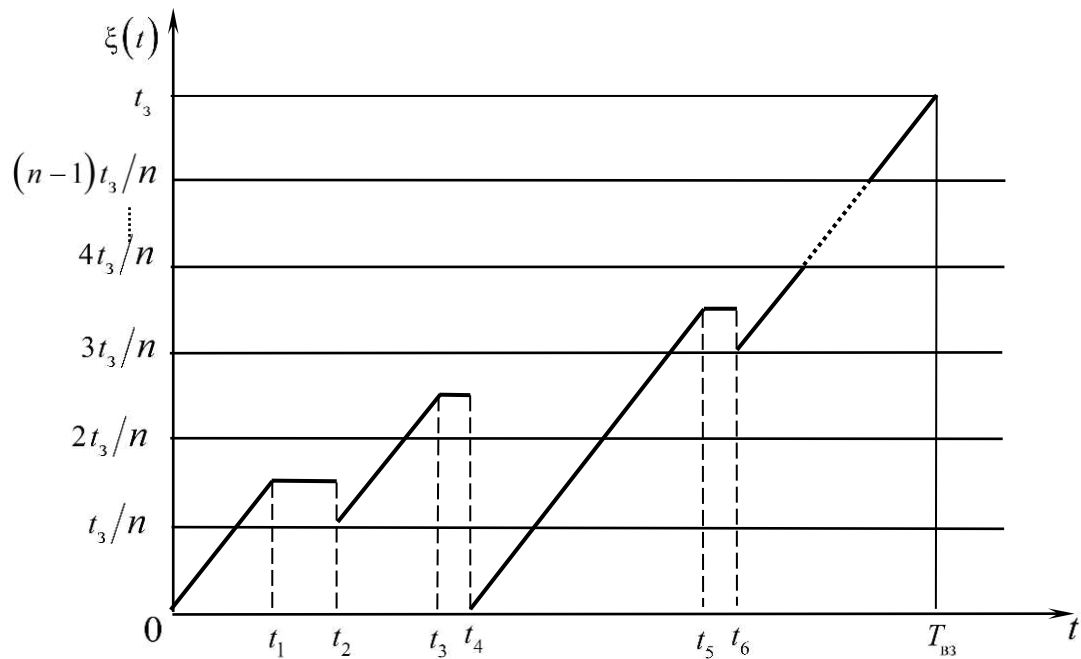


Рисунок 2.8 – Графічне зображення випадкового процесу $\zeta(t)$

Зазначимо, що $\zeta(t)$ не є марківським процесом, однак його можливо звести до марківського шляхом розширення фазового простору. Введемо «марківську добавку» $\eta(t)$ наступним чином: $\eta(t) = x$, якщо останнє відновлення працездатності об'єкта почалось в момент $t - x$, тобто

$$\eta(t) = t - \sup\{t_{2k-1} : k \geq 1, t_{2k-1} \leq t\}.$$

Тоді двомірний процес $X(t) = \{\zeta(t), \eta(t)\}$ буде представляти собою неперервний праворуч однорідний марківський процес. Зафіксуємо рівень t_3 та знайдемо математичне очікування та дисперсію випадкової величини $T_{вз}(n)$ – часу першого досягнення процесом $X(t)$ заданого рівня t_3 за умови, що $X(0) = \{0, 0\}$.

Використовуючи (2.22), (2.23) і формулу повної ймовірності, запишемо для випадкової величини $T_{вз}(n)$ наступне стохастичне співвідношення:

$$T_{B_3}(n) = \begin{cases} t_3 & \text{з ймовірністю } e^{-\lambda t_3}, \\ T_{B_3}^*(n-j) & \text{з ймовірністю } p_i \lambda_i e^{-\lambda z}, \\ T_{B_3}^*(n) & \text{з ймовірністю } (1-p_i) \lambda_i e^{-\lambda z}, \end{cases} \quad (2.62)$$

де

$$\begin{aligned} T_{B_3}^*(n-j) &\in (z + t_{Bi} + T_{B_3}(n-j), z + dz + t_{Bi} + T_{B_3}(n-j)), \\ T_{B_3}^*(n) &\in (z + t_{Bi} + T_{B_3}(n), z + dz + t_{Bi} + T_{B_3}(n)), \\ jt_3/n &< z \leq (j+1)t_3/n, \quad j = \overline{0, n-1}, \end{aligned}$$

а $T_{B_3}(n-j)$ – час до моменту досягнення процесом $X(t)$ заданого рівня t_3 з рівня jt_3/n , $j = \overline{0, n-1}$.

Нехай $\phi_n(s) = M \exp[-sT_{B_3}(n)]$ і $\phi_{n-j}(s) = M \exp[-sT_{B_3}(n-j)]$ – перетворення Лапласа-Стільтьєса функції розподілу відповідних випадкових величин $T_{B_3}(n)$ і $T_{B_3}(n-j)$.

Переходячи в (2.62) до перетворення Лапласа-Стільтьєса, після низки перетворень знаходимо $\phi_n(s)$ наступне рекурентне співвідношення:

$$\phi_n(s) = \frac{e^{-t_3(\lambda+s)} B(s) \left(1 - e^{-t_3(\lambda+s)/n}\right) \sum_{j=1}^{n-1} \phi_{n-j}(s) e^{-jt_3(\lambda+s)/n}}{1 - c(s) \left(1 - e^{-t_3(\lambda+s)/n}\right) - b(s) \left(1 - e^{-t_3(\lambda+s)/n}\right)}, \quad (2.63)$$

$$\text{де } b(s) = \sum_{i \geq 1} \lambda_i \tilde{F}_{Bi}(s) p_i / (\lambda + s), \quad c(s) = \sum_{i \geq 1} (1 - p_i) \lambda_i \tilde{F}_{Bi}(s) / (\lambda + s).$$

Послідовно обчислюючи за допомогою (2.63) значення $\phi_1(s)$, $\phi_2(s), \dots, \phi_j(s)$ впевнюємося у справедливості виразу

$$\frac{\phi_j(s)}{\phi_{j-1}(s)} = a_j = \frac{e^{-t_3(\lambda+s)/n} \left[1 - c(s) \left(1 - e^{-(j-1)t_3(\lambda+s)/n}\right)\right]}{1 - c(s) \left(1 - e^{-jt_3(\lambda+s)/n}\right) - b(s) \left(1 - e^{-t_3(\lambda+s)/n}\right)}, \quad (2.64)$$

Враховуючи, що $\phi_n(s) = a_n \phi_{n-1}(s)$; $\phi_{n-1}(s) = a_{n-1} \phi_{n-2}(s)$; \dots ; $\phi_1(s) = a_1 \phi_0(s)$, де $\phi_0(s) \equiv 1$, визначаємо

$$\phi_n(s) = a_n \phi_{n-1}(s) = a_n a_{n-1} \phi_{n-2}(s) = \dots = \prod_{j=1}^n a_j. \quad (2.65)$$

Підставляючи в (2.65) вирази (2.64), після перетворень остаточно отримуємо формулу для перетворення Лапласа-Стільтьєса функції розподілу часу виконання завдання:

$$\phi_n(s) = \exp \left\{ \begin{aligned} & -t_3(\lambda + s) + \sum_{j=0}^{n-1} \ln \left[1/c(s) - \left(1 - e^{-j t_3(\lambda + s)/n} \right) \right] - \\ & \sum_{j=1}^n \ln \left[1/c(s) - \left(1 - e^{-j t_3(\lambda + s)/n} \right) - \frac{b(s)}{c(s)} \left(1 - e^{-t_3(\lambda + s)/n} \right) \right] \end{aligned} \right\}. \quad (2.66)$$

Використовуючи формули (2.30) і (2.66) можна отримати вирази для математичного очікування $\bar{T}_{B3}(n)$ і дисперсії $DT_{B3}(n)$ часу виконання завдання. Зокрема, для $\bar{T}_{B3}(n)$ має місце формула:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{B3}(n) = & t_3 + \sum_{j=0}^{n-1} \frac{(j t_3/n) e^{-j \lambda t_3/n} - c^*}{1/c(0)(1 - e^{-j \lambda t_3/n})} + \\ & + \sum_{j=0}^n \frac{c^* - \frac{j t_3}{n} e^{-j \lambda t_3/n} - (1 - e^{-\lambda t_3/n}) [b^*/c(0) + c^* b(0)] - \frac{b(0) t_3}{c(0) n} e^{-\lambda t_3/n}}{1/c(0)(1 - e^{-j \lambda t_3/n}) - \frac{b(0)}{c(0)} (1 - e^{-\lambda t_3/n})}, \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$\text{де } c^* = \left[\sum_{i \geq 1} (1 - p_i) \lambda_i \right]^{-2} \left[\sum_{i \geq 1} (1 - p_i) \lambda_i + \lambda \sum_{i \geq 1} (1 - p_i) \lambda_i \bar{t}_{Bi} \right],$$

$$b^* = -\frac{1}{\lambda^2} \sum_{i \geq 1} p_i \lambda_i (1 + \lambda \bar{t}_{Bi}), \quad c(0) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i \geq 1} (1 - p_i) \lambda_i, \quad b(0) = -\frac{1}{\lambda} \sum_{i \geq 1} p_i \lambda_i.$$

Якщо в об'єкті виникають відмови одного типу ($i = 1$), то формула (2.67) помітно спрощується:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{B3}(n) = & t_3 + \sum_{j=0}^{n-1} \frac{(1-p) \frac{j t_3}{n} e^{-j \lambda \frac{t_3}{n}} - \frac{1}{\lambda} - \bar{t}_B}{p + (1-p) e^{-j \lambda t_3/n}} + \\ & + \sum_{j=0}^n \frac{\frac{1}{\lambda} + \bar{t}_B - (1-p) \frac{j t_3}{n} e^{-j \lambda \frac{t_3}{n}} - p \frac{t_3}{n} e^{-\lambda \frac{t_3}{n}}}{p e^{-\lambda \frac{t_3}{n}} + (1-p) e^{-j \lambda \frac{t_3}{n}}}. \end{aligned} \quad (2.68)$$

В окремому випадку при $p=1$ формула (2.68) зводиться до виразу (3.3.7) роботи [151].

За допомогою отриманих розрахункових співвідношень можна оцінити вплив кількості етапів n і ймовірності p_i збереження попередніх результатів на середнє відносне витрачення резерву часу

$$\delta_3 = \frac{\bar{T}_{вз}(n) - t_3}{t_3}.$$

Як видно з графіків рис. 2.9, побудованих для випадку $i=1$; $\lambda q t_3 = 1$; $\lambda q \bar{t}_b = 0,1$, суттєвого зниження величини δ_3 можна досягти при невеликих n лише в системах, в яких переважають незнецінюючі відмови ($p > 0,5$).

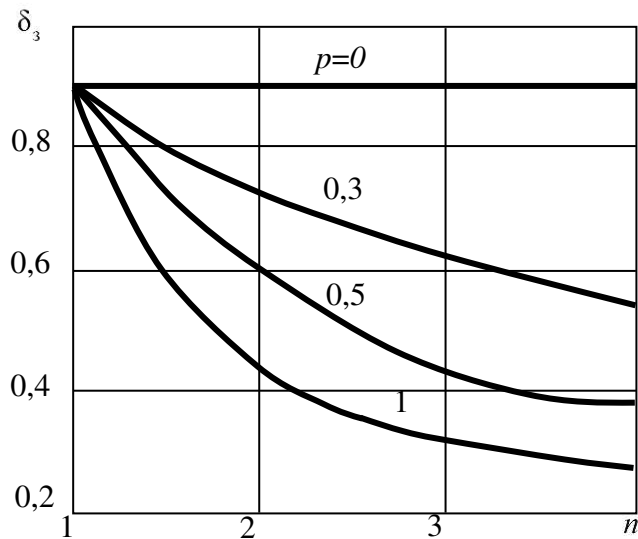


Рисунок 2.9 – Залежності середніх відносних втрат резерву часу від кількості етапів при різних значеннях ймовірності збереження попередніх результатів ($\lambda q \bar{t}_b = 0,1$; $\lambda q t_3 = 1$)

В системах з знецінюючими відмовами ($p=0$) розбиття завдання на етапи не призводить до зменшення величини δ_3 , оскільки при кожній відмові і відновленні працездатності об'єкта виконання завдання починається з самого початку. В таких системах необхідно передбачити спеціальні міри, направлені на зменшення частки знецінюючих відмов об'єкта в загальному їх потоці.

Висновки до розділу 2

1. Проведений аналіз показав, що ЕКО в процесі функціонування знаходиться під сумісним впливом низку факторів. Одні з цих факторів є «агресивними» і призводять до зниження надійності, зокрема, збої, що викликають короточасні перерви у функціонуванні, і стійкі відмови технічних та програмних засобів, які розрізняються за своїми наслідками (певні потребують тільки відновлення об'єктів, що відмовили, а інші – ще і повторення всього або частини попереднього напрацювання). Вплив інших факторів спрямовано на підтримку нормального функціонування системи на необхідному рівні, наприклад, використання комбінованого резерву часу, що містить поповнювану і непоповнювану складові, наявність яких в досліджуваній системі забезпечується двома різними джерелами часової надлишковості: функціональною інерціальною та запасом за швидкодією. Урахування цих факторів при комплексному оцінюванні надійності ЕКО не дозволяє скористатися відомим науково-методичним апаратом, заснованим на марківських та напівмарківських процесах з кінцевим числом станів, і потребує необхідності його удосконалення.

2. Для розв'язання сформульованого наукового завдання розроблено удосконалений метод побудови моделей оцінювання надійності об'єктів ЕКО з різними типами відмов і комбінованим резервом часу при повній вихідній інформації.

Сутність удосконалення, яка визначає наукову новизну методу і його відмінність від відомих методів, полягає в декомпозиції загальної математичної моделі функціонування системи з комбінованим резервом часу на дві взаємопов'язані окремі моделі. Перша – модель регенеруючого випадкового процесу для аналізу надійності функціонування об'єкта з

поповнюваною складовою t_d резерву часу, результат дослідження якої використовується у другій моделі – марківському процесі спеціального виду, що описує функціонування системи з непоповнюваною складовою t_p з урахуванням обраного варіанту взаємодії між складовими t_d і t_p резервного часу, що забезпечує синтез окремих результатів дослідження цих моделей та отримання загального розв’язання наукової задачі. Це дозволяє спростити процес розв’язання задачі та дає можливість побудувати сукупність моделей оцінювання надійності при сумісному урахуванні основних факторів, що впливають на функціонування досліджуваної моделі.

3. На підставі запропонованого методу отримана сукупність нових розрахункових формул для основних показників надійності системи з комбінованим резервом часу, наукова новизна яких визначається сумісним використанням поповнюваного та непоповнюваного резервів часу, комплексним урахуванням різних типів збоїв та стійких відмов технічних та програмних засобів ЕКО (незнецінюючих, частково або повністю знецінюючих попереднє напрацювання) та можливістю розбиття виконуваного завдання на етапи.

Ці наукові результати використані у розділі 4 для кількісного оцінювання впливу на надійність функціонування вказаних вище факторів з метою обґрунтування рекомендації щодо забезпечення нормального функціонування системи.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ДВОСТОРОННІХ ОЦІНОК
ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ З КОМБІНОВАНИМ РЕЗЕРВОМ
ЧАСУ ПРИ ОБМЕЖЕНІЙ ВИХІДНІЙ ІНФОРМАЦІЇ

Метою даного розділу є розробка удосконаленого методу побудови двосторонніх оцінок (нижніх та верхніх границь) показників надійності функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу при обмеженій вихідній інформації. Необхідність такого дослідження обумовлена тим, що прийняте в багатьох наукових роботах допущення про повну та достовірну вихідну інформацію не завжди відповідає дійсності. Частіше доводиться зіткнутись із ситуацією, коли функції розподілу вихідної інформації випадкових величин невідомі, а визначені лише деякі їх числові характеристики, наприклад, перші два початкових моменти. Така ситуація характерна, зокрема, для оцінювання надійності програмних засобів, оскільки методи для цього стали розроблюватися відносно недавно [157]. В таких випадках отримати точні значення показників надійності досліджуваної системи неможливо, а задача полягає в знаходженні двосторонніх оцінок (точних нижніх та верхніх границь) цих показників, коли невідомі функції розподілу вихідних випадкових величин належать деякій фіксованій множині розподілів. Саме для цього випадку в розділі сформульовано постановку науково-технічної задачі, для розв'язання якої запропоновано удосконалений метод.

Матеріал даного розділу опубліковано у статті [44].

3.1. Особливості розв'язання задач оцінки надійності в умовах апріорної невизначеності

3.1.1. Апріорна невизначеність та її види. Оцінка надійності складних технічних систем на етапах створення та експлуатації здійснюється, як правило, в умовах апріорної невизначеності вихідних даних. Під терміном «апріорна невизначеність» зазвичай розуміють відсутність або наявність неповної інформації про закони розподілу випадкових величин, які характеризують надійність окремих елементів, складових частин або системи в цілому, а також процес її функціонування. Неповнота інформації характеризується також можливою відсутністю відомостей про залежності елементів системи. Це типове явище, з яким стикаються практично на всіх етапах життєвого циклу складних технічних систем.

Наявність невизначеності (неповноти, недостовірності) вихідної інформації при розв'язанні задач оцінки надійності обумовлено тим, що в багатьох випадках не представляється можливим отримати достатньо великий об'єм вибірки випадкових величин, що характеризують безвідмовність, ремонтпридатність та процес функціонування досліджуваної системи, необхідний для оцінки узгодженості теоретичного та статистичного розподілів. Частіше вдається, наприклад, за результатами випробувань або за даними експлуатації достатньо точно визначити тільки оцінку математичного очікування 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.

Така ситуація може виникнути в ряді випадків:

1. Коли створюється (або експлуатується) нова (або унікальна) система, яка не має аналогів;

2. Коли існуючим методам контролю і діагностики не вдається виявити виникнення деяких відмов або передумов до їх виникнення;

3. Коли для оцінки надійності використовуються довідкові дані про характеристики використовуваних елементів, що не дають достатньої інформації про статистику реального процесу функціонування об'єктів.

Мабуть, перелік ситуацій, які призводять до апіорної невизначеності вихідних даних при оцінці надійності, можна було б продовжити. Зокрема, додатковими джерелами невизначеності є допущення, внесені методикою оцінки надійності, а також не завжди представляється можливим врахувати вплив технології при виготовленні системи або впливу досвіду та кваліфікації обслуговуючого персоналу при її експлуатації.

Таким чином, на етапах проектування, розробки та експлуатації технічних систем, як правило, недостатньо вихідної інформації для достовірної оцінки показників надійності об'єктів, так як є невизначеність, обумовлена перерахованими вище факторами. Ця важлива особливість визначає ті труднощі, які приходить долати при оцінці надійності для отримання результатів розрахунку, прийнятних для використання в інженерній практиці. З точки зору повноти апіорної інформації, використовуваної при оцінюванні надійності (повнота знання апіорного розподілу випадкової величини ξ , в якості якої можуть виступати напрацювання об'єкта між відмовами, час відновлення, тривалість збою програмного засобу і т. д.) можна виділити три основних види апіорної невизначеності [158, 159]:

1. Випадок повної апіорної визначеності, коли вихідна функція розподілу $F(x) = P\{\xi < x\}$ (або щільність розподілу $F'(x) = f(x)$) задані однозначно.

2. Випадок апіорної невизначеності, коли вихідна функція (або щільність) розподілу не задана, а відомі лише деякі числові характеристики випадкової величини ξ .

3. Випадок апіорної невизначеності, коли значення функції розподілу відомі лише в кінцевому числі точок.

Перший випадок інформативності про закон розподілу випадкової величини ξ бажаний, але досить рідкісний, так як вид функції розподілу $F(x)$ (а тим більше закон повністю) може бути відомий або з тривалого масового експерименту, або з математичних та загальних фізичних міркувань. При малій кількості експериментальних даних не буде достатніх підстав для визначення виду закону про розподіл, а тим паче для його повної фіксації.

У багатьох практичних завданнях, коли розподіл $F(x)$ невідомо, можна вважати заданими лише деякі статистичні характеристики випадкової величини ξ (другий випадок). Отже, можна говорити про клас (множину) функцій розподілу $F(x)$, які мають певні властивості. Наприклад, якщо за результатами випробувань чи експлуатації досить точно визначено оцінку s_1 математичного очікування випадкової величини ξ , то можна говорити про множину $K(s_1)$ всіх можливих розподілів позитивних випадкових величин із фіксованим математичним очікуванням

$$s_1 = \int_0^{\infty} x dF(x).$$

Істинна функція розподілу $F(x)$ у цьому випадку однозначно не визначається, а лише відомо, що вона належить цій множині, тобто $F(x) \in K(s_1)$.

