

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

ОЗІРКОВСЬКИЙ ЛЕОНІД ДЕОНІСІЙОВИЧ

УДК 629.039.58, 621.396.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**Розвиток теоретичних засад оцінювання показників функціональної
безпеки радіоелектронних систем відповідального призначення**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

(шифр і назва спеціальності)

05 – «Технічні науки»

(галузь знань)

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

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант –
Волочій Богдан Юрійович,
д.т.н., професор

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*

/М.І. Бешлей/

Львів 2020

АНОТАЦІЯ

Озірковський Л.Д. Розвиток теоретичних засад оцінювання показників функціональної безпечності радіоелектронних систем відповідального призначення. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2020.

В дисертаційній роботі розв’язано актуальну науково-прикладну проблему розвитку теоретичних засад комплексного забезпечення заданого рівня функціональної безпечності та надійності радіоелектронних систем відповідального призначення (РЕСВП). Розроблені засоби (методи, моделі, алгоритми та методики) забезпечують, на етапі системотехнічного проектування, визначення слабких місць РЕСВП з точки зору функціональної безпечності. Це дає змогу проєктанту обґрунтовано ввести необхідні види надлишковості (структурної, часової, функціональної), щоб підвищити, як функціональну безпечність, так і надійність РЕСВП. Таким чином, розроблені засоби дають змогу синтезувати відмовостійку структуру, алгоритм поведінки та стратегію технічного обслуговування, які забезпечують не потрапляння РЕСВП в аварійну ситуацію.

Сучасні методи оцінювання показників функціональної безпечності базуються на визначенні мінімальних січень, які показують слабкі місця РЕСВП. Для отримання мінімальних січень в цих методах використовують дерева відмов, динамічні дерева відмов, дерева подій або бінарні діаграми рішень. Однак, відомі методи не дають змоги враховувати вплив на функціональну безпечність РЕСВП застосування: відмовостійких мажоритарних структур з реконфігурацією; відмовостійких дворівневих мажоритарних структур; стратегій технічного обслуговування; часової та функціональної надлишковості в алгоритмах поведінки. Але суттєвий недолік існуючих методів в тому, що вони не дають змоги, на основі одної моделі, отримати і показники функціональної безпечності, і показники надійності. Це може призводити до того, що при введенні додаткових

засобів для підвищення функціональної безпечності надійність РЕСВП знижується. Також ці методи малоприменні для розв'язання задач синтезу через багатоваріантний аналіз на протязі короткого часу, що є визначальним на етапі системотехнічного проектування.

В дисертації, запропоновано новий метод для автоматизованого визначення різновидів непрацездатних станів. Цей метод забезпечує класифікацію непрацездатних станів РЕСВП за рівнем критичності відмов і дає змогу отримати траєкторії розвитку аварійних ситуацій. На основі цього методу запропоновано методику розроблення комплексних динамічних моделей РЕСВП у вигляді графа станів і переходів, які на відміну від існуючих, дають змогу без побудови дерева відмов, визначати як мінімальні січення, так і показники надійності РЕСВП.

Для відображення взаємозв'язків між показниками функціональної безпечності і надійності відмовостійких структур, алгоритмів поведінки та стратегій технічного обслуговування запропоновано нові показники та характеристики функціональної безпечності: функція аварійності; частота потрапляння в аварійну ситуацію; ймовірність потрапляння в передаварійну ситуацію; середнє значення ймовірності існування мінімального січення.

Для врахування впливу простою РЕСВП, під час проведення процедур технічного обслуговування та ремонту, на показники функціональної безпечності, розроблено нові моделі стратегій технічного обслуговування для планово–профілактичного обслуговування та аварійно–відновлювальних робіт. Це дало змогу розробити методику синтезу стратегії технічного обслуговування, яка гарантовано підтримує заданий рівень функціональної безпечності РЕСВП. Щоб зробити можливим розв'язання задачі мінімізації впливу на функціональну безпечність прихованих відмов, розроблено метод розрахунку середнього значення ймовірності існування мінімального січення. Цей метод дає змогу отримати достовірні значення ймовірностей існування мінімальних січень для випадків, коли мінімальне січення містить виключно приховані відмови або комбінації прихованих та явних відмов.

Розроблено моделі відмовостійких РЕСВП з мажоритарною структурою, які

на відміну від існуючих, дають змогу враховувати вплив на функціональну безпечність використання реконфігурації мажоритарної структури, дворівневої мажоритарної структури та технічного обслуговування і ремонту. Запропоновані моделі дають змогу вирішувати задачі синтезу відмовостійких систем для РЕСВП із заданим рівнем функціональної безпечності і доцільним рівнем структурної надлишковості, що є особливо важливим для бортових інформаційно–керуючих систем літальних апаратів, зокрема безпілотних, для яких масо-габаритні показники є критичними.