Якщо за результатами випробувань визначаються оцінки двох початкових моментів s_1 і s_2 , де

$$s_2 = \int_0^{\infty} x^2 dF(x),$$

то знання другого моменту звужує безліч можливих варіантів для функції $F(x)$, тобто

$$K(s_1) > K(s_1, s_2),$$

де $K(s_1, s_2)$ – безліч функцій розподілу позитивних випадкових величин з фіксованим першим s_1 і другим s_2 моментами, але невизначеність залишається.

Функцію розподілу $F(x)$ також однозначно визначити не можна, а можна тільки стверджувати, що вона належить заданій множині: $F(x) \in K(s_1, s_2)$.

Третій вид апіорної невизначеності відноситься до випадку, коли точний вид функції розподілу $F(x)$ встановити за результатами випробувань не представляється можливим, а вдається лише визначити оцінки ймовірності безвідмовної роботи (або ймовірність відмови) об'єкта до моментів y_k ($k = 1, 2, \dots, n$) та довірчі інтервали для цих ймовірностей, тобто отримати емпіричну функцію розподілу випадкової величини $F(x)$. Отже, якщо після таких випробувань об'єкт надходить в експлуатацію, можна лише стверджувати, що функція розподілу $F(x)$ належить множині функцій розподілу, які у заданих точках $y = (y_0 = 0, y_1, y_2, \dots, y_n, y_{n+1} = \infty)$ приймають задані значення $p = (p_0 = 0, p_1, p_2, \dots, p_n, p_{n+1} = 1)$ [160].

3.1.2. Можливі підходи щодо оцінювання надійності об'єктів при обмеженій вихідній інформації. Аналіз показав, що можливі два основні підходи, які дозволяють уникнути завищеної або заниженої оцінки надійності при обмеженій (неповній) вихідній інформації.

В основі першого підходу лежать методи, що використовують сімейство параметричних розподілів і які базуються на тій або іншій інформації про закон розподілу $F(x)$. Всі відомі в теорії надійності параметричні розподіли визначаються завданням скінченного числа параметрів. Ці сімейства використовуються, як правило, для апроксимації невідомої функції розподілу $F(x)$.

При відсутності необхідної інформації для вибору й обґрунтування виду

закону розподілу $F(x)$ використовується другий підхід, заснований на непараметричних методах оцінювання надійності. Цей підхід займає усе більш помітне місце в задачах випробувань на надійність систем і їхніх елементів, що пояснюється вихідними умовами, що лежать в його основі. Вони дозволяють відмовитися від допущень щодо конкретного виду закону розподілу випадкових величин, значення яких підлягають обробці для наступного прийняття рішення.

При реалізації другого підходу є дві можливості:

а) припустити фізично виправданий напрямок динаміки розвитку системи («старіння», «омолодження») і віднести функцію розподілу $F(x)$ до деякого класу непараметричних розподілів, наприклад, до класу «старіючих» або до класу «молодіючих» розподілів;

б) не приймати взагалі будь-яких допущень щодо функції розподілу $F(x)$.

Прикладом реалізації першої можливості є введення й дослідження класу непараметричних розподілів $H(r, s)$, де r і s – будь-які числа, такі що $0 \leq r \leq s \leq \infty$ [161]. Клас розподілів $H(r, s)$ визначено наступним чином: у нього включаються ті й тільки ті розподіли $\bar{F}(t) = \exp(-\Lambda(t))$, для яких функція $\Lambda(t)/t^r$ є зростаючою, а функція $\Lambda(t)/t^s$ – спадаючою, де $\Lambda(t)$ – функція виробленого ресурсу на інтервалі часу $[0, t]$ [162]:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(x) dx.$$

Таким чином, клас непараметричних розподілів $H(r, s)$ складається з тих розподілів, для яких функція ресурсу $\Lambda(t)$ має степеневий порядок росту із граничними значеннями параметрів r і s . В [89] наведено приклади таких розподілів при різних значеннях r і s , а також результати використання цього підходу для граничної оцінки надійності систем в умовах неповної інформації про закони розподілу напрацювання до відмови елементів. Там же відмічені

основні недоліки цього напрямку: отримання параметрів r і s за статистичними даними вимагає додаткового більш глибокого дослідження; теорія інтервальних оцінок надійності систем не доведена до інженерних методик; для інженерна-практика може виявитись занадто складним використовуваний математичний апарат.

Друга з можливостей реалізації непараметричних методів для оцінювання надійності в умовах апіорної невизначеності заснована на тому, що відносно функції розподілу $F(x)$ не приймається взагалі будь-яких допущень. Цей підхід може бути використаний в тих випадках, коли в силу багатьох причин не має достатніх підстав навіть для того, щоб віднести досліджуваний об'єкт до класу «старіючих» або «молодіючих». Можливо лише припустити, що відомо тільки лише декілька початкових моментів функції розподілу $F(x)$ і будь-яка інша корисна інформація про неї відсутня. Аналіз показав, що саме цей підхід доцільно використовувати для оцінювання надійності об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу при обмеженій вихідній інформації.

3.2. Постановка задачі і вибір аналітичного методу її вирішення в умовах апіорної невизначеності

3.2.1. Постановка задачі. Збережемо постановку задачі, яка була розглянута в п. 2.2.1, але внесемо в неї деякі зміни, пов'язані з апіорної невизначеністю.

Як і раніше, розглянемо об'єкт ЕКО з комбінованим резервом часу, виконуючий певні завдання тривалістю t_3 в ідеальних умовах і який представляє сукупність взаємопов'язаних між собою різних підсистем, що мають обмежену

надійність. В процесі функціонування в об'єкті виникають відмови і збої технічних та програмних засобів i типів ($i \geq 1$), при цьому напрацювання на відмову або збій i -го типу розподілено за законом $F_i(t) = P\{t_{oi} \leq t\}$. В момент закінчення відновлення працездатності об'єкта з ймовірністю $0 \leq p_i \leq 1$ продовжується виконувати завдання з урахуванням попереднього напрацювання (при незнецінюючих відмовах і збоїв) або з ймовірністю $1 - p_i$ ($i \geq 1$) приступає до виконання завдання з самого початку (при повністю знецінюючих відмовах) або з деякого етапу виконання (при частково знецінюючих відмовах).

Для компенсації наслідків відмов та збоїв в об'єкті передбачено використання комбінованого резерву часу, що містить поповнювану t_d та непоповнювану t_p складові, які певним чином між собою взаємодіють. Проведений аналіз показав (п.п. 2.2.1), що тривалість відновлення працездатності об'єкта t_v після відмов та збоїв проходить перевірку на виконання часових обмежень, обумовлених використанням комбінованого резерву часу (t_d, t_p), в два етапи.

На першому етапі перевірки використовується поповнюваний резерв часу t_d , який встановлює обмеження (допустиму перерву в функціонуванні об'єкта без втрати якості роботи) на час кожного відновлення працездатності t_v . Це дозволяє відсіяти частину збоїв, які викликають короткотривалу втрату об'єктом працездатності (при $t_v \leq t_d$), і підвищити показники безвідмовності об'єкта. На другому етапі використовується непоповнювана складова t_p комбінованого резерву часу, яка обмежує сумарний час простою в ремонті (іноді і повторення всього або частини попереднього напрацювання).

На відміну від задачі, яка розглядалась в п.п. 2.2.1, будемо вважати, що вид функцій розподілу $F_{vi}(t)$ ($i \geq 1$) часу відновлення працездатності об'єкта нам невідомий, а визначені лише їх деякі числові характеристики, зокрема, перший s_{1i} та другий s_{2i} ($i \geq 1$) початкові моменти (п.п. 3.1.1).

Необхідно побудувати математичні моделі надійності – отримати аналітичні розрахункові формули для основних показників надійності системи ОЧ, яку розглядаємо.

Слід відмітити, що при вказаних вище умовах отримати у загальному виді точні значення показників надійності досліджуваних об'єктів не представляється можливим, і задача полягає в знаходженні двосторонніх оцінок (точних верхніх та нижніх границь) цих показників, коли невідомі функції розподілу вихідних випадкових величин належать деякому фіксованому класу розподілів [163].

3.2.2. Аналітичний метод визначення двосторонніх оцінок показників надійності об'єктів з часовим резервуванням. Для розв'язання сформульованої вище задачі доцільно використовувати той факт, що в багатьох відомих розрахункових формулах для показників надійності, отриманих при повній вихідній інформації, входять функціонали спеціального виду (зокрема, лінійні, дробово-лінійні та інші), значення яких залежать від виду функції розподілу вихідних випадкових величин, апріорна інформація про які обмежена знанням тільки двох початкових моментів. Якщо отримати аналітичні залежності для точних нижніх та верхніх границь цих функціоналів, то з'явиться можливість побудувати двосторонні оцінки показників надійності, в які входять ці функціонали [164].

Вказані вище функціонали мають вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} I(F) = \int_0^{\infty} g(x) dF(x), \\ I(F_1, \dots, F_n) = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} g(x_1, \dots, x_n) dF_1(x_1) \dots dF_n(x_n), \\ I(F) = \frac{I_1(F)}{I_2(F)} = \frac{\int_0^{\infty} g_1(x) dF(x)}{\int_0^{\infty} g_2(x) dF(x)}, \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де $g(x)$ – задана функція, має скінченне значення в кожній точці x , обмежена, може бути диференційованою, неперервною, або кусково-неперервною з кінцевим числом точок розриву, а саме головне – залежить від параметрів. Передбачається також, що функція $g(x)$ піддається аналітичному дослідженню.

Позначимо K_1 і K_2 два класи функцій розподілу невід’ємних випадкових величин, відповідно з одним або двома фіксованими моментами

$$s_i = \int_0^{\infty} x^i dF(x), \quad i = 1, 2, \quad (3.2)$$

які задовольняють співвідношенням $0 < s_1^2 < s_2 < \infty$. Підмножини функцій розподілу з класів K_1 і K_2 , які задовольняють додатковій умові $F(Q+0) = 1$ (де Q – фіксоване найменше число, що задовольняє цій умові), позначимо через K_i^Q , $i = 1, 2$. У класах K_i^Q виконуються нерівності $0 < s_1^2 < s_2 < s_1 Q$.

При вказаних вище обмеженнях на функцію $g(x)$ і моменти s_1 та s_2 функціонали (3.1) та їх точні верхні і нижні границі існують. Якщо функція $g(x)$ неперервна, то інтеграли (3.1) існують як інтеграли Стільтєса. Якщо ж обидві функції $g(x)$ та $F(x)$ розривні в одній і тій же точці, то інтеграл Стільтєса, як відомо, не існує. В цьому випадку інтеграли (3.1) існують як інтеграли Лебега-Стільтєса.

Необхідно вирішити наступну задачу: знайти

$$\left. \begin{aligned} I(F) &= \sup_{F \in K} I(F), \\ I(F) &= \inf_{F \in K} I(F). \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

тобто визначити супремум та інфімум функціоналу (3.1), коли функція розподілу F належить відповідному класу K .

Ця задача відноситься до проблеми моментів і до екстремальних задач, які вперше були поставлені П.Л. Чебишевим і А.А. Марковим та вирішені ними аналітично (при сильних обмеженнях на функцію $g(x)$ за допомогою

теорії неперервних дробів). Огляд робіт цього напрямку та подальший розвиток мається в книгах М.Г. Крейна та А.А. Нудельмана, С. Карліна і В. Стаддена та інших авторів. В математичній теорії надійності на актуальність та важливість цих задач вперше звернули увагу академік Б.В. Гнеденко і А.В. Скороход [165– 167].

На даний час визначено два основних підходи щодо вирішення вказаних вище задач. В основі першого підходу лежить чисельний метод, який ґрунтується на ідеях лінійного стохастичного програмування [168 – 170].

Однак обмеження на моделі надійності, прийняті у цьому методі, не завжди відповідають фізичній сутності задач, які розглядаються. Основне обмеження – це кінцевість інтервалу інтегрування у формулах (3.1), причому при збільшенні цього інтервалу час розрахунку обчислень дуже швидко зростає. Крім того, для деяких розривних функцій $g(x)$ рішення має значну помилку навіть на кінцевому інтервалі інтегрування. Чисельна оптимізація навіть при двох-трьох параметрах вимагає великих затрат часу, а при чотирьох параметрах, які змінюються на всій позитивній піввісі, вона стає практично неможливою.

Другий підхід допускає аналітичне розв'язання задачі знаходження екстремальних функцій розподілу для розрахунку нижніх та верхніх границь функціоналів (3.1), в яких підінтегральні функції залежать від параметрів. Математичні основи цього підходу, що визначають необхідні та достатні умови екстремуму лінійних та дробово-лінійних функціоналів (формули (3.1)) розглядаються на чотирьох класах функцій розподілу.

Не дивлячись на те, що на теперішній час загальна теорія і методи розв'язання подібних задач розроблені достатньо повно, знаходження екстремумів та граничних розподілів для конкретних функціоналів аналітичними методами, за образним виразом, залишається скоріше мистецтвом. Тому, виникає необхідність подальшого розвитку в прикладному плані вказаного вище загального аналітичного підходу для визначення

двосторонніх оцінок (точних граничних значень) функціоналів, які характеризують надійність функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу.

3.3. Удосконалена методика побудови двосторонніх оцінок показників надійності систем з комбінованим резервом часу

Метою даного підрозділу є викладення сутності вказаної вище методики, виявлення базового функціоналу, який визначає надійність досліджуваних систем, та побудова двосторонніх оцінок (точних верхніх та нижніх границь) цього функціоналу.

3.3.1. Сутність методики. В основі даної методики покладено розглянутий в п.п. 3.2.2 аналітичний метод визначення двосторонніх оцінок показників надійності об'єктів при обмеженій вихідній інформації, який використовується для дослідження надійності систем з комбінованим резервом часу (t_d, t_p) , що містить поповнювану t_d та непоповнювану t_p складові загального часового резерву. Аналіз особливостей функціонування таких систем, проведений у другому розділі (п.п. 2.2.1), показує, що поповнювана складова t_d використовується на першому етапі перевірки часових обмежень $(t_b \leq t_d)$ після виникнення відмови та витрачається при відновленні працездатного об'єкту.

Тому у функціонал, характеризуючий безвідмовність об'єкту (будемо його називати базовим функціоналом), входить в якості вихідних даних функція розподілу часу t_b відновлення $F_b(t)$, точний вид якої невідомий, а

визначені тільки два початкових моменти цієї випадкової величини.

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

В загальному випадку реалізація даного методу включає в себе виконання наступних етапів [44]:

1. Вибір типових функціоналів, характеризуючих надійність резервованих систем;
2. Побудова для даних функціоналів точних нижніх та верхніх границь;
3. Отримання двосторонніх оцінок (нижньої та верхньої границь) показників надійності резервованих систем шляхом підстановки граничних значень функціоналів у формули, отримані при повній вихідній інформації.

Аналіз показав, що найбільш складною є реалізація другої задачі. Розглянемо її розв'язання більш детально.

3.3.2. Побудова двосторонніх оцінок (нижніх і верхніх границь) для базового функціоналу. Аналіз показав, що отримана у другому розділі при повній вихідній інформації сукупність нових розрахункових формул для основних показників надійності об'єктів з комбінованим резервом часу містить базовий лінійний функціонал, що характеризує безвідмовність об'єкта при використанні поповнюваної складової t_d загального резерву часу (t_d, t_p) .

Цей функціонал має вид:

$$I(F_B) = F_B(t_d) = \int_0^{t_d} dF_B(x) = \int_0^{\infty} g(x, t_d) dF_B(x), \quad (3.3)$$

де

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

Нехай закон розподілу $F_B(x)$ довільний і вид його невідомий, а визначені лише два його початкових моменти s_1 та s_2 (формула (3.2)). Позначимо через K_2 множину функцій розподілу $F_B(x)$ таких, що

$$F_B(0) = 0; \int_0^\infty dF_B(x) = 1; \int_0^\infty x^i dF_B(x) = s_i, \quad i = 1, 2; \quad 0 < s_1^2 < s_2 < \infty.$$

Необхідно знайти точні нижні $\inf_{F_B \in K_2} I(F_B)$ та верхні $\sup_{F_B \in K_2} I(F_B)$ границі функціоналу $I(F_B)$ з використанням необхідних та достатніх умов існування екстремуму лінійних функціоналів [171]. Запис $F_B \in K_2$ означає, що невідома функція розподілу $F_B(x)$ належить множині функцій розподілу $K_2(s_1, s_2)$ позитивних випадкових величин з фіксованими початковими моментами s_1 та s_2 . Нижче наводиться розв'язання цієї задачі. Нижні та верхні оцінки функціоналу $I(F_B)$ для різних областей змін величини резерву часу t_d наведено в таблиці 3.1.

При отриманні цих оцінок використані результати, наведені в [88], за допомогою яких можна показати, що ступенева функція розподілу $I_0(x)$ з точкам росту $x_1, x_2, x_3 \in$ граничною, якщо багаточлен $U_0(x) = u_1 + u_2x + u_3x^2$ задовольняє умові $U_0(x) \leq g(x, t_d)$ для всіх $x \geq 0$ при пошуку мінімального значення інтегралу (3.3) (або умові $U_0(x) \geq g(x, t_d)$ при пошуку максимального значення цього інтегралу). Коефіцієнти цього багаточлену $u_i, \quad i = \overline{1, 3}$, визначаються з рівності $g(x, t_d) = U_0(x)$. Для наочності на рис. 3.1 та 3.2 наведено графіки зміни від x функції $g(x, t_d)$ (суцільні лінії) та граничного багаточлена $U(x)$ (пунктирні лінії) для різних областей зміни t_d (на осі виділено точки зростання граничної функції розподілу $F_0(x)$).

Таблиця 3.1 – Нижні та верхні оцінки функціоналу $I_1(F_B)$

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

Ці графіки можуть бути доказом виконання умови $\underline{U}_0(x) \leq g(x, t_d)$ (при пошуку мінімального значення інтегралу (3.3)) або умови $\overline{U}_0(x) \geq g(x, t_d)$ (при пошуку максимального значення цього інтегралу).

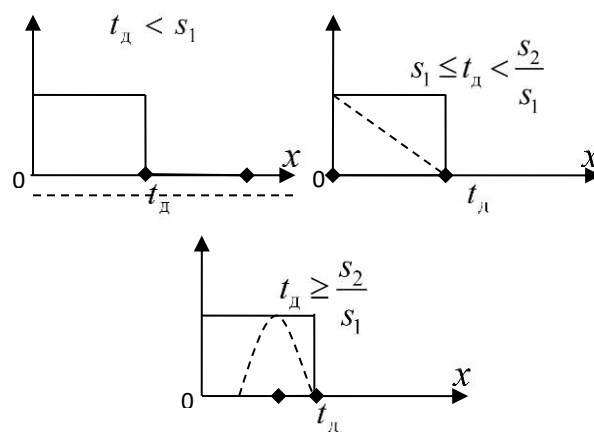


Рисунок 3.1 – Графіки зміни від функції $g(x, t_d)$ (суцільні лінії) та граничного багаточлена $U(x)$ (пунктирні лінії) під час пошуку мінімального значення інтегралу (3.3)

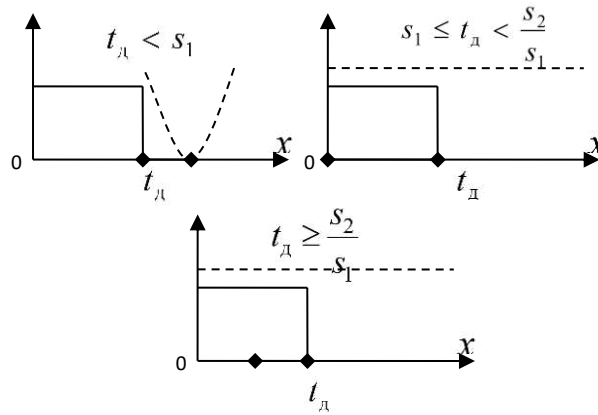


Рисунок 3.2 – Графіки зміни від x функції $g(x, t_d)$ (суцільні лінії) та граничного багаточлена $U(x)$ (пунктирні лінії) під час пошуку максимального значення інтегралу (3.3)

Так, наприклад, в області $0 < t_d < s_1$ гранична функція розподілу $F_0(x)$ має точки росту $x_1 = t_d$, $x_2 = n$, $n \rightarrow \infty$, граничний багаточлен $U_0(x) = 0$, а мінімальне значення інтегралу (3.3) $\inf_{F_B \in K_2} I(F_B) = 0$. При $s_1 \leq t_d < \frac{s_2}{s_1}$ гранична функція розподілу має точки росту $x_1 = 0$, $x_2 = t_d$. Отже, рівняння граничного багаточлену $U_0(x)$ матиме вид $U_0(x) = 1 - \frac{x}{t_d}$ (рис. 3.1). Мінімальне значення інтегралу (3.3) буде мати вид

$$\inf_{F_B \in K_2} I(F_B) = \frac{t_d - s_1}{t_d}.$$

Аналогічно доводиться решта результатів, представлені в таб. 3.1.

Розглянемо ситуацію, коли випадкова величина t_b з функцією розподілу $F_b(x)$ не може приймати значень, більших t_b^* , тобто $0 < t_b \leq t_b^*$, де t_b^* – максимальний час відновлення, визначається умовами експлуатації об'єктів, кваліфікацією обслуговуючого персоналу та іншими факторами ($0 < t_b^* \leq \infty$). Нехай функція розподілу $F_b(x) = P\{t_b < x\}$, як і раніше, невідома, а відомо

лише, що вона належить класу K_2^* :

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

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

$$\inf_{F_B \in K_2} I(F_B) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t_d \leq s_1, \\ 1 + \frac{s_2 - s_1(t_d + t_B^*)}{t_d t_B^*} & \text{при } s_1 < t_d < \frac{s_2}{s_1}, \\ \frac{(t_d + s_1)^2}{s_2 - 2t_d s_1 + t_d^2} & \text{при } t_d > \frac{s_2}{s_1}, \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\sup_{F_B \in K_2} I(F_B) = \begin{cases} \frac{s_2 - s_1^2}{s_2 - 2t_d s_1 + t_d^2} & \text{при } 0 < t_d < s_1, \\ 1 - \frac{s_2 - s_1 t_d}{t_B^*(t_B^* - t_d)} & \text{при } s_1 \leq t_d < \frac{s_2}{s_1}, \\ 1 & \text{при } t_d \geq \frac{s_2}{s_1}. \end{cases} \quad (3.5)$$

Формули (3.4) та (3.5) справедливі $t_d < t_B^*$. Якщо інформація про функції розподілу $F_B(x)$ обмежена значенням тільки лише середнього значення

$s_1 = \int_0^\infty [1 - F_B(x)] dx$, тоді двосторонні оцінки функціоналу $I(F_B)$ мають вид:

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

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

Таким чином, отримані результати реалізації перших двох етапів запропонованого удосконаленого методу – нижня та верхня границі базових функціоналів $I(F_B)$ (формула (3.3)), які дають можливість отримати

двосторонні показники надійності функціонування об'єктів з комбінованим резервом часу в умовах апріорної невизначеності [44].

3.4. Двосторонні оцінки (нижні та верхні границі) показників надійності систем з комбінованим резервом часу при різних типах відмов об'єкта

У другому розділі отримано основні розрахункові співвідношення – моделі надійності функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу при повній вихідній інформації (п. 2.3 та 2.4). В формули для показників надійності входить ймовірність q відмови об'єкта в момент витрати поповнюваної складової t_d комбінованого резерву часу (тобто в момент виконання умови $t_b > t_d$), яка пов'язана з базовим функціоналом $I(F_b)$ (формула 3.3) співвідношенням:

$$q = P\{t_b > t_d\} = 1 - F_b(t_d) = 1 - I(F_b). \quad (3.6)$$

Використовуючи формули табл. 3.1, а також (3.4) і (3.5) з урахуванням виразу (3.6), отримуємо нижню q_* та верхню q^* границі ймовірності q відмови об'єкта:

$$q_* = 1 - \sup_{F_b \in K_2} I(F_b), \quad (3.7)$$

$$q^* = 1 - \inf_{F_b \in K_2} I(F_b). \quad (3.8)$$

Після підстановки у формули (3.7) та (3.8) виразів з табл. 3.1 знаходимо

$$q_* = \begin{cases} \frac{(s_1 - t_d)^2}{s_2 - 2s_1 t_d + t_d^2}, & \text{при } 0 < t_d < s_1, \\ 0, & \text{при } s_1 \leq t_d < s_2/s_1, \\ 0, & \text{при } t_d \geq s_2/s_1, \end{cases} \quad (3.9)$$

$$q^* = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < t_d < s_1, \\ \frac{s_1}{t_d}, & \text{при } s_1 \leq t_d < s_2/s_1, \\ \frac{s_2 - s_1^2}{s_2 - 2s_1 t_d + t_d^2}, & \text{при } t_d \geq s_2/s_1. \end{cases} \quad (3.10)$$

Ці формули справедливі для випадку $t_b^* = \infty$ (обмеження на максимальний час відновлення об'єкта відсутнє).

Для випадку $t_b^* < \infty$ (на максимальний час відновлення об'єкта t_b накладено обмеження t_b^* , тобто $0 < t_b < t_b^*$) граничні значення q_* та q^* ймовірності відмови q об'єкта при тривалому відновленні об'єкта (при $t_b > t_d$) мають вид:

$$q_* = 1 - \sup_{F_b \in K_2^*} I(F_b) = \begin{cases} \frac{(s_1 - t_d)^2}{s_2 - 2s_1 t_d + t_d^2}, & \text{при } 0 < t_d < s_1, \\ \frac{s_2 - s_1 t_d}{t_b^* (t_b^* - t_d)}, & \text{при } s_1 \leq t_d < \frac{s_2}{s_1}, \\ 0, & \text{при } t_d \geq \frac{s_2}{s_1}, \end{cases} \quad (3.11)$$

$$q^* = 1 - \inf_{F_b \in K_2^*} I(F_b) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < t_d < s_1, \\ \frac{s_1(t_d + t_b^*) - s_2}{t_d t_b^*}, & \text{при } s_1 \leq t_d < \frac{s_2}{s_1}, \\ \frac{s_2 - s_1^2}{s_2 - 2s_1 t_d + t_d^2}, & \text{при } t_d \geq \frac{s_2}{s_1}. \end{cases} \quad (3.12)$$

Формули (3.11) і (3.12) справедливі при $t_d < t_b^*$.

Таким чином, отримано двосторонні оцінки нижня q_* та верхня q^* границі ймовірності відмови q об'єкта при використанні поповнюваної складової t_d загального резерву часу (t_d, t_p) (формули (3.7) – (3.12)) та

визначені основні показники надійності системи з комбінованим резервом часу при повній вихідній інформації (розділ 2, п. 2.3 та п. 2.4).

Переходимо до побудови двосторонніх оцінок цих показників при обмеженій інформації – при відомих двох початкових моментах часу відновлення працездатності об'єкта шляхом підстановки у формули для показників надійності замість ймовірності відмови q її граничних значень q_* та q^* (реалізація третього етапу запропонованого методу).

3.4.1. Граничні значення показників надійності при незнецінюючих або повністю знецінюючих відмовах об'єкта. Розглянемо спочатку основний показник надійності – ймовірність безвідмовного функціонування системи з комбінованим резервом часу в умовах виникнення i типів відмов ($i \geq 1$) технічних та програмних засобів об'єкта. Будемо вважати, що в момент відновлення працездатності об'єкта після виникнення відмови i -го типу ($i \geq 1$) об'єкт з ймовірністю p_i продовжує виконувати завдання з урахуванням попереднього напрацювання (знецінюючі відмови) або з ймовірністю $(1 - p_i)$ приступає до виконання завдання з самого початку (повністю знецінюючі відмови).

Для оцінювання надійності такої системи може бути використана формула (2.37), в яку входить вираз

$$a_i = \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i - \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i p_i, \quad (3.13)$$

що містить ймовірність відмови об'єкта $q_i = 1 - F_{\text{в}i}(t_d)$ з урахуванням поповнюваної складової t_d комбінованого резерву часу. Підставляючи в (3.13) двосторонні оцінки q_* і q^* ймовірність відмови q , отримуємо нижню \underline{a}_i та верхню \bar{a}_i границі виразу a_i :

$$\underline{a}_i = \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_{i*} - \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_{i*} p_i, \quad (3.14)$$

$$\bar{a}_i = \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i^* - \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i^* p_i, \quad (3.15)$$

а також двосторонні оцінки ймовірності безвідмовного функціонування

$$\min_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p / (t_3 - t_d) \rceil} (-1)^j e^{-(j+1)\underline{a}_i(t_3 - t_d)} \frac{\underline{a}_i(t_p - j(t_3 - t_d))^j}{j!} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{\underline{a}_i(t_p - j(t_3 - t_d))}{j+1} \right], \quad 0 \leq p_i < 1, \quad (3.16)$$

$$\max_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p / (t_3 - t_d) \rceil} (-1)^j e^{-(j+1)\bar{a}_i(t_3 - t_d)} \frac{\bar{a}_i(t_p - j(t_3 - t_d))^j}{j!} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{\bar{a}_i(t_p - j(t_3 - t_d))}{j+1} \right], \quad 0 \leq p_i < 1, \quad (3.17)$$

де \underline{a}_i і \bar{a}_i – дивись формули (3.14) та (3.15).

Якщо в об'єкті виникають відмови одного типу (випадок $i=1$), то для оцінки ймовірності $P(t_3, t_d, t_p)$ можна скористатись формулою (2.39), при цьому отримаємо двосторонні оцінки цієї ймовірності наступного виду:

$$\min_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p / (t_3 - t_d) \rceil} (-1)^j e^{-(j+1)\rho_*} \frac{(\gamma_* - j\rho_*)^j}{j!} \left(1 + \frac{(\gamma_* - j\rho_*)}{j+1} \right), \quad (3.18)$$

$$\text{де} \quad \rho_* = \lambda q_*(1-p)(t_3 - t_d), \quad \gamma_* = \lambda q_*(1-p)t_p, \quad 0 \leq p < 1; \quad (3.19)$$

$$\max_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p / (t_3 - t_d) \rceil} (-1)^j e^{-(j+1)\rho^*} \frac{(\gamma^* - j\rho^*)^j}{j!} \left(1 + \frac{(\gamma^* - j\rho^*)}{j+1} \right), \quad (3.20)$$

$$\text{де} \quad \rho^* = \lambda q^*(1-p)(t_3 - t_d), \quad \gamma^* = \lambda q^*(1-p)t_p, \quad 0 \leq p < 1; \quad (3.21)$$

Двосторонні оцінки ймовірності безвідмовного функціонування системи ОЧ, в якій виникають повністю знецінюючі відмови (випадок $i=1, p=0$), мають такий самий вид, як і формули (3.18) і (3.20), тільки в них слід підставляти інші значення $\rho_*, \gamma_*, \rho^*, \gamma^*$:

$$\begin{cases} \rho_* = \lambda q_*(t_3 - t_d), \\ \gamma_* = \lambda q_* t_p, \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} \rho^* = \lambda q^* (t_3 - t_d), \\ \gamma^* = \lambda q^* t_p. \end{cases} \quad (3.23)$$

Наведемо далі формули для розрахунку двосторонніх оцінок інтенсивності відмов системи ОЧ $\Lambda(t_3, t_d, t_p)$ при виникненні відмов одного типу ($i=1$ і $0 \leq p < 1$):

$$\min_{F_b \in K_2} \Lambda(t_3, t_d, t_p) = \lambda q_*(p-1) \frac{\left[(1 + \gamma_*) e^{\rho_*} + \sum_{j=0}^{\lceil t_p / (t_3 - t_d) \rceil} (-1)^j \frac{(\gamma_* - j \rho_*)^j}{(j-1)!} \times \right.}{\min_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p)} \times \left. e^{-(j+1)\rho_*} \left(\left(2 + \frac{1}{j} \right) (\gamma_* - j \rho_*) + j + \frac{(\gamma_* - j \rho_*)^2}{j!} \right) \right], \quad (3.24)$$

де $\min_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p)$ визначається формулою (3.18), а ρ_* , γ_* – дивись формули (3.19);

$$\max_{F_b \in K_2} \Lambda(t_3, t_d, t_p) = \lambda q^*(p-1) \frac{\left[(1 + \gamma^*) e^{\rho^*} + \sum_{j=0}^{\lceil t_p / (t_3 - t_d) \rceil} (-1)^j \frac{(\gamma^* - j \rho^*)^j}{(j-1)!} \times \right.}{\min_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p)} \times \left. e^{-(j+1)\rho^*} \left(\left(2 + \frac{1}{j} \right) (\gamma^* - j \rho^*) + j + \frac{(\gamma^* - j \rho^*)^2}{j!} \right) \right], \quad (3.25)$$

де $\max_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p)$ визначається формулою (3.20), а ρ^* , γ^* – дивись формули (3.21).

Для випадку $p=0$, $i=1$ (в об'єкті виникають повністю знецінюючі відмови одного типу) двосторонні оцінки $\min_{F_b \in K_2} \Lambda(t_3, t_d, t_p)$ і $\max_{F_b \in K_2} \Lambda(t_3, t_d, t_p)$ інтенсивності відмов системи з комбінованим резервом часу $\Lambda(t_3, t_d, t_p)$ визначається за допомогою формул (3.24) і (3.25), тільки в них слід підставляти вирази (3.22) та (3.23).

Використовуючи вирази (3.21) – (3.25) для середнього часу виконання завдання $\bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d)$ (див. п.п. 2.3.1), неважко отримати розрахункові співвідношення для оцінки нижніх і верхніх границь цього показника при виникненні різних типів відмов об'єктів.

В загальному випадку ($i \geq 1$ і $0 \leq p_i < 1$) отримуємо

$$\min_{F_{\text{в}} \in K_2} \bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d) = \frac{1}{\underline{a}_i} \left(1 + \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i \bar{t}_{\text{в}i} \right) \left(e^{\underline{a}_i(t_3, t_d)} - 1 \right), \quad (3.26)$$

$$\max_{F_{\text{в}} \in K_2} \bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d) = \frac{1}{\bar{a}_i} \left(1 + \sum_{i \geq 1} \lambda_i q_i^* \bar{t}_{\text{в}i} \right) \left(e^{\bar{a}_i(t_3, t_d)} - 1 \right), \quad (3.27)$$

де \underline{a}_i і \bar{a}_i – дивись формули (3.14) та (3.15), $i \geq 1$ і $0 \leq p_i < 1$.

В окремому випадку $i = 1$ (в об'єкті виникають відмови одного типу)

$$\min_{F_{\text{в}} \in K_2} \bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d) = \frac{1}{\lambda q_* (1-p)} \left(1 + \lambda q_* \bar{t}_{\text{в}} \right) \left(e^{\lambda q_* (1-p)(t_3, t_d)} - 1 \right), \quad (3.28)$$

$$\max_{F_{\text{в}} \in K_2} \bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d) = \frac{1}{\lambda q^* (1-p)} \left(1 + \lambda q^* \bar{t}_{\text{в}} \right) \left(e^{\lambda q^* (1-p)(t_3, t_d)} - 1 \right), \quad (3.29)$$

де q_* , q^* – дивись формули (3.7) – (3.10); $0 \leq p_i < 1$.

Якщо в об'єкті виникають тільки незнецінюючі відмови, то при $p = 1$ формули (3.28) і (3.29) спрощуються:

$$\min_{F_{\text{в}} \in K_2} \bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d) = (t_3 - t_d) (1 + \lambda q_* \bar{t}_{\text{в}}), \quad (3.30)$$

$$\max_{F_{\text{в}} \in K_2} \bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d) = (t_3 - t_d) (1 + \lambda q^* \bar{t}_{\text{в}}), \quad (3.31)$$

а при $p = 0$ (у випадку повністю знецінюючих відмов) приймають вид:

$$\min_{F_{\text{в}} \in K_2} \bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d) = \left(\frac{1}{\lambda q_*} + \bar{t}_{\text{в}} \right) \left(e^{\lambda q_* (t_3, t_d)} - 1 \right), \quad (3.32)$$

$$\max_{F_{\text{в}} \in K_2} \bar{T}_{\text{вз}}(t_3, t_d) = \left(\frac{1}{\lambda q^*} + \bar{t}_{\text{в}} \right) \left(e^{\lambda q^* (t_3, t_d)} - 1 \right). \quad (3.33)$$

Слід відмітити, що всі отримані в п.п. 3.4.1 двосторонні оцінки – формули для розрахунку нижніх та верхніх границь показників надійності систем з комбінованим резервом часу (3.14) – (3.33) справедливі для випадку $t_b^* = \infty$, коли обмеження на максимальний час відновлення працездатності об'єкта відсутнє. Для випадку $t_b^* < \infty$ (на максимальний час відновлення об'єкта \bar{t}_b накладено обмеження t_b^* , тобто $0 < t_b < t_b^*$) всі наведені формули (3.14) – (3.33) зберігають свій вид, якщо підставляти в них значення $q_* = 1 - \sup_{F_b \in K_2^*} I(F_b)$ і $q^* = 1 - \inf_{F_b \in K_2^*} I(F_b)$, що визначаються виразами (3.11) та (3.12), які справедливі при $t_d < t_b^*$.

3.4.2. Граничні значення показників надійності при незнецінюючих або частково знецінюючих відмовах об'єкта. Отримаємо двосторонні оцінки ймовірності безвідмовного функціонування $P(t_3, t_d, t_p)$ системи з комбінованим резервом часу при розбитті виконуваного завдання на $n(n > 1)$ етапів для загального випадку $i \geq 1$ і $0 \leq p_i < 1$ (див. п.п. 2.4.1). Для цього скористаємося виразом (2.56) та підставимо в нього замість формули a_i (вираз 2.32) її нижню \underline{a}_i та верхню \bar{a}_i границі (вираз (3.14) і (3.15)). В результаті отримаємо

$$\min_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lfloor t_p / (t_3^*) \rfloor} (-1)^j \binom{n+j-1}{j} e^{-(1+j/n)\underline{a}_i t_3^*} \times \\ \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{[\underline{a}_i (t_p - j t_3^* / n)]^{k+j}}{(k+j)!}, \quad 0 \leq p_i < 1, \quad (3.34)$$

$$\max_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lfloor t_p / (t_3^*) \rfloor} (-1)^j \binom{n+j-1}{j} e^{-(1+j/n)\bar{a}_i t_3^*} \times \\ \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{[\bar{a}_i (t_p - j t_3^* / n)]^{k+j}}{(k+j)!}, \quad 0 \leq p_i < 1, \quad (3.35)$$

де \underline{a}_i та \bar{a}_i – дивись формули (3.14) і (3.15); $t_3^* = t_3 - t_d$.

Зокрема, коли в об'єкті виникають відмови одного типу $i=1$,

$a = \lambda q(1 - p)$ і формула (2.56) перетворюється:

$$\min_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_3 \rceil} (-1)^j \binom{n+j-1}{j} \exp[\lambda q(1-p)(t_3 - t_d)(1+j/n)] \times \\ \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{[\lambda q(1-p)(t_p - j(t_3 - t_d)/n)]^{k+j}}{(k+j)!}, \quad 0 \leq p_i < 1. \quad (3.36)$$

Використовуючи (3.36), отримуємо нижню і верхню границі ймовірності $P(t_3, t_d, t_p)$:

$$\min_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_3 \rceil} (-1)^j \binom{n+j-1}{j} \exp[\lambda q_*(1-p)(t_3 - t_d)(1+j/n)] \times \\ \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{[\lambda q_*(1-p)(t_p - j(t_3 - t_d)/n)]^{k+j}}{(k+j)!}, \quad 0 \leq p_i < 1. \quad (3.37)$$

$$\max_{F_b \in K_2} P(t_3, t_d, t_p) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_3 \rceil} (-1)^j \binom{n+j-1}{j} \exp[\lambda q^*(1-p)(t_3 - t_d)(1+j/n)] \times \\ \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{[\lambda q^*(1-p)(t_p - j(t_3 - t_d)/n)]^{k+j}}{(k+j)!}, \quad 0 \leq p_i < 1. \quad (3.38)$$

де q_* і q^* – граничні значення ймовірності відмови об'єкта (формули (3.7) – (3.10)).

Якщо в об'єкті виникають повністю знецінюючі відмови (випадок $i = 1$, $p = 0$), то для розрахунку двосторонніх оцінок ймовірність $P(t_3, t_d, t_p)$ можна використовувати формули (3.37) і (3.38), якщо покласти в них $p = 0$.

Для отримання двосторонніх оцінок середнього часу виконання завдання $\bar{T}_{вз}(t_3, t_d, n)$ скористаємося формулою (2.55). Підставляючи в неї нижню q_* та верхню q^* границі ймовірності відмови q , отримуємо (для випадку $i = 1$, $0 \leq p_i < 1$):

$$\min_{F_B \in K_2} \bar{T}_{B3}(t_3, t_d, n) = \frac{n}{\lambda q_*(1-p)} (1 + \lambda q_* \bar{t}_B) \left[\exp(\lambda q_*(t_3 - t_d)(1-p)/n) - 1 \right], \quad (3.39)$$

$$\max_{F_B \in K_2} \bar{T}_{B3}(t_3, t_d, n) = \frac{n}{\lambda q^*(1-p)} (1 + \lambda q^* \bar{t}_B) \left[\exp(\lambda q^*(t_3 - t_d)(1-p)/n) - 1 \right], \quad (3.40)$$

В окремому випадку при $p=0$ (система з частковим знецінюванням попередніх результатів) при розрахунках можна скористатися формулами (3.39) та (3.40), якщо покласти в них $p=0$.

Як і раніше, всі отримані в п. 3.2.4 розрахункові співвідношення (3.34) – (3.40) справедливі для випадку $t_B^* = \infty$. Якщо на максимальний час відновлення t_B накладено обмеження $t_B^* < \infty$, то ці формули зберігають свій вид, але підставляти в них необхідно значення $q_* = 1 - \sup_{F_B \in K_2} I(F_B)$ і $q^* = 1 - \inf_{F_B \in K_2} I(F_B)$, що визначаються виразами (3.11) та (3.12).

Висновки до розділу 3

1. Проведений аналіз особливостей розв'язання задач оцінювання надійності в умовах апріорної невизначеності і за обмежених можливостях використання відомих методів дозволив обґрунтувати необхідність удосконалення наявного науково-методичного апарату в цій предметній галузі. Сформульовано постановку задачі комплексного оцінювання надійності об'єктів ЕКО при обмеженій вихідній інформації та обґрунтовано вибір аналітичного методу її розв'язання за відомих початкових моментах вихідних випадкових величин, закони розподілу яких невідомі.

2. Запропоновано удосконалений метод побудови двосторонніх оцінок

(нижніх і верхніх границь) показників надійності систем з комбінованим резервом часу, в основі якої покладено використання математичних моделей оцінювання надійності, отриманих при повній вихідній інформації. Сутність удосконаленого методу, що визначає його новизну та відмінність від відомих, полягає у виборі нового базового функціоналу, який характеризує вплив відмов та збоїв на надійність функціонування та входить у формули для показників надійності об'єктів з комбінованим резервом часу, і побудові нижньої та верхньої границь цього функціоналу з наступним отриманням двосторонніх оцінок показників надійності системи ОЧ шляхом підстановки в них граничних значень базового функціоналу.

3. Доведено, що при використанні комбінованого резерву часу найбільш суттєвими параметрами, які впливають на надійність функціонування об'єктів ЕКО в умовах виникнення відмов та збоїв технічних та програмних засобів, є співвідношення між величиною поповнюваної складової t_d резервного часу (допустимого часу перерви у функціонуванні обладнання) і тривалістю існування збоїв та їх наслідків. Зважаючи на це, за базовий обрано функціонал $I(F_b)$ (формула (3.3)), який враховує зазначене вище співвідношення, і для нього отримано аналітичні формули для розрахунку нижньої та верхньої границь. Використання граничних значень цього функціоналу дає можливість отримати двосторонні оцінки показників надійності функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу.

4. На основі отриманих у розд. 2 результатів і запропонованого удосконаленого методу побудовані нові математичні моделі надійності – двосторонні оцінки показників надійності, які дозволяють проводити комплексне оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО при сумісному урахуванні поповнюваної та непоповнюваної складових комбінованого резерву часу, різних типів відмов і збоїв та їх наслідків, а також різних варіантів розбиття на етапи завдань, що виконуються.

РОЗДІЛ 4

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОННОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З КОМБІНОВАНИМ ЧАСОВИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ ТА ОБГРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЇХ ПОЛІПШЕННЯ

В розд. 1 на підставі проведеного аналізу надійності функціонування ЕКО наявних систем зв'язку, а також перспектив їх розвитку сформульовано постановку наукового завдання, обгрунтовано загальну методологію і основні напрямки дисертаційного дослідження. Відповідно до цього в розд. 2 та 3 отримано нові наукові результати, які в сукупності є розв'язанням сформульованого загального наукового завдання. Метою даного розділу є узагальнення отриманих в дисертації наукових та практичних результатів в межах загальної методики комплексного оцінювання показників надійності об'єктів ЕКО з комбінованим часовим резервуванням. Крім того, в розділі наводяться результати кількісної оцінки надійності функціонування об'єктів ЕКО в умовах відмов та збоїв технічних і програмних засобів обладнання з урахуванням можливості розбиття виконуваних завдань на послідовні етапи з запам'ятовуванням проміжних результатів. На підставі аналізу розрахункових результатів виявлено деякі особливості та властивості комбінованого часового резервування, що доводить ефективність використання цього методу в боротьбі зі збоями та знецінюючими відмовами об'єктів. В заключенні розділу зроблено низку висновків та дано рекомендації щодо практичного використання результатів дисертаційного дослідження для поліпшення показників надійності.

Матеріал даного розділу опубліковано у статті [42, 45].

4.1. Загальна методика комплексного оцінювання показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим часовим резервуванням

Дана методика розроблена, виходячи з сформульованого в розд. 1 наукового завдання, з використанням запропонованої в дисертації загальної методології, основних взаємопов'язаних напрямків дослідження, а також отриманих в дисертації наукових та прикладних результатів.

Метою методики є узагальнення результатів дисертаційного дослідження, які дозволяють проводити комплексне оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО, в яких використовується комбіноване часове 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_d – 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.

Розроблені в дисертації моделі надійності – нові аналітичні формули для основних показників надійності дають можливість проводити кількісне оцінювання впливу на ці показники вказаних вище факторів при повній і обмеженій вихідній інформації.

Метою такого теоретичного дослідження – оцінити ефективність використання комбінованого часового резервування для зменшення впливу наслідків відмов і збоїв технічних та програмних засобів на функціонування ЕКО ЕКМ і обґрунтувати практичні рекомендації щодо поліпшення показників надійності [172]. Вихідні данні, обмеження та допущення, а також формалізація процесу дослідження представлено в п. 1.3. Методика включає в себе сукупність взаємопов'язаних етапів, послідовне виконання яких призводить до досягнення поставленої мети (рис. 4.1).

Проведений в розділах 1 та 2 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 проробленої до моменту відмови роботи і т. д.

Більш того, при складній 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 [45].

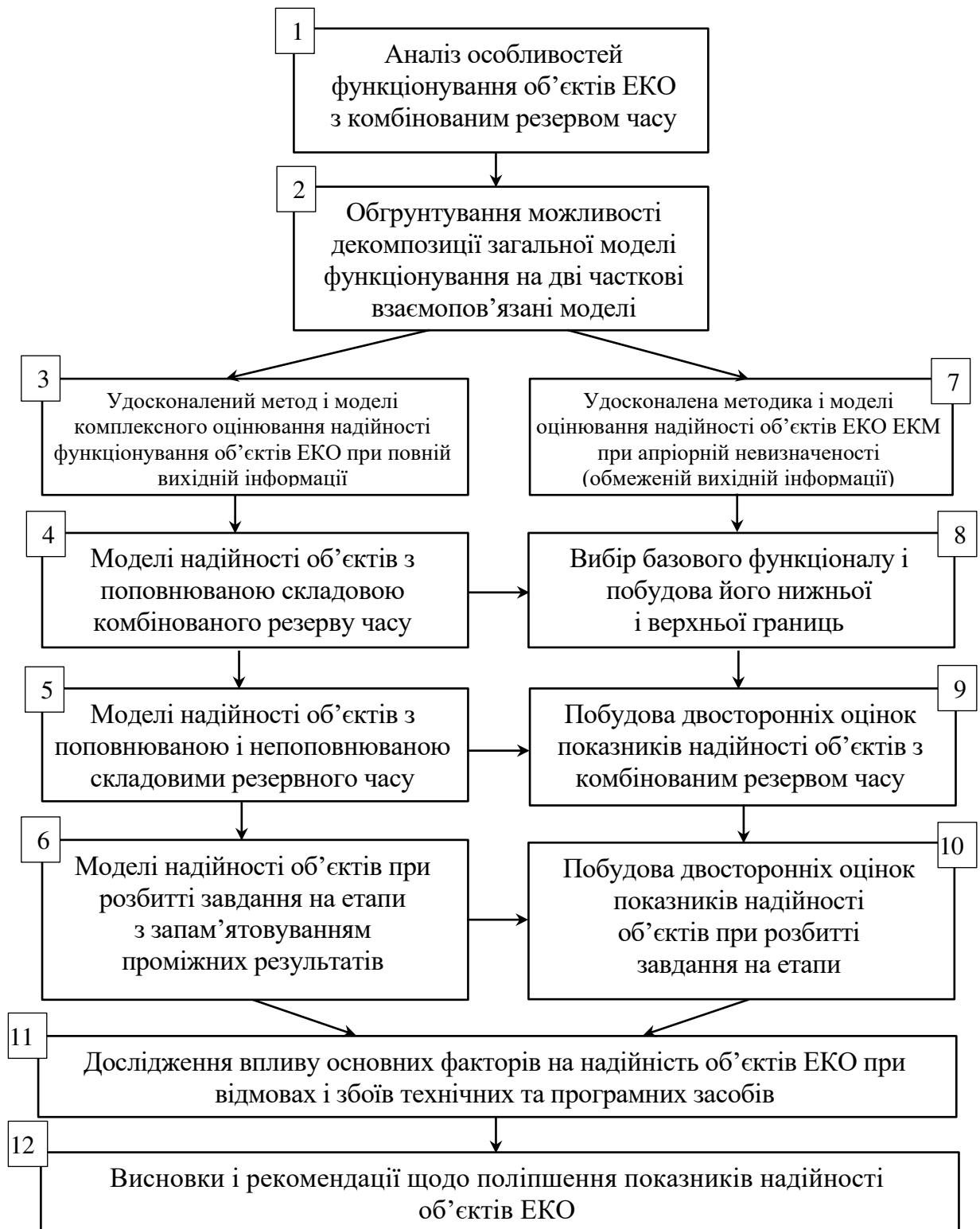


Рисунок 4.1 – Структурна схема загальної методики комплексного оцінювання показників надійності об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу [45]

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_d (поповнюваний резерв – перша складова комбінованого резерву часу), і при виконанні умови $t_b \leq t_d$ система 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_3 і який називається оперативним часом $t = t_3 + t_p$, або шляхом зменшення мінімального часу виконання завдання t_3 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_d і непоповнюваною t_p [45].

3. На відмінність від систем ОЧ, які містять тільки поповнюваний резерв t_d або тільки непоповнюваний t_p , при використанні комбінованого резерву часу (t_d, t_p) передбачені одночасно обмеження t_d на час t_b кожного відновлення працездатності об'єкта і обмеження t_p на добуток непродуктивного часу $T_{\text{нп}}(t_3)$ до виконання завдання. Кожна відмова або збій об'єкта перевіряється на виконання встановлених часових обмежень: на першому етапі перевіряється умова $t_b > t_d$, а на другому – умова $T_{\text{нп}}(t_3) > t_p$.

При виконанні першої умови фіксується стійка відмова та починається ремонт об'єкта, а при $t_b \leq t_d$ 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 [45].

Таким чином, використання комбінованого резерву часу, що містить

поповнювану t_d 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 $t_b \leq t_d$, на другому етапі – при виконанні умови $T_{\text{нп}}(t_3) > t_p$. Ефект розрідження відмов призводить до поліпшення всіх показників надійності функціонування системи ОЧ і проявляється тим сильніше, чим більше виділяється та використовується резервного часу (t_d, t_p) .

На другому етапі загальної методики (рис. 4.1) проводиться обґрунтування 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_d 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_d 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. 4.1) 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 [45].

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) обґрунтовано удосконалений метод розв’язання сформульованого наукового завдання з розробкою та дослідженням двох взаємопов’язаних часткових математичних моделей функціонування об’єктів електронного комунікаційного обладнання (з поповнюваною складовою t_d 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. 4.1) 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 обґрунтування рекомендацій щодо вибору шляхів та методів зменшення впливу обмеженої надійності (відмов та збоїв) об’єктів на функціонування ЕКО ЕКМ при використанні комбінованого резерву часу [45].

4.2. Результати комплексного оцінювання показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання при відмовах і збоїв технічних та програмних засобів

Метою даного розділу є викладення результатів теоретичного дослідження впливу різних факторів на показники надійності функціонування об'єктів ЕКО в умовах обмеженої надійності технічних та програмних засобів. Наведені тут графіки побудовані з використанням моделей надійності, отриманих у розд. 2. Проведений аналіз дозволяє оцінити ефективність використання комбінованого резерву часу, що містить поповнювану і непоповнювану складові, певним чином взаємодіючи між собою, а також дає можливість встановити ряд часткових, специфічних властивостей, характерних тільки для цього методу підвищення надійності функціонування, і виявити деякі загальні властивості, притаманні й іншим видам резервування.

4.2.1. Оцінювання надійності об'єктів з різними типами відмов. На рис. 4.2 – 4.4 наведено графіки залежності ймовірності відмови системи ОЧ $Q(t_3, t_d, t_p) = 1 - P(t_3, t_d, t_p)$ 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

$$\lambda^* = \lambda q = \lambda(1 - F_B(t_d)) = \lambda e^{-\mu t_d}. \quad (4.1)$$

Аналіз графіків дозволяє встановити наступне [42]:

1. При невеликих кратностях непоповнюваного резерву часу $m_t = \frac{t_p}{t_3}$ 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. 4.2).

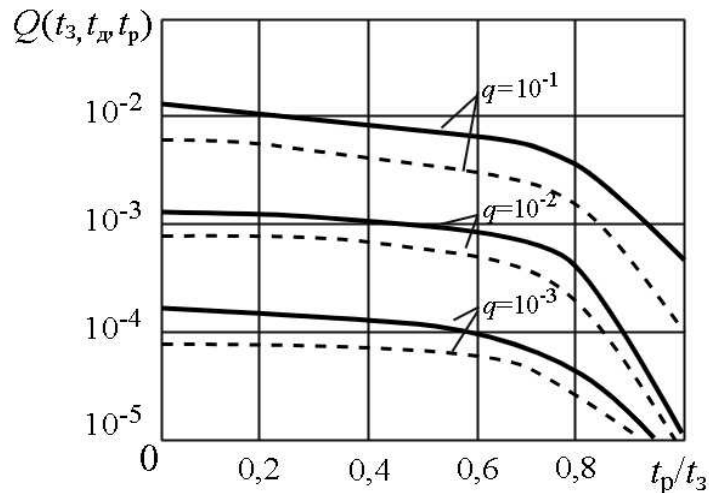


Рисунок 4.2 – Графіки залежності ймовірності відмови системи від кратності непоповнюваного резерву часу t_3/t_p ; $t_3 = \text{const}$; $\lambda^* t_3 = 0,1$ при заданих значеннях $q = \exp(-\mu t_d)$: ————— $p = 0$; $p = 0,5$

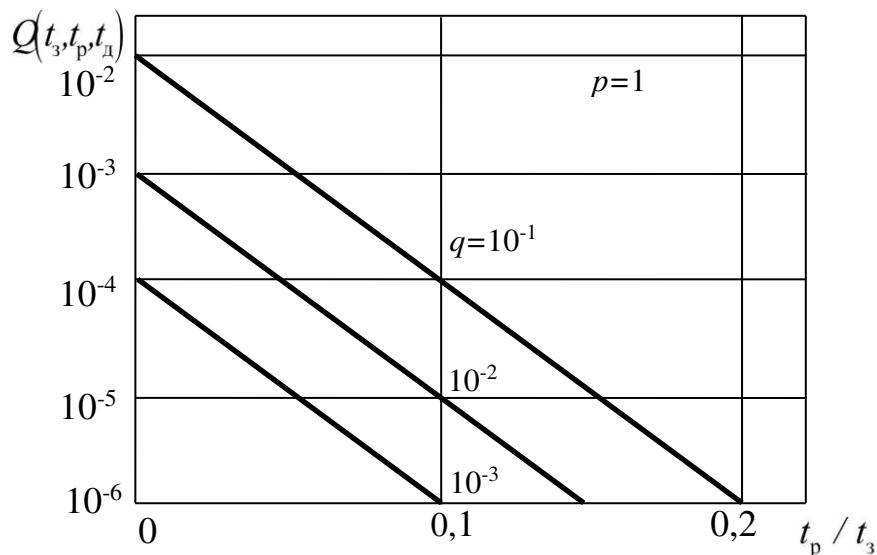


Рисунок 4.3 – Графіки залежності ймовірності відмови системи від кратності непоповнюваного резерву часу t_3/t_p при $p = 1$; $t_3 = \text{const}$; $\lambda t_3 = 0,1$ і різних значеннях ймовірності q_*

Наприклад, збільшення кратності непоповнюваного резерву m_t 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 $m_t = 0,8$, 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_t при $q = \text{const}$ істотно зростає (рис. 4.2, 4.3), при цьому в системах з повністю незнецінюючими відмовами ($p = 1$) залежність $Q(t_3, t_p, t_d) = f(m_t)$ носить лінійний характер (рис. 4.3). Зокрема, при $m_t = 0,1$; $q = \lambda t_3 = 0,1$ 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_t 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_t 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. 4.4 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 $m_t = t_p / t_3$.

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

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

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

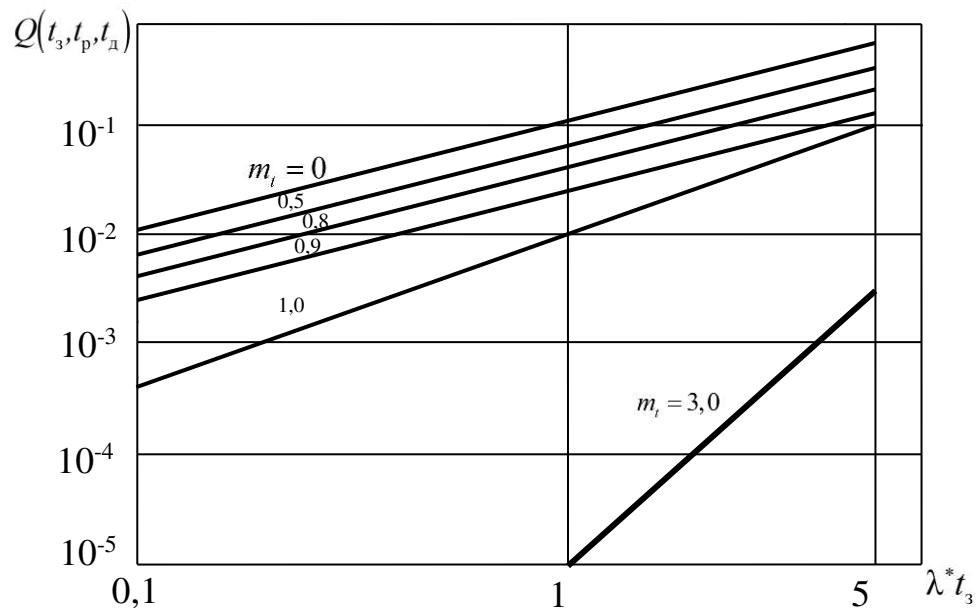


Рисунок 4.4 – Графіки залежності ймовірності відмови системи від відносно мінімального часу виконання завдання $\lambda^* t_3$ при $p = 0$;

$$q = 0,1, \lambda^* = \text{const} \text{ і різних значеннях } m_t = t_p/t_3$$

На рис. 4.5, 4.6 наведено графіки залежності інтенсивності відмов системи з комбінованим резервом часу від мінімального часу виконання завдання $\lambda^* t_3$ при різних значеннях параметрів складових резервного часу μt_d і μt_p та ймовірності p виникнення незнецінюючої відмови об'єкта (формули (2.39), (2.40), (2.52)) [42].

З рис. 4.5 помітно, що інтенсивність відмов $\Lambda(t_3, t_p, t_d)/\lambda^*$ системи з незнецінюючими відмовами ($p = 1$) суттєво залежить як від непоповнюваної складової t_p , такі від поповнюваної складової t_d комбінованого резерву часу. Тобто, ймовірність безвідмовного функціонування можна довести до необхідного рівня за рахунок будь-якої зі складових резервного часу.

Наведені графіки показують, що інтенсивність відмов систем з комбінованим резервом часу, як і систем зі структурним резервом, являються зростаючою функцією $\lambda^* t_3$, тобою дані системи слід відносити до класу «старіючих». При цьому у випадку незнецінюючих відмов ($p = 1$)

інтенсивність відмов зміниться повільно у великому діапазоні значень $\lambda^* t_3$ і в наближених розрахунках може вважатись постійною (рис. 4.5).

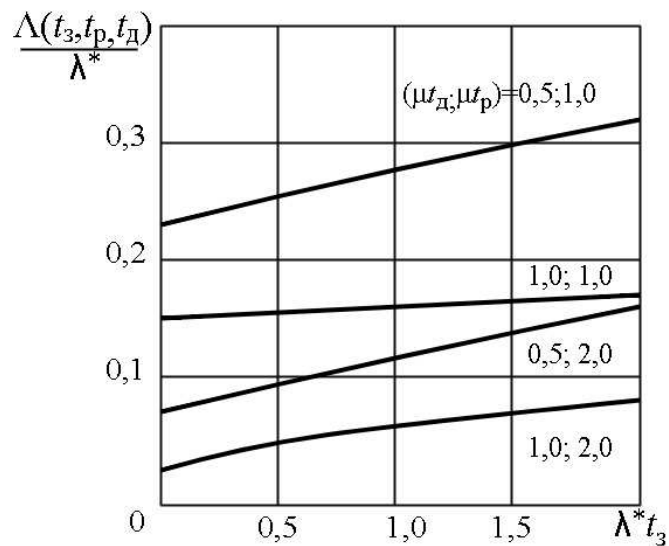


Рисунок 4.5 – Графіки залежності інтенсивності відмов системи з незнецінюючими відмовами ($p = 1$) від мінімального часу виконання завдання при різних значеннях комбінованого резерву часу

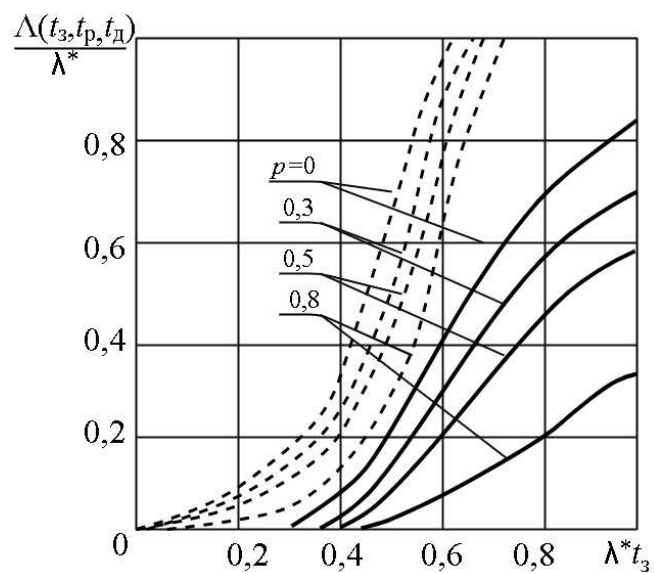


Рисунок 4.6 – Графіки залежності інтенсивності відмов системи з комбінованим резервом часу від мінімального часу виконання завдання при $\mu t_d = 0,5$ і різних значеннях ймовірності p :

----- $\gamma = \lambda^* t_p = 0,5$; ————— $\gamma = 1,0$

Ці результати дають можливість кількісно оцінити зменшення інтенсивності відмов зі збільшенням частки p незнецінюючих відмов і резерву часу t_p і t_d (рис. 4.6).

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 відносний 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:

$$W_Q = (Q(t_3, 0, 0)) / (Q(t_3, t_d, t_p)) = (1 - e^{-\lambda t_3}) / (1 - P(t_3, t_d, t_p)), \quad (4.2)$$

$$Q(t_3, t_d, t_p) = 1 - \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_3^* \rceil} (-1)^j ((\gamma - j\rho)^j / j!) (1 + ((\gamma - j\rho)/(j+1))) e^{-(j+1)\rho}, \quad (4.3)$$

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

На рис. 4.7 наведено графіки залежності $W_Q^{-1} = f(\lambda t_3)$, побудовані за допомогою виразів (4.2) і (4.3).

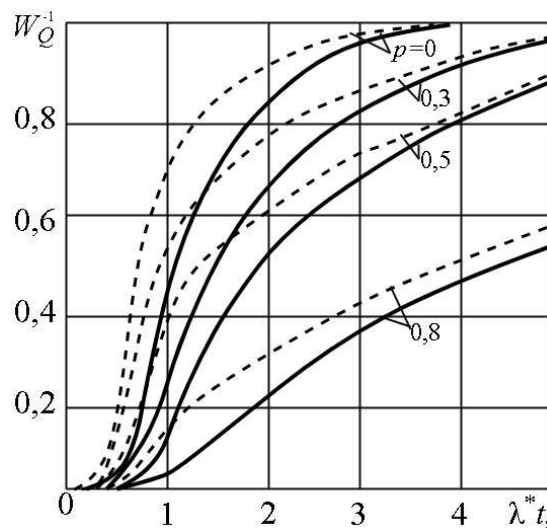


Рисунок 4.7 – Графіки залежності величини, зворотно виграшу в надійності за ймовірності зриву функціонування, від мінімального часу виконання завдання $\mu t_d = 0,5$ і різних значеннях ймовірності

p : ---- $\gamma = 0,5$; — $\gamma = 1,0$, $\gamma = \lambda^* t_p$

Аналіз графіків показує, що при малих значеннях $\lambda^* t_3$ виграш W_Q дуже високий, а зі збільшенням $\lambda^* t_3$ (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 складової 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. Це дозволяє порівнювати ефективність часового резервування з іншими методами підвищення надійності, зокрема, зі структурним резервуванням, використовуючи еквіваленти. Еквівалентом називається значення резерву часу, яке знецінює той же рівень ймовірності безвідмовного функціонування або іншого показника надійності, що і метод підвищення надійності, який порівнюється [42].

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. 4.8.

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. 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 $P(t_3, t_d, t_p)$.

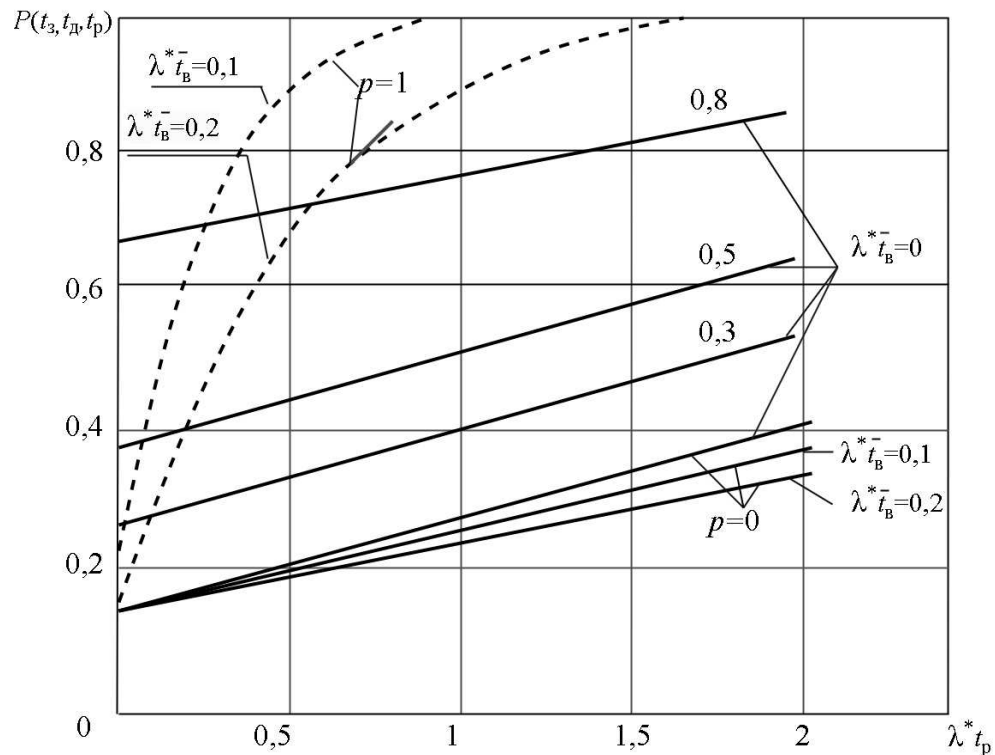


Рисунок 4.8 – Графіки залежності ймовірності безвідмовного функціонування від величини резерву часу t_p і мінімального часу виконання завдання t_3 при різних значеннях ймовірності p , середнього часу відновлення \bar{t}_b , $\lambda^* t_3 = 2$ та $\mu t_d = 0,5$

Тому основні зусилля щодо підвищення надійності функціонування системи доцільно направити 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 $\bar{T}_{\text{вз}}(t_3)$ (формула (2.33)). Дана характеристика корисна як допоміжна і зазвичай використовується для обчислення коефіцієнту використання виділеного резерву часу δ_3 , що обчислюється за формулою:

$$\delta_3 = \frac{\bar{T}_{\text{вз}} - t_3}{t_3}, \quad (4.4)$$

де t_3 – мінімальний час виконання завдання. Цей коефіцієнт характеризує середні відносні витрати резервного часу до виконання завдання.

На рис. 4.9 наведено графіки залежності коефіцієнта δ_3 від ймовірності p збереження попередніх результатів при $\lambda^* t_{\text{в}} = 0,1$ і $q = 0,9$. Аналіз цих графіків показує, що зі збільшенням ймовірності p (частки незнецінюючих відмов об'єкта в загальному їх потоці) суттєвого зниження коефіцієнта δ_3 можна досягти лише в системах з великим мінімальним часом виконання завдання (при $\lambda^* t_3 > 1$). Наприклад, рівень середнього відносного витрачання резерву часу t_p зі зміною p від нуля до 0,5 зменшується в 2,9 разів при $\lambda^* t_3 = 2$ і в 1,7 разів при $\lambda^* t_3 = 0,5$ (рис. 4.9).

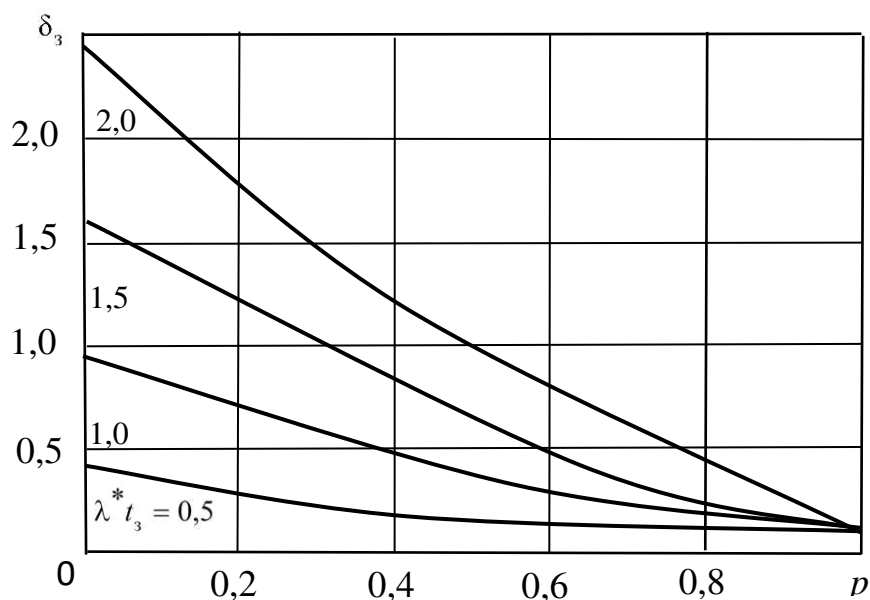


Рисунок 4.9 – Графіки залежності середнього відносного витрачання резерву часу до виконання завдання від ймовірності p збереження попередніх результатів

Для ЕКО з комбінованим резервом часу необхідно розроблювати спеціальні методи, направлені на скорочення частки знецінюючих відмов в загальному потоці відмов технічних та програмних засобів об'єктів і зменшення вторинних наслідків цих відмов.

Зокрема, одним з таких ефективних методів є розбиття завдання на послідовно виконувані етапи з запам'ятовуванням проміжних результатів (формули п. 2.4).

4.2.2. Урахування розбиття виконуваних завдань на етапи. Формула (2.56) отримана для оцінки надійності системи ОЧ, коли в об'єкті виникають незнецінюючі та частково знецінюючі відмови i типів, $i \geq 1$. 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 (2.56) приймає вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} P(t_3, t_d, t_p, n) = 1, & p = 1, \\ P(t_3, t_d, t_p, n) = \sum_{j=0}^{\lceil t_p/t_3 \rceil} (-1)^j \binom{n+j-1}{j} \exp[\lambda^* (1-p) t_3^* (1+j/n)] \times & (4.5) \\ \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{[\lambda^* (1-p) (t_p - j t_3^*/n)]^{k+j}}{(k+j)!}, & 0 \leq p_i < 1, \end{array} \right.$$

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

При $n = 1$ формула (4.5) зводиться до виразу (2.39).

Розрахунки за формулою (4.5) показують, що ймовірність безвідмовного функціонування системи суттєво залежить від кількості етапів виконання завдання n і ймовірності p збереження попередніх результатів (рис. 4.10).

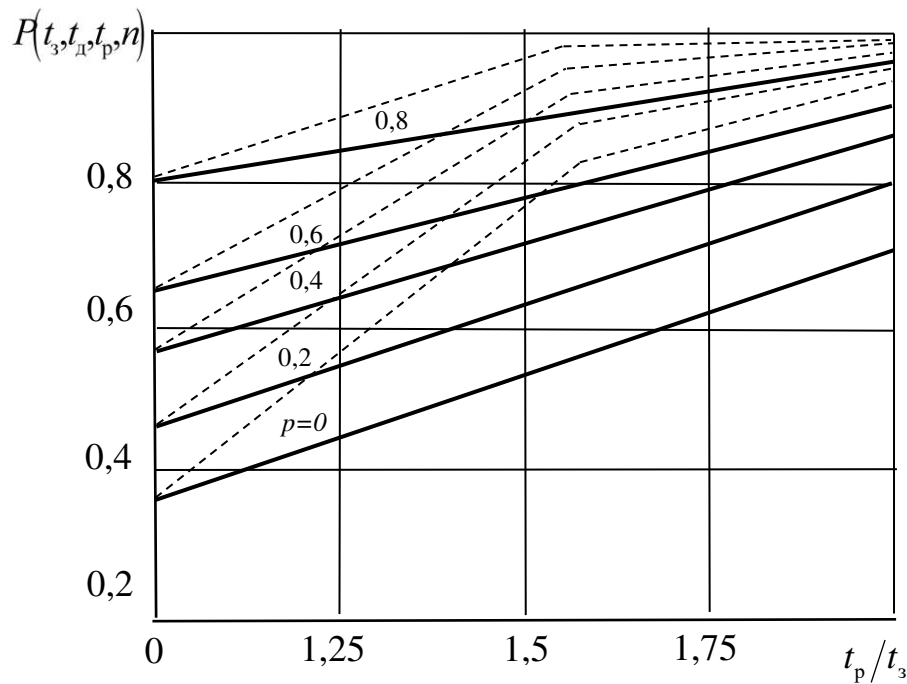


Рисунок 4.10 – Залежність ймовірності безвідмовного функціонування системи від величини резерву часу і ймовірності p збереження попередніх результатів: $(\bar{t}_b = 0; \lambda q t_3 = 1; q = 0,9)$ — при $n=1$; - - - - при $n=2$

При цьому виграш в надійності за ймовірністю безвідмовного функціонування

$$W_p = P(t_3, t_d, t_p, 2) / P(t_3, t_d, t_p, 1)$$

при розбитті виконуваного завдання на два етапи, різко зростає із збільшенням резерву часу, а потім спадає (рис. 4.11).

Отже, існує деяке оптимальне значення резерву часу, при якому забезпечується невеликий виграш W_p при розбитті завдання на етапи. Графіки рис. 4.11 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. 4.12 видно, що суттєве зниження відносного витрачання резерву часу δ_3 (формула 4.4) можна забезпечити при розбитті завдання навіть на невелике число етапів ($n = 3 \div 4$).

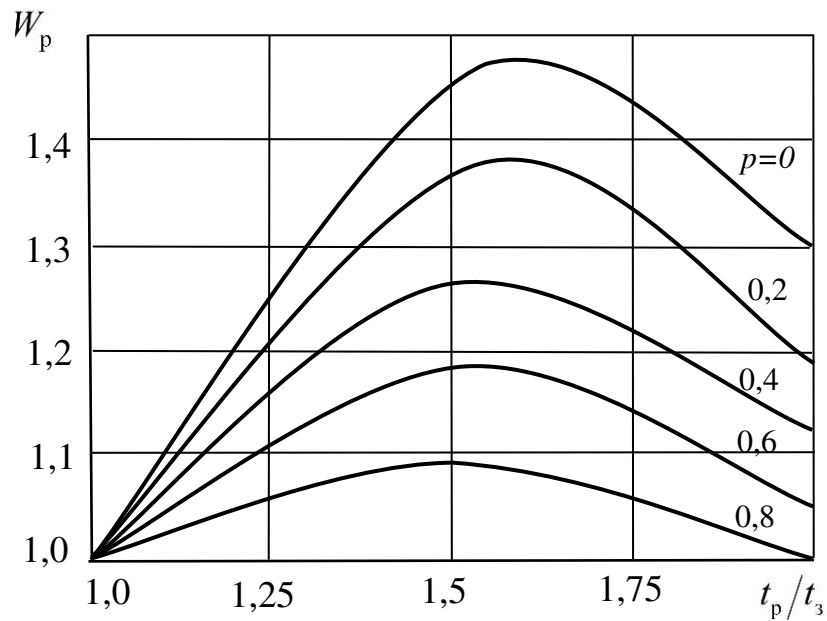


Рисунок 4.11 – Залежності виграшу в надійності при розбитті завдання на два етапи від величини резерву часу і ймовірності p збереження попередніх результатів ($\bar{t}_b = 0$; $\lambda q t_3 = 1$; $q = 0,9$)

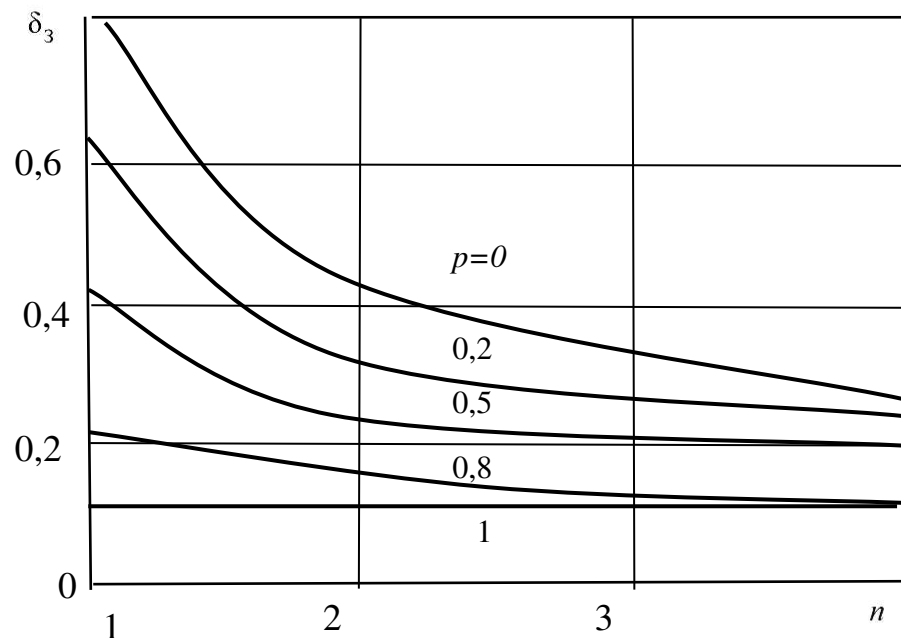


Рисунок 4.12 – Залежності середніх відносних витрат резерву часу від кількості етапів n при різних значеннях ймовірності збереження попередніх результатів ($\lambda q \bar{t}_b = 0,1$; $\lambda q t_3 = 1$; $q = 0,9$)

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.

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.

На рис. 4.13 наведено графіки залежності ймовірності $P(t_3, t_d, t_p, n)$ від значень непоповнюваної t_d і поповнюваної t_p ($q = \exp - \mu t_d$) комбінованого резерву часу при різній кількості етапів n і $t_3 = \text{const}$, $p = 0$ (формули (2.39), (4.5)).

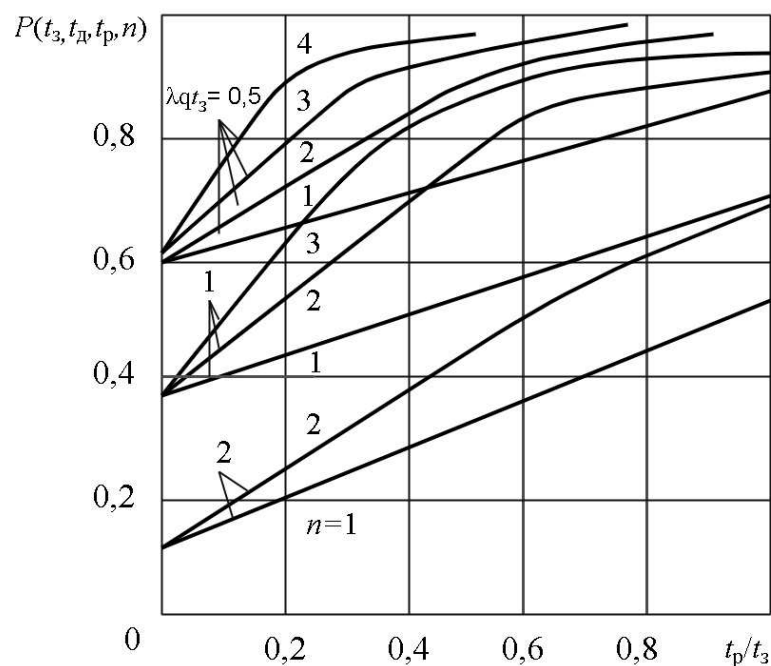


Рисунок 4.13 – Графіки залежності ймовірності безвідмовного функціонування системи з комбінованим резервом часу від значень t_p і t_d ($q = \exp - \mu t_d$) при розбитті виконуваного завдання

на етапи ($t_3 = \text{const}$, $p = 0$)

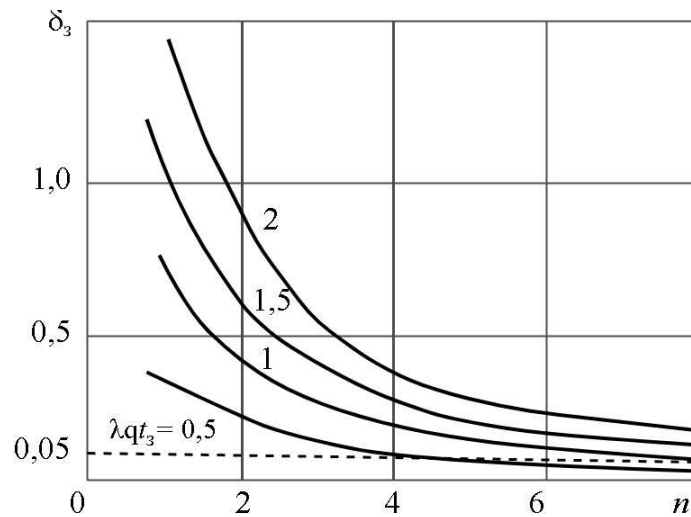


Рисунок 4.14 – Графіки залежності середнього відносного витрачання резерву часу δ_3 від кількості етапів n при різних значеннях

$$\lambda qt_3 \ (t_3 = \text{const}, \ p = 0)$$

Аналіз графіків показує, що ймовірність безвідмовного функціонування системи суттєво залежить як від значень параметрів резервного часу t_d і t_p , так і від кількості етапів n . Наприклад, зменшення значення λqt_3 в 4 рази при $t_3 = \text{const}$ і $t_p = 0$ за рахунок збільшення поповнювано складової t_d призводить до збільшення ймовірності $P(t_3, t_d, t_p, n)$ з 0,135 до 0,6. Якщо при цьому збільшувати і непоповнювану складову резерву часу t_p і розбивати завдання на етапи, то виграш надійності щодо ймовірності безвідмовного функціонування буде ще більшим. Отже, ймовірність $P(t_3, t_d, t_p, n)$ 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 (формула (4.4)). Як видно з рис. 4.14, суттєвого зниження коефіцієнта δ_3 можна досягти при невеликих значеннях n . Зокрема, для $\lambda q t_3 = 1$ рівень середнього відносного витрачання резервного часу досягає 5% при $n = 10$, а для $\lambda q t_3 = 0,5$ – при $n = 5$. Чим більше n , тим більше завдання t_3 можна виконати, зберігаючи незмінним коефіцієнт δ_3 .

4.3. Висновки за результатами комплексного оцінювання показників надійності об'єктів

В попередньому підрозділі наведено результати кількісного оцінювання надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з використанням науково-методичного апарату, розробленого в розд. 2 та 3. Особливостями запропонованого в дисертації математичного апарату є те, що при розрахунках показників надійності вдалось врахувати сумісний вплив на надійність функціонування обладнання як «агресивних» факторів (збоїв і стійких відмов технічних та програмних засобів), так і факторів, направлених на нейтралізацію цього негативного впливу, зокрема, часового резервування.

Метою даного підрозділу є використання цих результатів для обґрунтування висновків та рекомендацій щодо поліпшення показників надійності функціонування об'єктів ЕКО.

4.3.1. Ефективність комбінованого часового резервування і доцільність його використання для поліпшення показників надійності об'єктів. Відмінною

особливістю даної дисертації є детальне дослідження комбінованого часового резервування – відносно мало вивченого методу забезпечення нормального функціонування об'єктів ЕКО електронної комунікаційної мережі, при якому сумісно використовуються два різних за способами витрачення і поповнення резерву часу: поповнюваний t_d і непоповнюваний t_p . Проведення такого дослідження стало можливим завдяки тому, що розглядаєма система ОЧ (об'єкти ЕКО) містить резерв часу з двома чітко вираженими складовими, певним чином взаємодіючих між собою, які встановлюють одночасно обмеження t_d на час кожної перерви у функціонуванні системи (поповнювана складова) та обмеження t_p на сумарний час кожного відновлення працездатності об'єкта, а також і інші види непродуктивних витрат (втрат) оперативного часу до виконання завдання (непоповнювана складова).

В попередньому підрозділі (п. 4.2) були наведені результати кількісного оцінювання показників надійності при використанні комбінованого часового резервування і показано, що надійність функціонування об'єктів суттєво залежить як від поповнюваної t_d , так і від непоповнюваної t_p складових загального резерву часу (t_d, t_p) . Це означає, що ймовірність безвідмовного функціонування системи ОЧ завжди можна довести до необхідного рівня, обираючи відповідні значення параметрів t_d і t_p резервного часу.

Використання поповнюваної складової t_d загального резерву часу є ефективним засобом боротьби зі збоями технічних та програмних засобів обладнання електронних комунікаційних мереж, оскільки досліджувана система ОЧ в процесі виконання завдання допускає незначні перерви без втрати якості функціонування (при $t_b \leq t_d$). Зокрема, такий допустимий (резервний) час t_d передбачено в алгоритмах протоколів маршрутизації для усунення наслідків збоїв [173, 174].

Непоповнювана складова t_p комбінованого резерву часу (t_d, t_p) використовується для компенсації витрат (втрат) оперативного часу, обумовлених витратами часу на ремонти об'єкта при стійких відмовах, а інколи і на повторення частини або всього попереднього напрацювання при знецінюючих відмовах.

Таким чином, систему (об'єкт ЕКО) з комбінованим резервом часу можна розглядати як своєрідний перетворювач потоку відмов: вхідним є потік відмов та збоїв технічних і програмних засобів об'єкта, а вихідними – потік відмов системи ОЧ. За рахунок дії резервів часу t_d і t_p на кожному етапі перевірки часових обмежень вихідний потік відмов системи ОЧ містить в середньому менше число відмов (зривів функціонування) на одиницю часу, чим вхідний потік, – виникає розрідження вихідного потоку. Ефект розрідження являється біль сильнішим, чим більше виділяється та використовується резервів часу t_d і t_p .

Слід відмітити, що при використанні комбінованого часового резервування ефект розрідження вихідного потоку відмов системи ОЧ проявляється в максимальній степені, оскільки сумісне використання поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових загального резерву часу (t_d, t_p) забезпечує ефективну боротьбу як зі збоями, так і з стійкими відмовами.

Таким чином, використовуючи результати кількісного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу (п. 4.2), можна зробити висновок про достатньо високу ефективність цього методу забезпечення нормального функціонування об'єктів в умовах відмов і збоїв технічних та програмних засобів і доцільності його використання для поліпшення показників надійності.

4.3.2. Деякі особливості та властивості моделей оцінювання надійності функціонування об'єктів з комбінованим часовим резервуванням. Проведене в п. 4.2 теоретичне дослідження надійності функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервом часу дозволило виявити деякі важливі загальні та

часткові властивості, притаманні даному методу резервування. Наведемо найбільш важливі з них.

Аналіз результатів комплексного оцінювання показників надійності (п. 4.2) показав, що інтенсивність відмов $\Lambda(t_3, t_d, t_p)$ об'єктів з комбінованим резервом часу, як і систем зі структурним резервуванням, являється яскраво вираженою функцією від тривалості завдання t_3 , тобто такі системи ОЧ є «старіючими» (рис. 4.5, 4.6).

При цьому система ОЧ з незнецінюючими відмовами і системи зі структурним резервом володіють загальною властивістю: при збільшенні часу роботи (тривалості завдання t_3) інтенсивності відмов резервованої і нерезеровваної систем зближуються. На відмінність від цього випадку системи з комбінованим резервом часу і знецінюючими відмовами (при $p = 0$) є «старіючими» не на всій піввісі інтервалу $(0, \infty)$, а тільки в інтервалі $(0, t_p)$, тобто при збільшенні тривалості завдання t_3 інтенсивність відмов $\Lambda(t_3, t_d, t_p)$ збільшується і при $t_3 = t_p$ досягає значення інтенсивності відмов об'єкта без резерву часу, залишаючись в подальшому постійною [175].

Другою важливою властивістю, загальною для структурного та комбінованого часового резервування являється той факт, що при збільшенні часу функціонування (збільшенням тривалості завдання t_3) виграш в надійності в обох системах зменшується («парадокс резервування») (рис. 4.7). При цьому в об'єктах з комбінованим резервом часу виграш падає швидше, ніж в системах з відновлюваним структурним резервом [42, 43].

Важливою особливістю отриманих в розд. 2 розрахункових формул для основних показників надійності систем з комбінованим резервом часу є те, що вони враховують можливість виникнення різних за своїми наслідками типів відмов об'єкта, тобто розглядається загальний потік відмов, який містить як незнецінюючі (з ймовірністю p), так і знецінюючі (з ймовірністю $(p - 1)$) відмови.

Такий підхід до побудови моделей оцінювання надійності системи з часовим резервуванням являється більш загальним у порівнянні з відомими результатами в даній предметній галузі, оскільки відомі моделі надійності враховують тільки незнецінюючі або тільки знецінюючі відмови.

Вказана вище особливість триманих в розд. 2 наукових результатів дозволила кількісно оцінити вплив наслідків різних типів відмов на надійність функціонування об'єктів ЕКО. Результати теоретичного дослідження показали (див. п. 4.2), що навіть невеликий процент знецінюючих відмов об'єкта в загальному їх потоці може помітно погіршити показники надійності функціонування і призвести до зриву виконання завдання (рис. 4.8). При збільшенні частки знецінюючих відмов (зі зменшенням ймовірності p) суттєво погіршується також коефіцієнт використання виділеного резервного часу δ_3 (формула (4.4)), який характеризує середні відносні витрати резервного часу до виникнення завдання, що знижує ефективність часового резервування.

Аналіз графіків рис. 4.8 дозволяє зробити ще один висновок, важливий для інженерної практики: в системах ОЧ, в яких переважає знецінюючі відмови, ймовірність безвідмовного функціонування $P(t_3, t_d, t_p)$ суттєво слабше залежать від часу відновлення працездатності об'єкта, ніж в системах з незнецінюючими відмовами. Тому в таких системах основні зусилля щодо підвищення надійності функціонування доцільно направити на розробку спеціальних методів, які дозволяють скоротити частку знецінюючих відмов в загальному потоці відмов і збоїв технічних та програмних засобів, а також захистити об'єкт від вторинних наслідків цих відмов.

В п.п. 4.2.2 показано, що одним з таких ефективних методів є розбиття завдання мінімальною тривалістю t_3 на послідовно виконувані етапи з запам'ятовуванням проміжних результатів (формула (4.5), рис. 4.10 – 4.14).

4.4. Рекомендації щодо практичного використання результатів дисертаційного дослідження для поліпшення показників надійності об'єктів

Отримані в попередніх розділах результати комплексного оцінювання надійності функціонування об'єктів ЕКО в умовах відмов та збоїв технічних і програмних засобів дозволяють сформулювати ряд висновків та рекомендацій щодо практичного використання результатів дисертаційного 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 даній дисертації розвиток, що дозволяє зробити висновок про ефективність 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. 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 обґрунтуванні вибору значень параметрів (зокрема, інтенсивності відновлення працездатності, значень поповнюваної t_d і

непоповнюваної t_p складових комбінованого резерву часу та інше), визначаючих надійність функціонування ЕКО, доцільно використовувати розроблений в дисертації 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_3 . 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 (п. 2.4 і п.п. 4.2.2.) дозволяють 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 (п.п. 4.2.2), 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 дисертації отримані розрахункові співвідношення для визначення оптимального числа етапів завдання n_0 (формула (2.58)) і середнього часу виконання завдання $\bar{T}_{вз}(t_3, n_0)$ при оптимальному розбитті (формула (2.60)), які можуть найти практичне використання в інженерних розрахунках.

3. Проведене в даній дисертації дослідження показало достатньо високу ефективність використання комбінованого часового резервування для поліпшення показників надійності об'єктів ЕКО при обраному способі взаємодії поповнюваної t_d 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 [175]. Аналіз довів (п. 4.2), що при виборі найбільш ефективного методу замість часового резервування або разом з ним доцільно використовувати так звані еквіваленти. Еквівалентом називається значення резерву часу, яке забезпечує той самий рівень показника надійності, що і порівнюваний метод підвищення надійності. Наприклад, при порівнянні ефективності часового резервування зі структурним, еквівалентне значення резерву часу визначається за рівнянням: $P(t_z, t_d, t_p) = P(t_z, m_c)$, де $P(t_z, m_c)$ – ймовірність безвідмовного функціонування об'єкта зі структурним резервуванням кратністю m_c [176]. 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 до розділу 4

1. Викладено загальну методику комплексного оцінювання показників надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим часовим резервуванням при відмовах та збоях технічних і програмних засобів, яка є узагальненням (синтезом) отриманих в процесі дисертаційного дослідження наукових та прикладних результатів. Дана методика дає можливість користувачам проводити кількісні розрахунки показників надійності об'єктів ЕКО на всіх етапах життєвого циклу обладнання ЕКМ. Розрахунки, що проводяться з використанням запропонованого в дисертації науково-методичного апарату, дозволяють кількісно обґрунтувати найбільш ефективні шляхи і методи забезпечення

необхідного рівня надійності функціонування ЕКО в умовах комплексної взаємодії різних факторів.

2. Проведене теоретичне дослідження надійності функціонування об'єктів ЕКО з комбінованим резервуванням часу з використанням розроблених в дисертації нових моделей оцінювання 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 сумісному використанні поповнюваної t_d і непоповнюваної t_p складових загального резерву, що дозволило зробити висновок щодо ефективності цього методу резервування і доцільності його використання для поліпшення показників надійності.

3. На підставі проведеного кількісного аналізу обґрунтовано низку висновків і дано рекомендації щодо практичного використання результатів дисертаційного дослідження, зокрема:

- сучасне електронне комунікаційне обладнання ЕКМ не повністю задовольняє заданим вимогам щодо надійності, оскільки ці вимоги формувались без достатнього обґрунтування і, зокрема, без урахування збоїв програмних та технічних засобів; проведене в дисертації дослідження довело, що комбіноване часове резервування забезпечує поліпшення всіх показників надійності, оскільки сумісне використання поповнюваної і непоповнюваної складових резервного часу дозволяє ефективно боротися як зі збоями, так і з стійкими відмовами;

- важливими практичним завданням для підвищення надійності є вжиття спеціальних заходів щодо зменшення частки знецінюючих відмов, а також використання можливості розбиття виконуваного об'єктом завдання на декілька послідовних етапів з запам'ятовуванням проміжних результатів, що дозволить суттєво зменшити втрати оперативного часу і підвищить ефективність часового резервування; при розв'язанні цих задач доцільно

використовувати математичні моделі, розроблені в дисертації (п. 2.4 і п.п. 4.2.2);

– для забезпечення необхідного рівня надійності ЕКО наявних та перспективних ЕКМ доцільно разом з часовим резервуванням використовувати і інші методи підвищення надійності, зокрема, методи структурного та інформаційного резервування.

ВИСНОВКИ

Актуальність тематики дисертаційної роботи визначається наявністю на даний час протиріч між високими вимогами до показників надійності наявного ЕКО ЕКМ і його реальною експлуатаційною надійністю (на практиці) та між обмеженими можливостями відомих наукових результатів і необхідністю сумісного урахування факторів, що впливають на ЕКО ЕКМ (у теорії).

Вирішено у дисертації наукове завдання, яке полягає в удосконаленні науково-методичного апарату комплексного оцінювання надійності ЕКО на основі декомпозиції загальної моделі функціонування на дві взаємопов'язані моделі: регенеруючого і марківського випадкових процесів – з наступним синтезом часткових результатів, що забезпечує сумісне урахування відмов і збоїв обладнання та їх наслідків, характеристик часової надлишковості і обмеженості вихідної інформації. Взаємозв'язок цих моделей забезпечується тим, що результат дослідження першої моделі використовується як вихідна інформація при дослідженні другої моделі, що дозволяє отримати результат розв'язання загального наукового завдання у виді синтезу часткових результатів дослідження вказаних вище моделей.

Запропонований підхід дозволяє уникнути необхідності побудови громіздкої загальної математичної моделі функціонування об'єкта ЕКО з комбінованим резервом часу, мало придатною для практичного дослідження; він дає можливість помітно спростити розв'язання сформульованої наукового завдання та отримати сукупність нових розрахункових формул для основних показників надійності, що дозволяють здійснювати комплексне оцінювання надійності ЕКО ЕКМ.

Розроблено удосконалений науково-методичний апарат (методи та моделі) комплексного оцінювання надійності функціонування ЕКО ЕКМ, сутність удосконалення якого полягає у побудові нових аналітичних моделей

при апріорній невизначеності (обмеженій вихідній інформації). Особливістю цих моделей є те, що вони дозволяють отримати точні нижні та верхні границі показників надійності, які характеризують безвідмовність, ремонтпридатність і процес функціонування ЕКО.

Таке вдосконалення визначає новизну отриманих наукових результатів та їх відмінність від відомих. Ці результати містять удосконалені методи та методику, а також отримані на їх основі аналітичні моделі надійності ЕКО ЕКМ.

Теоретичні положення, розроблені у дисертаційній роботі, та отриманий на їх основі науково-методичний апарат, в сукупності являють собою методологічні основи комплексного оцінювання показників надійності сучасного ЕКО ЕКМ. Запропонований науковий підхід та отримані результати у цілому визначають один з перспективних напрямів робіт, що мають важливе наукове та технічне значення. Вони дають можливість обґрунтовано обирати найбільш ефективні шляхи та методи, які забезпечують необхідні (задані) значення показників надійності функціонування такого класу складних технічних систем, якими є ЕКО ЕКМ.

Розроблений у дисертації науково-методичний апарат комплексного оцінювання показників надійності ЕКО ЕКМ з урахуванням сукупності основних факторів, які суттєво впливають на надійність функціонування обладнання в реальних умовах експлуатації, дає можливість вирішувати важливі практичні задачі, в процесі удосконалення наявного та розробки перспективного ЕКО ЕКМ. Зокрема, до таких задач можна віднести:

проведення кількісної верифікації надійності ЕКО щодо відповідності встановленим вимогам за умов використання різних типів надлишковості;

ідентифікування найменш надійних об'єктів та підсистем наявної ЕКМ та обґрунтування ефективних шляхів та методів їхнього підсилення;

проведення якісного і кількісного аналізу надійності функціонування ЕКО з комплексним урахуванням найбільш суттєвих факторів, що впливають на надійність обладнання, на етапах модернізації наявних та розробки

перспективних ЕКМ;

наукове обґрунтування практичних рекомендацій для посилення стійкості та безперебійної роботи ЕКО при модернізації та створенні ЕКМ.

Одним із перспективних напрямків подальших досліджень у цій галузі є обґрунтування шляхів і методів зниження частоти збоїв у наявному та майбутньому ЕКО ЕКМ, створення системи автоматичного відновлення після їх виникнення, а також розробка ефективних способів нейтралізації їхніх наслідків для безперебійної роботи ЕКО ЕКМ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Левченко О.В. Система забезпечення інформаційної безпеки держави у воєнній сфері: основи побудови та функціонування: монографія. Житомир: Видавець ПП “Євро-Волинь”, 2021. 172 с.
2. Писаренко Т.В., Кваша Т., Гаврис Т. Аналіз світових технологічних трендів у військовій сфері: монографія. Київ: УкрІНТЕІ, 2021. 110 с.
3. Круглов В.В., Терещенко Д.А. Інновації в системі державного управління. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2023. № 2. С. 74 – 79. DOI: 10.20998/2227-6890.2023.2.13.
4. Сакович Л.М., Криховецький Г.Я., Курята Я.Е. Оцінка структурної надійності систем зв'язку. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2023. №. 2 С. 210 – 215. DOI: 10.26906/SUNZ.2023.2.210.
5. Захаржевський А.Г. Модель оцінювання якості функціонування системи керування інфокомунікаційною мережею спеціального призначення *Зв'язок*, № 5, 2023 с. 3 – 9. DOI: 10.31673/2412-9070.2023.050308.
6. Галан Л., Смоляр Ю. Інноваційні тенденції розвитку телекомунікаційного ринку України на прикладі провідних компаній. *Економіка та суспільство*. 2022. № 43. DOI:10.32782/2524-0072/2022-43-46.
7. Тюндер І.С. Концепція розвитку телекомунікацій в Україні. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2022. № 1 (271) С. 41 – 46. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-271-1-41-46>.
8. Musa I.R. Digital technologies in the means of communication *Al-academy*.2023. P. 53 – 70. DOI:10.35560/jcofarts1211.
9. Масесов М.О., Бондаренко І.О., Садиков О.І., Макарчук В.І. Методика оцінки стійкості системи військового зв'язку. *Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації*. 2016. № 1.

С. 94 – 102. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe (дата звернення: 11.9.2023).

10. Макаров С.А., Бесяк С.П., Висоцький О.В. Оцінка стійкості системи зв'язку та радіотехнічного забезпечення. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 1(61). С. 44 – 50. DOI: 10.30748/soivt.2020.61.05.

11. Болдуєв М.В., Болдуєва О.В., Лищенко О.Г. Сучасні підходи до забезпечення надійності та безпеки інформації в корпоративних телекомунікаційних системах. *Агросвіт*. 2024. № 13. С. 40 – 47. DOI: 10.32702/2306-6792.2024.13.40.

12. Reliability Analysis Software for the Telecommunications Industry. Telecom: веб ресурс. URL: <https://relyence.com/industries/telecom/> (дата звернення: 1.8.2024).

13. Гуменний Д.О. Надійність комп'ютерних систем: методичні вказівки. Київ: КНУБА, 2024. 52 с.

14. Барабаш О., Аушева Н., Складанний П., Іваніченко Є., Довженко Н. Технічні аспекти побудови відмовостійкої інфраструктури сенсорної мережі. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка* 2024. № 4(24). С. 185 – 195. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.24.185195>.

15. Reliability Analysis Software for the Telecommunications Industry. Telecom: веб ресурс. URL: <https://relyence.com/industries/telecom/> (дата звернення: 7.05.2023).

16. Парасюк В.І., Кондратьєв А.В. Основи надійності технічних систем: навч. посіб. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2010. 72 с.

17. Могилевич Д.І., Кононова І.В., Климович О.К. Методика комплексної оцінки надійності телекомунікаційного обладнання мереж зв'язку. *Військово-технічний збірник*. 2020. № 23. С. 50–57. DOI:10.33577/2312-4458. 23.2020.50-57.

18. Бобало Ю.Я. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. 300 с.

19. Василюшин В.І., Женжера С.В., Чечуй О.В., Глушко А.П. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем: навч. посіб. Харків: ХНУПС, 2018. 268 с.

20. Могилевич Д.І., Вишнівський В.В., Креденцер Б.П. Методика визначення граничних значень показників якості технічного обслуговування систем епізодичного використання з часовим резервом при обмеженій інформації про розподіл напрацювання до відмови. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2012. № 2. С. 55 – 63.

21. Креденцер Б.П., Могилевич Д.І. Оцінка надійності телекомунікаційного обладнання мережі спеціального призначення з урахуванням збоїв. *Збірник наукових праць ВІТІ ім. Героїв Крут*. 2019. № 1. С. 41 – 48.

22. Креденцер Б.П., Міночкін А.І. Оптимізація резервування при комплексному використанні різних видів надмірності. *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ КІП*. 2008. № 1. С. 52 – 59.

23. Креденцер Б.П., Буточнов О.М., Міночкін А.І., Могилевич Д.І. Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація: монографія. Київ: Фенікс, 2013. 342 с.

24. Ленков С.В., Толлок І.В., Ленков Є.С., Банзак Г.В., Жиров Г.Б., Цицарев В.М. Використання імітаційних статистичних моделей при оптимізації технічного обслуговування і ремонту складної військової техніки та її угруповань. Ч.1: Імітаційна статистична модель процесу технічного обслуговування і ремонту складної військової техніки: монографія. Одеса: Бондаренко М.О., 2019. 132 с.

25. Гнатюк С.Є., Сакович Л.М., Рижов Є.В. Кількісна оцінка надійності програмно-керованих засобів зв'язку. *Information Technology and security*. Київ, 2016. Т. 4, № 1. С. 84 – 90. URL: https://www.researchgate.net/publication/343437374_Distribution_models_of_information_resources_in_ACS_special_purpose/fulltext/5f2a0ccf92851cd302dc04fb/Distribution-models-of-information-resources-in-ACS-special-purpose.pdf (дата звернення: 3.04.2023).

26. Жердєв М.К., Ленков С.В., Креденцер Б.П. Фізичні основи теорії надійності: підручник. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2008. 215 с.
27. Ленков С.В. Прогнозування надійності складних об'єктів радіоелектронної техніки та оптимізація параметрів їх технічної експлуатації з використанням імітаційних статистичних моделей: монографія. Одеса: ВМВ, 2014. 247 с.
28. Волков О.Є., Гнатюк С.Є., Одарченко Р.С. Метод оцінки значень показників надійності об'єктів зі змінною структурою. *Control Systems and Computers*. 2023. № 1 (301). С. 33 – 53. DOI: <https://doi.org/10.15407/csc.2023.01.033>.
29. Барковський В.В., Барковська Н.В., Лопатін О. Теорія ймовірності та математична статистика: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2021. 424 с.
30. Pavlov N. Some Transmuted Software Reliability Models. *Journal of Mathematical Sciences and Modelling*. 2019. Vol. 2, No 1. P. 64 – 70. DOI: <https://doi.org/10.33187/jmsm.434277>.
31. Ahmed N.O., Bhargava B. From Byzantine Fault-Tolerance to FaultAvoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2020. № 8(3). P. 847 – 860. DOI: 10.1109/TCC.2018.2814989.
32. Haque M.A., Ahmed N.O. Key Issues in Software Reliability Growth Models. *Recent Advances in Computer Science and Communications*. 2020. Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.2174/2666255813999201012182821.191>.
33. Hasan O., Ahmad W., Pervez U. Qadir Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. Vol. 78. P. 191 – 215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.11.008>.
34. Bazargur B., Bataa O., Budjav U. Reliability Study for Communication System: A Case Study of an Underground Mine. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No 2. P. 821. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13020821>.
35. Littlewood B., Popov P., Strigini L. Modelling the effects of combining

diverse software fault removal techniques. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2000. Vol. 26, No 12. P. 1157–1167. DOI: 10.1109/32.888629.

36. Kim Y., Song K., Pham H., Chang I. A Software Reliability Model with Dependent Failure and Optimal Release Time. *Symmetry*. 2022. № 14 (2):343 P. 2 – 22. DOI: 10.3390/sym14020343.

37. 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.

38. Raghuvanshi K., Agarwal A., Jain K. A time-variant fault detection software reliability model. *SN Applied Scin. Springer*. 2021. № 3 (18). DOI: 10.1007/s42452-020-04015-z.

39. Rausand M., Barros A., Hoyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. *Wiley Series in Probability and Statistics*. 2020. 864 p.

40. Erto P., Giorgio M., Lepore A. The Generalized Inflection S-Shaped Software Reliability Growth Model. *IEEE Transactions on Reliability*. 2020. № 69 (1). P. 228 – 244. DOI: 10.1109/TR.2018.2869466.

41. Tandon N., Patel N. An efficient implementation of multichannel transceiver for manet multinet environment. *Communication and Networking Technologies*. 2019. P. 1 – 6. DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944505.

42. Тихонов М.В., Кононова І.В. Комплексна оцінка показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74) № 1. С. 45 – 50. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/07>.

43. Тихонов М.В. Удосконалений метод побудови моделей комплексної оцінки надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу. *Хмельницький національний університет. Серія: Технічні науки*. 2025. Том. 347. №2. С. 78–90.

44. Тихонов М.В. Удосконалена методика побудови двосторонніх оцінок показників надійності функціонування комунікаційного обладнання мереж зв'язку. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія Технічні науки*. 2025. С. 61 – 67.

45. Тихонов М.В., Кононова І.В. Методика комплексного оцінювання показників надійності електронного комунікаційного обладнання з комбінованим часовим резервуванням. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 3 (1), № 3. С. 13 – 18. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-1>.

46. Про електронні комунікації: закон України від 30 червня 2021 року N 1591-IX. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/t201089> (дата звернення: 13.11.2023).

47. Коновалова Х. Майбутнє для телекому. Як Україна планує розвивати якість інтернету та мобільного зв'язку під час війни: веб-сайт. URL: https://delo.ua/telecom/maibutnje-dlya-telekomu-yak-ukrayina-planuje-rozvivati-yakist-internetu-ta-mobilnogo-zvyazku-pid-cas-viini-432577/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 12.10.2023).

48. Наталі Н.О. Телеграм-канали як інструменти стратегічної комунікації: дослідження медіа-ландшафту в Україні під час війни. *Вісник Донецького національного університету імені Василя Стуса. Серія політичні науки*. 2023. № 8. С. 53 – 60. DOI: <https://doi.org/10.31558/2617-0248.2023.8.8>.

49. Shiimoto K., Cerroni W., Galis A. Telecom Software, Network Virtualization, and Software Defined Networks. *IEEE Communications Magazine*. №58(7). P. 42 – 43. DOI: 10.1109/MCOM.2020.9161993.

50. Coverity Scan Open Source Integrity Report. *Coverity, Inc. – Coverity White Paper*. 2011. 24 p. URL: <https://scribd.com/document/494938545/Coverity-Scan-2011-Open-Source-Integrity-Report/> (дата звернення: 12.10.2023).

51. Castañón G., Sarmiento A.M., Ramirez-Velarde R., Aragón-Zavala A. Software tool for network reliability and availability analysis. *Wire Journal International. Tecnológico de Monterrey*. № 42 (9). P. 15 – 28. URL:

https://www.researchgate.net/publication/228881787_Software_tool_for_network_reliability_and_availability_analysis (дата звернення: 7.03.2023).

52. Burke D. All Circuits are Busy Now: The 1990 AT&T Long Distance Network Collapse. *CSC440-01*. URL: https://users.csc.calpoly.edu/~jdalbey/SWE/Papers/att_collapse (дата звернення: 10.05.2024).

53. Інформаційний дайджест: веб-сайт. URL: <https://spacecenter.gov.ua/contents/uploads/2016/02/Informatsijnyj-dajdzhest-26.pdf> (дата звернення: 12.10.2024).

54. На британській карті видно несправності системи ГЛОНАСС: веб-сайт. URL: https://www.bbc.com/ukrainian/ukraine_in_russian/2014/04/140410_ru_s_glonass_faults_uk (дата звернення: 12.10.2024).

55. NTSB випускає примітку щодо проблеми з кермом у Boeing 737: веб-сайт. URL: <https://www.aeroflap.com.br/uk/ntsb-Boeing-737/> (дата звернення: 10.10.2024).

56. На орбіті Землі відбувся масштабний збій супутників через помилку науковців: веб-сайт. URL: <https://noworries.news/na-orbiti-zemli-vidbuvsya-masshtabnyj-zbij-suputnykiv-cherez-pomyлку-naukovcziv/> (дата звернення: 23.01.2025).

57. Software Reliability Engineering: A Roadmap. Minneapolis, MN, USA 23-25 May 2007. Future of Software Engineering . 10.1109/FOSE.2007.24

58. Могилевич Д.І., Сбоев Р.Ю. Аналіз функціональної безпеки обладнання електронних комунікаційних системи. *Information Technology and Security*. 2023. Vol. 11, Iss. 1 (20) С. 96 – 102. DOI: 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283816.

59. Littlewood B., Strigini L. Software reliability and dependability: a roadmap. *Proceedings of the Conference on The Future of Software Engineering*. 2000. P. 175 – 188. DOI: <https://doi.org/10.1145/336512.3365>.

60. Mendiratta V.B. Reliability Analysis in Telecommunications. *Notices of the American Mathematical Society*. 2020. Vol. 67, № 6. P. 867 – 875. DOI: <http://doi.org/10.1090/noti2095>.

61. Kumari S., Kumar S., Kadry S., Tanir D. Maintainable stochastic communication network reliability within tolerable packet error rate. *Computer Communications*. 2021. Vol. 178, № 1, P. 166 – 168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.07.023>.

62. Agrawal V., Achuthan B., Ansari A., Tiwari V. Threat/hazard analysis and risk assessment: a framework to align the functional safety and security process in automotive domain. *SAE Int. J. Transp. Cyber. & Privacy*. 2021. Vol. 4, № 2. DOI: <https://doi.org/10.4271/2021-01-0148>.

63. Peserico G., Morato A., Tramarin F., Vitturi S. Functional safety networks and protocols in the industrial internet of things era. *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21186073>.

64. Сенів М. М., Роїк О. О. Засоби розрахунку показників надійності програмного забезпечення на підставі моделей з урахуванням недосконалого відлагодження. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. Т. 31, № 6. С. 87 – 91. URL: <https://doi.org/10.36930/40310613> (дата звернення: 20.12.2024).

65. Яковина В. С., Угриновський Б. В. Метод омолодження програмного забезпечення для операційної системи Android з використанням комплексної моделі його старіння на підставі ланцюга Маркова. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. Т. 31, № 6. С. 97 – 103. DOI: <https://doi.org/10.36930/40310615> (дата звернення: 14.06.2024).

66. Яковина В. С., Угриновський Б. В. Метод омолодження програмного забезпечення для операційної системи Android з використанням комплексної моделі його старіння на підставі ланцюга Маркова. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. Т. 31, № 6. С. 97 – 103. URL: <https://doi.org/10.36930/40310615> (дата звернення: 14.06.2024).

67. Сбоев Р.Ю. Могилевич Д.І Аналіз факторів, що впливають на функціональну стійкість обладнання електронних комунікаційних систем. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34 (73), № 5. С. 70 – 74. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/12>.

68. ДСТУ 2844-94. Програмні засоби ЕОМ. Забезпечення якості.

Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1996.

69. ДСТУ ISO/IEC TR 12182:2004 Інформаційні технології. Класифікація програмних засобів (ISO/IEC TR 12182:1998, IDT). Київ: Держстандарт України, 2004.

70. ДСТУ 2850-94. Програмні засоби ЕОМ. Показники і методи оцінювання якості. Київ: Держстандарт України, 1996.

71. Сінько В. В., Могилевич В. Д. Аналіз факторів, які впливають на надійність програмного забезпечення інформаційних систем спеціального призначення. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення*: матеріали XIII науково-практ. конф. ВІТІ ім. Героїв Крут, м. Київ, 3 груд. 2020 р. Київ: ВІТІ ім. Героїв Крут, 2020. С. 248.

72. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги [Чинний від 01.01.97]. Київ: Держстандарт України, 1997.

73. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі: навч. посіб. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.

74. Зіньковський Ю.Ф., Уваров Б.М. Визначення показників надійності в системах автоматизованого проектування радіоелектронних пристроїв *Вісник Національного технічного університету України "КПІ" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2012. № 50. С. 36 – 46. URL: <https://radar.kpi.ua/radiotechnique> (дата звернення: 19.03.23).

75. Абрамова А.О. Основи надійності складних систем та систем автоматизації: навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 61 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ee304579-ab09-4847-8b33-b6dd48bd813f/content> (дата звернення: 15.12.23).

76. Дубіненко С.Б. Штовба С.Д. Основи теорії надійності систем управління і автоматики: навч. посіб. Вінниця: ВДТУ, 2002. 65 с.

77. Журахівський А.В., Кінаш Б.М., Пастух О.Р. Надійність електричних

систем і мереж: навч. посіб. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. 280 с.

78. Толюпа С.В. Пархоменко І.І. Побудова комплексних систем захисту складних інформаційних систем на основі структурного підходу. *Сучасний захист інформації*. 2015. № 4. С. 62 – 70. URL: <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/424/392> (дата звернення: 12.04.23).

79. Pavlov N. Some Transmuted Software Reliability Models. *Journal of Mathematical Sciences and Modelling*. 2019. Vol. 2, No. 1. P. 64 – 70. DOI: <https://doi.org/10.33187/jmsm.434277>.

80. Ahmed N.O., Bhargava B. From Byzantine Fault-Tolerance to Fault-Avoidance: An Architectural Transformation to Attack and Failure Resiliency. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2020. № 8 (3). P. 847 – 860. DOI:10.1109/TCC.2018.2814989.

81. Haque M. A., Ahmed N.O. Key Issues in Software Reliability Growth Models. *Recent Advances in Computer Science and Communications*. 2020. Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.2174/2666255813999201012182821>.

82. Hasan O., Ahmad W., Pervez U. Qadir Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. Vol. 78. P. 191 – 215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.11.008>.

83. Bazargur B., Bataa O., Budjav U. Reliability Study for Communication System: A Case Study of an Underground Mine. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 2: 821. P. 1 – 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13020821>.

84. Littlewood B., Popov P., Strigini L. Modelling the effects of combining diverse software fault removal techniques. *IEEE Trans. on Software Engineering*. 2000. № 26 (12). P. 1157–1167. DOI: 10.1109/32.888629.

85. Kim Y., Song K., Pham H., Chang I. A Software Reliability Model with Dependent Failure and Optimal Release Time. *Symmetry*. 2022. № 14. P. 343. DOI: 10.3390/sym14020343.

86. 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.

87. Барабаш О.В., Конограй А.Ф., Саланда І.П. Методика аналізу структурної функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2017. № 3. С. 27–35.

88. Креденцер Б.П. Розрахунок показників надійності технічних систем з надлишковістю: монографія. Київ: Фенікс, 2019. 520 с.

89. Креденцер Б.П. Оцінка надійності резервованих систем при обмеженій вихідній інформації: монографія. Київ: Фенікс, 2013. 314 с.

90. Вишнівський В.В., Каргаполов Ю.В., Березовська Ю.В. Оцінка показників надійності інформаційних систем при обмеженій апіорній інформації. *Sciences of Europe*. 2021. № 63. С. 8 – 14. URL: <https://www.europescience.com/wp-content/uploads/2021/11/VOL-2-No-63-2021.pdf> (дата звернення: 17.04.23).

91. Жердев М.К., Вишнівський В.В., Жиров Г.Б. Контроль технічного стану цифрових пристроїв енергостатичним методом. *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ»*. 2005. № 1. С. 51 – 57.

92. Mogylevych D., Kononova I., Kredentser B., Karadschow I. Comprehensive Reliability Assessment Technique of Telecommunication Networks Equipment with Reducible Structure *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. 2020. № 80. P. 39 – 47. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.39-47>.

93. Phillips D.T., Garcia-Diaz A. Fundamentals of Network Analysis: book. Virtualbookworm.com. 394 p.

94. Schwartz M. Telecommunication Networks: Protocols, Modeling, and Analysis. Addison-Wesley Publishing Company. 1987. 749 p.

95. Halsall F. Data communications, computer networks and open systems. Electronic-systems Computer Science. 1995. 408 p.

96. Martin J. Systems Analysis for Data Transmission First Edition. Prentice Hall. 784 p.

97. Беркман Л.Н., Стеклов В.К., Кільчицький Є.В. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку. Київ: Техніка, 2004. 576 с.
98. Климаш М.М., Дронюк І.М., Олексін М.І. Моделювання та розрахунок оптимальних шляхів з'єднання у телекомунікаційних мережах. Львів: «Львівська політехніка», 2006. С. 45 – 49.
99. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проектування телекомунікаційних мереж. Київ: Темника, 2002. – 792 с.
100. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі. Київ: Техніка, 2001. 650 с.
101. Стеклов В.К., Беркман Л.Н., Лев Ю.О. Проектування інтелектуальних мереж. *Зв'язок*. 1997. № 3. С. 36 – 38.
102. Стеклов В.К., Костік Б.Я., Беркман Л.Н. Сучасні системи управління в телекомунікаціях. Київ: Техніка, 2005. 400 с.
103. Климаш М.М., Стрихалюк Б.М., Кайдан М.В. Теоретичні основи телекомунікаційних мереж: навч. посіб. Львів: УАД, 2011. 496 с.
104. Климаш М.М., Демидов І.В., Селюченко М.О., Орлевич І.Д. Забезпечення якості обслуговування та оптимізація бізнес-процесів у розподілених системах на основі сервісно-орієнтованої архітектури. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Радіoeлектроніка та телекомунікації*. 2013. № 766. С. 150 – 155.
105. Беркман Л.Н., Барабаш О.В., Ткаченко О.М., Мусієнко А.П., Лаптев О.А., Свинчук О.В. Інтелектуальна система управління для інфокомунікаційних мереж. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2022. № 3. Р. 54 – 59. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.3.054
106. Толубко В.Б., Беркман Л.Н., Власенко В.О., Зіненко Ю.М. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж. *Сучасний захист інформації*. № 4. 2016. С. 58 – 64.
107. Воробієнко П.П., Нікітюк Л.А., Резніченко П.І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: підручник. Київ: САММІТ-Книга, 2010. 708 с.

108. Захарченко М.В., Горохов С.М., Балан М.М., Гаджієв М.М., Корчинський В.В., Ложковський А.Г. Математичні основи оптимізації телекомунікаційних систем: підручник. / за ред. М.В. Захарченко. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2010. 240 с.
109. Вишнівський В.В., Зінченко О.В., Катков Ю.І. Оцінка ефективності функціонування інтелектуальної системи. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2018. № 1(58). С. 19 – 26.
110. Бондарчук А.П., Срочинська Г.С., Твердохліб М.Г. Основи інфокомунікаційних технологій: навч. посіб. Київ: Навчально-науковий інститут інформатизації та телекомунікацій. 2015. 76 с.
111. Prim R.C. Shortest Connection networks and some generalizations. *Bell Syst. Techn.* 1957. № 36. P. 1389 – 1401.
112. Kruskal J.B. On the Shortest Subtree of a Graph and the Travelling Salesman Problem. *Proc. Amer. Math. Soc.* 1956. №. 7. P. 54 – 63.
113. Esau L.R., Williams K.C., Esau L.R. On teleprocessing system design. *IBM System Journal*. 1966. № 3. P. 142 – 147.
114. Поповський В.В. Основи теорії телекомунікаційних систем: підручник. Харків: ХНУРЕ, 2018. – 368 с
115. Комп'ютерні мережі : підручник / Ю. В. Волосюк. – Миколаїв : МНАУ, 2019. – 203 с.
116. Андрусак А.І. Мережа авіаційного електрозв'язку / Андрусак А.І., Демянчук В.С., Юрьєв Ю.М. – К.: НАУ, 2001. – 446 с.
117. Барабаш О.В. Забезпечення функціональної стійкості розподіленої інформаційної космічної системи. *Системи обробки інформації*. Харків: ХВУ, 2004. №. 1. С. 3 – 12.
118. Барабаш О., Свинчук О., Макаручук А. Спосіб представлення ймовірнісного показника функціональної стійкості інформаційної системи як функції від часу. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2024. № 5 (341). С. 123 – 127. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-341-5-18.
119. Барабаш О., Саланда І. Дослідження ймовірнісного показника

функціональної стійкості розподілених інформаційних систем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 1 (45). С. 45 – 50. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-6>.

120. Барабаш О.В. Побудова структури мережі передачі даних за критерієм максимуму функціональної стійкості. *Проблеми інформатизації та управління*. 2003. № 8. С. 66 – 71.

121. Белокурський Ю.П., Дегтярьов О.В., Єгорова А.О., Козлов В.Є., Руженцев І.В. Основи теорії надійності, контролю та діагностування засобів вимірювальної техніки: навч. посіб. / за ред. А.Б. Єгорова. Харків: ХНУРЕ, 2011. 174 с.

122. Вишнівський В.В., Василенко В.В., Гніденко М.П., Зінченко О.В., Звенігородський О.С., Іщеряков С.М. Основи надійності та діагностики інформаційних систем: навч. посіб. Київ: ДУТ, 2020. 184 с.

123. Pavlenko M., Osiievskyi S., Daniuk Yu. Methodological foundation for improving the quality of intelligent decision-making system software. *Системи обробки інформації*. 2021. №. 1 (164). Р. 55–64. DOI: 10.30748/soi.2021.164.06.

124. Креденцер Б., Могилевич Д., Міночкин А. Оцінка експлуатаційно-технічних характеристик об'єктів телекомунікацій при апріорній невизначеності: монографія. Київ: Фенікс, 2012. 332 с.

125. Денисюк С.П., Тарасевич П.Й., Сподинський О.В., Дерев'янко Д.Г. Забезпечення надійності функціонування та стійкої роботи інтелектуальних енергетичних систем. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. Київ: ІЕД НАНУ, 2010. № 27. С. 27 – 32.

126. Павлюк О.М., Медиковський М.О., Ізонін І.В. Основи теорії надійності технічних систем. Львів: Львівська політехніка, 2021. 208 с.

127. Ротштейн О.П., Штовба С.Д., Козачко О.М. Моделювання та оптимізація надійності багатовимірних алгоритмічних процесів: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. 211 с.

128. Ліхоузова Т.А. Теорія імовірностей та математична статистика: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 341 с.

129. Gnedenko B., Ushakov I. Probabilistic reliability engineering. New York: Wiley, 1995. 517 p.
130. Міляєв Ю.П., Нечипоренко О.М. Основи надійності технічних систем. Київ: Видавн.-полігр. центр Акад. муніцип. упр., 2008. 246 с.
131. Littlewood B., Popov P., Strigini L. Modelling the effects of combining diverse software fault removal techniques. *IEEE Trans. on Software Engineering*. 2000. № 26(12). P. 1157 – 1167.
132. Власенко К.В., Грудкіна Н.С. Надійність технічних систем: навч. посіб. Краматорськ: ДДМА, 2016. 41 с.
133. Савельєва О.С. Надійність технічних систем: підручник. Одеса: Одеська політехніка. 2021. 109 с.
134. Галян О.В. Методологія та організація наукових досліджень: навч.-метод. видання. Луцьк: Вежа-Друк, 2021. 26 с. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/20238/1/Metodolohiia.pdf> (дата звернення: 9.07.23).
135. Самсонов В.В., Сільвестров А.М., Тачиніна О.М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання: навч. посіб. Київ: НУХТ, 2022. 385 с.
136. Mogylevych D., Kononova I., Kredentser B., Oksiiuk O. Reliability of Redundant Telecommunications Equipment Advanced Model Considering Failures and Refusals of Structure Elements. *2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory*. 2020. P. 124 – 130. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030502.
137. Королук В.С., Самойленко І.В. Великі відхилення для імпульсних процесів накопичення в схемі фазового укрупнення. *Національна академія наук України*. 2014. № 7. С. 7 – 14. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2014_7_3 (дата звернення: 12.12.2023).
138. Огірко О.І., Галайко Н.В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб. Львів: ЛьвДУВС, 2017. 292 с.
139. Раскін Л.Г., Сіра О.В., Корсун Р.О. Декомпозиційний метод вирішення завдань аналізу марківських систем високої розмірності. *Системи*

управління, навігації та зв'язку. 2020. №. 2 (60). С. 90 – 94. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.090>.

140. Пустовойтов П.Є. Моделі і методи аналізу немарківського трафіку у вузлах телекомунікаційних мереж: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі. Харків: ХНУРЕ, 2014. 36 с. URL: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/2787> (дата звернення: 20.05.24).

141. Літвін Н. Потік втрачених вимог у двоканальній системі масового обслуговування при малій інтенсивності вхідного потоку. *International Scientific Discussion: Problems, Tasks and Prospects*. 2021 № 52. С. 431 – 436. DOI: <https://doi.org/10.51582/interconf.21-22.04.2021.049>.

142. Кустов В.Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 218 с.

143. Абрамович О.О. Методи розрахунку надійності резервованих систем: підручник. Київ: НАУ, 2017. 316 с.

144. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. [Чинний від 1997-01- 01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1995. 39 с.

145. Тихонов М.В. Удосконалений метод побудови моделей оцінки надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу. Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем: матеріали XVII Міжнародної наук.-тех. конф. «Перспективи телекомунікацій», Київ, 18–21 квітня 2023 року. С. 65–67.

146. Василюшин В.І., Чечуй О.В., Женжера С.В., Глушко А.П. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем: підручник. Харків: ХНУПС, 2018. 268 с.

147. Тихонов М.В. Кононова І.В. Вихідні обмеження і передумови для побудови моделей надійності електронного комунікаційного обладнання. *Кібербезпека державних інституцій та подолання кризових станів: матеріали III наук.-практ. конф.* 14 листопада 2024 року, Київ – Прага – Таллінн – Тернопіль. С. 282 –283

148. Gallager R. Discrete stochastic processes: book. Massachusetts: LibreTexts, 2024. 332 p.
149. Ramage D., Hidde Markov models fundament. *Standard school of engineering*. 2011. 194 p.
150. Могилевич Д.І., Правило В.В., Захараш О.М. Вплив зміни структури відомчих телекомунікаційних мереж на забезпечення заданих значень показників якості обслуговування. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*. 2011. № 1 (22). С. 87 – 92.
151. Креденцер Б.П. Розрахунок показників надійності технічних систем з надлишковістю. Київ: Фенікс, 2019. – 520 с.
152. Funakosh H. An approximation method for failure rate estimation considering changes in the number of equipment. *IEICE Communications Express*. 2022. Vol. 11. No 9. P. 612 – 616. DOI: 10.1587/comex.2022XBL0096.
153. Joanni A. Estimation of component failure rates based on survival data for assemblies. Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2019. P. 1 – 4. DOI: 10.1109/RAMS.2019.8768993.
154. Кустов В.Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 218 с.
155. Lai R., Garg M. A Detailed Study of NHPP Software Reliability Models. *Journal of Software*. 2012. Vol. 7, No 6. P. 1296 – 1306.
156. Дубіненко С.Б. Штовба С.Д. Основи теорії надійності систем управління і автоматики: навч. посіб. Вінниця: ВДТУ, 2002. 65 с.
157. Samaniego F.J., Hall P.G., Jin Y. Estimating Component Reliability Based on Failure Time Data from a System of Unknown Design. *Statistica Sinica*. 2017. № 27. С. 50 – 59. DOI: 10.5705/ss.202015.0209.
158. Yakovyna V., Symetsa I. Method of high-order markov chain representation through an equivalent first-order chain for software reliability assessment. *Computer Systems and Information Technologies*. 2021. № 3. P. 6 – 73. DOI: <https://doi.org/10.31891/CSIT-2021-5-9>.

159. Вишнівський В.В. Каргаполов Ю.В. Березовська Ю.В. Оцінка показників надійності інформаційних систем при обмеженій апіорній інформації. *Sciences of Europe*. 2021. № 63. С. 8 – 14. URL: <https://www.europe-science.com/wp-content/uploads/2021/11/VOL-2-No-63-2021.pdf> (дата звернення: 11.01.24).

160. Тихонов М.В. Кононова І.В. Особливості розв'язання задач оцінки показників надійності в умовах апіорної невизначеності. Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-комунікаційних систем: матеріали VII наук.-практ. конф. курсантів (студентів), аспірантів, докторантів та молодих учених, Київ, 12 червня 2024 року. С. 232.

161. Ачкасов А.Є., Плакіда В.Т., Воронков О.О., Воронкова Т.Б. Теорія ймовірностей і математична статистика: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2018. 247 с.

162. Taketomi N., Yamamoto K., Chesneau C., Emura T. Parametric Distributions for Survival and Reliability Analyses, a Review and Historical Sketch. *Mathematics*. 2022. № 10 (20):3907. DOI:10.3390/math10203907.

163. Гиренко І., Кононова І., Щиголь Ю. Удосконалений метод побудови двосторонніх границь показників надійності обладнання інформаційно-комунікаційної мережі при обмеженій вихідній інформації. *Information Technology and Security*. 2023. Vol. 11, Iss. 1 (20). Р. 84 – 95. <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2023.11.1.283811>.

164. Іщеряков С.М., Прокопов С.В., Каргаполов Ю.В., Березовська Ю.В. Функціональна стійкість інформаційних мереж за наявності обмеженої апіорної інформації про надійність. *Зв'язок*. 2020. №6. С. 42 – 46. DOI: 10.31673/2412-9070.2020.069966.

165. Гнеденко Б.В. Курс теорії ймовірностей: підручник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2010. 464 с.

166. Скороход А.В. Елементи теорії ймовірностей та випадкових процесів. Київ: Вища школа, 1975.

167. Скороход А.В. Лекції з теорії випадкових процесів. Київ: Либідь, 1990.

168. Зелінський Ю.Б. Основи лінійного програмування. Київ: МГІ, 2003, 32 с.
169. Наконечний С.І., Савіна С.С. Математичне програмування: навч. посіб. Київ: КНЕУ, 2003. – 452 с.
170. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій: підручник. Київ: Слово, 2006. 816 с.
171. Mogylevych D., Kredentser B., Kononova I., Mohylevych V. Analytical Model with Interruption of Service of Short-term Objects with Temporary Reservation. *Information Technology and Interactions*. 2020. P. 295 – 307. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2845/Paper_28.pdf (дата звернення: 03.05.23).
172. Станович О.В., Бондаренко О.Є., Малих В.В., Кротов В.Д. Варіант оцінки надійності програмного забезпечення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2016. № 1. С. 104 – 106. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2016_1_28 (дата звернення: 22.03.23).
173. Яковина В., Мацелюх В. Огляд і аналіз моделей надійності програмного забезпечення. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2017. № 864. С. 130 – 140. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jul/13773/17.pdf>. (дата звернення: 19.08.24).
174. Pavlenko M., Osieivskyi S., Daniuk Yu. Methodological foundation for improving the quality of intelligent decision-making system software. *Системи обробки інформації*. 2021. № 1(164). С. 55 – 64. <https://doi.org/10.30748/soi.2021.164.06>.
175. Могилевич Д.І., Сінько В.В. Моделі надійності об'єктів телекомунікаційного обладнання з незнеціненими або повністю знеціненими відмовами програмних засобів. *Information Technology and Security*. 2022. № 10 (1). P. 50 – 59. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2022.10.1.261132>.
176. Дубина В.О., Кононова І.В. Моделі надійності електронного комунікаційного обладнання з урахуванням характеристик контролю. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74), № 1. С. 34–39.

Додаток А

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Тихонов М.В., Кононова І.В. Методика комплексного оцінювання показників надійності електронного комунікаційного обладнання з комбінованим часовим резервуванням. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 3 (1), № 3. С. 13 – 18. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-1>.

2. Тихонов М.В., Кононова І.В. Удосконалена методика побудови двосторонніх оцінок показників надійності функціонування комунікаційного обладнання мереж зв'язку. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 3. С. 86 – 90. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/13>.

3. Тихонов М.В. Удосконалений метод побудови моделей комплексної оцінки надійності функціонування об'єктів електронного комунікаційного обладнання з комбінованим резервом часу. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 349 № 2. С. 422 – 434. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-61>.

4. Кононова І.В., Тихонов М.В. Комплексна оцінка показників надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74) № 1. С. 45 – 50. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/07>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Тихонов М.В. Удосконалений метод побудови моделей оцінки надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання з

комбінованим резервом часу. *Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем*: матеріали XVII Міжнародної наук.-тех. Конф. «Перспективи телекомунікацій», Київ, 18–21 квітня 2023 року. С. 65–67. <https://conferenc.its.kpi.ua/2023/paper/view/27434/18939>

6. Тихонов М.В. Кононова І.В. Особливості розв’язання задач оцінки показників надійності в умовах апіорної невизначеності. *Актуальні питання застосування спеціальних інформаційно-комунікаційних систем*: матеріали VII наук.-практ. конф. курсантів (студентів), аспірантів, докторантів та молодих учених, Київ, 12 червня 2024 року. С. 232.

7. Тихонов М.В. Кононова І.В. Вихідні обмеження і передумови для побудови моделей надійності електронного комунікаційного обладнання. *Кібербезпека державних інституцій та подолання кризових станів*: матеріали III наук.-практ. конф. 14 листопада 2024 року, Київ – Прага – Таллінн – Тернопіль. С. 282 –283.

Вих. № 1
від 18.03.2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження
здобувача наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
172 Телекомунікації та радіотехніка Тихонова Миколи Вікторовича на тему:
“Методи побудови моделей оцінки надійності телекомунікаційного обладнання мереж
зв’язку з урахуванням відмов та збоїв програмного забезпечення та комбінованого резерву
часу”

Комісія у складі:

голови комісії: технічного директора ТОВ “Софтнет груп” Руслана Тихонюка;
членів комісії: головного інженера ТОВ “Софтнет груп” Ростислава Кадюка;
інженера відділу телекомунікаційних систем ТОВ “Софтнет груп”
Кліма Осипчука,

розглянула матеріали дисертаційного дослідження Тихонова Миколи Вікторовича та за
результатами розгляду встановила наступне:

1. Проведений у дослідженні аналіз показав, що надійність функціонування електронного
комунікаційного обладнання сучасних мереж зв’язку не в повній мірі задовольняє заданим
вимогам, тому виникає необхідність модернізації цих мереж для досягнення необхідних значень
показників надійності.

2. Новими науковими результатами, отриманими особисто Тихоновим М.В. є
удосконалений метод і моделі комплексної оцінки надійності функціонування об’єктів
електронного комунікаційного обладнання при повній вихідній інформації та удосконалена
методика і моделі оцінки надійності об’єктів електронного комунікаційного обладнання мереж
зв’язку при апріорній невизначеності (обмеженій вихідній інформації).

3. Практична цінність запропонованих наукових результатів полягає у можливості
здійснювати якісний та кількісний аналіз показників надійності функціонування електронного
комунікаційного обладнання, прогнозувати потенційні відмови та вживати превентивні заходи
для мінімізації простоїв обладнання.

4. Отримані наукові результати є актуальними для вирішення завдань з модернізації
існуючих та створення перспективних мереж зв’язку.

Голова комісії:

Члени комісії:



Руслан Тихонюк

Ростислав Кадюк

Клім Осипчук

Підписи голови комісії і її членів засвідчую.

Директор департаменту кадрової роботи та управління персоналом ТОВ “Софтнет груп”
Аліна Школова

18.03.2025

ТОВ “СОФТНЕТ ГРУП”

ЄДРПОУ: 42952398
ІПН: 429523926500

БАНКІВСЬКІ РЕКВІЗИТИ

Р/р: UA38052990000026004036703983
в АТ КБ “ПриватБанк”, МФО 380775

ЮРИДИЧНА/ФАКТИЧНА АДРЕСА

м.Київ, вул. О. Пироговського, буд. 19/4,
Тел. +38 044 393 93 23



Прим. № 1

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ
УКРАЇНИ
ВІЙСЬКОВА ЧАСТИНА
А4043

“19” березня 2025 р.

№ 1/19

м. Бровари, Київська область, 07404

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження
здобувача наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
172 Телекомунікації та радіотехніка Тихонова Миколи Вікторовича на тему:
“Методи побудови моделей надійності телекомунікаційного обладнання мереж зв'язку з
урахуванням відмов та збоїв програмного забезпечення та комбінованого резерву часу”

Комісія у складі:

голови комісії начальника штабу військової частини А4043 Юрія Куценка;
членів комісії: начальника служби зв'язку військової частини А4043 Андрія Шаталюка;
інженера передавального центру військової частини А4043 Віталія Сажинько,

ознайомила з матеріалами дисертаційного дослідження Тихонова Миколи Вікторовича та за
результатами розгляду встановила наступне:

основними науковими результатами, отриманими особисто Тихоновим М.В., є
удосконалений метод і моделі комплексної оцінки надійності функціонування об'єктів електронного
комунікаційного обладнання при повній вихідній інформації та удосконалена методика і моделі
оцінки надійності об'єктів електронного комунікаційного обладнання мереж зв'язку при апріорній
невизначеності (обмеженій вихідній інформації).

Отримані наукові результати мають значну практичну цінність для вирішення завдань
модернізації існуючого та створення нового телекомунікаційного обладнання. Вони дозволяють
здійснювати кількісну верифікацію надійності обладнання, оцінюючи його відповідність
встановленим вимогам за умов використання різних типів надлишковості. Це сприяє
ідентифікації найменш надійних об'єктів та підсистем існуючих електронних комунікаційних
мереж та дозволяє науково обґрунтувати ефективні шляхи і методи їхнього підсилення. Таким
чином, впровадження отриманих наукових результатів сприятиме підвищенню надійності та
ефективності телекомунікаційного обладнання, що є ключовим фактором для забезпечення
якісного зв'язку та інформаційної безпеки

Голова комісії:

Члени комісії:

Юрій Куценко

Андрій Шаталок

Віталій Сажинько

Підписи голови комісії і її членів засвідчую.

Директор департаменту кадрової роботи та управління персоналом військової частини

А4043 Олександр Сологуб.

19.03.2025