Розроблено методологію синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП, в якій на відміну від існуючих, враховано вплив часової та функціональної надлишковості на функціональну безпечність РЕСВП. Методологія показує шлях для досягнення заданого рівня ймовірності виконання задачі при мінімальному значенні частоти потраплянь у аварійну ситуацію.

Ключові слова: надійність, функціональна безпечність, надійнісне проектування, відмовостійкі системи, алгоритм поведінки, технічне обслуговування, мажоритарна система, радіоелектронна система відповідального призначення.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бобало Ю.Я. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем // Монографія / Ю.Я. Бобало, Б.Ю. Волочій, О.Ю. Лозинський, Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський, Д.В. Федасюк, С.В. Щербовських, В.С. Яковина. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, –2013. – 300 с. ISBN: 9786176074687
2. Волочій Б. Проектирования эффективных стратегий технического обслуживания. Математические модели, алгоритмы и методики. Монография // Богдан Волочий, Леонид Озірковский, Игорь Кулык/ LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, – 2015. – 160 с. ISBN: 9783659633669
3. Патент на винахід № 126099 Україна, МПК (2006): H02J 1/00. Система електропостачання малогабаритного безпілотного літального апарата / Пащук

Ю. М., Корольов В.М., Озірковський Л.Д., Васінович В.Ю., Сальник Ю.П. (Україна); заявник – Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. – № u201712061; заявл. 07.12.2017; опубл. 11.06.2018, бюл. № 11/2018.//

<http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=248043>

4. Volochiy B. The New Method of Building a Safety Model for Quantitative Risk Assessment of Complex Technical Systems for Critical Application/ B. Volochiy, B. Mandziy, L. Ozirkovsky // Communications in Computer and Information Science. – 2016, Vol. 594. – pp. 56 – 70
5. Ozirkovsky L. The Algorithm of Automated Development of Fault Trees for Safety Exploitation Assessment of Complex Technical Systems// L. Ozirkovsky, A. Mashchak, O. Shkiliuk, S. Volochiy/ Central European Researchers Journal. – Volume 2, Issue 2, – 2016, pp. 1 – 10
6. Volochiy B. Improvement of fidelity of moving objects classification in guard signaling complexes with seismic sensors / Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Leonid Ozirkovsky, Volodymyr Onyschchenko, Yuriy Salnyk // Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce I Ochronie Środowiska. – 8(4), – 2018, – pp. 36 – 39.
7. Ozirkovsky Leonid Adequacy Increase of Assessment of Minimal Cut Sets Considering Latent Failures /Leonid Ozirkovsky, Bohdan Volochiy, Andriy Mashchak, Ihor Kulyk/ Central European Researchers Journal. – Vol. 5 Issue 2, – 2019. – pp. 58–66
8. Ozirkovsky L. Synthesis of safe behavior algorithms of radioelectronic systems for critical applications// Leonid Ozirkovsky, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Oleksandr Shkiliuk/ Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce I Ochronie Środowiska, – volume 10 №1, –2020, – pp. 28 – 31
9. Volochiy B. The maintenance strategy optimization of base stations of communication cellular network/ B. Volochiy, L. Ozirkovsky, I. Kulyk, M. Zmysnyi// Радіоелектронні і комп'ютерні системи, – 2016, № 5 (79), – С.120 – 129
10. Volochiy B. Designing of fault– tolerant radio electronic systems with complex majority structures// B. Volochiy, L. Ozirkovsky, M. Zmysnyi, I. Kulyk //

Радіоелектронні і комп'ютерні системи, 2016, № 6 (80), С.43 – 53

11. Мандзій Б.А. Технологія аналітичного моделювання дискретно–неперевних стохастичних систем на основі блок–схем алгоритмів їх поведінки/ Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Вісник Нац. ун–ту “Львів. політехніка”. – 2008, № 621: Інформаційні системи та мережі, – С. 171 – 181
12. Волочій Б.Ю. Методика побудови дерева відмов складної технічної системи на основі графу станів і переходів / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, А.В. Мащак, О.П. Шкілюк// Вісник академії митної служби України, серія "Технічні науки", –2014, №1(51), с. 10 – 19
13. Волочій Б.Ю. Оцінка ризику експлуатації навігаційно–обчислювальної системи безпілотного літального апарату/ Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Ю.М. Пащук, А.В. Мащак, В.А. Онищенко// Військово–технічний збірник: зб. наук. пр./ Акад. сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, –2015, Вип. 13, –с. 77 – 87.
14. Волочій Б.Ю. Метод аналізу ефективності алгоритмів поведінки радіоелектронних комплексів відповідального призначення/ Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак// Науково–технічний журнал «Радіоелектронні і комп'ютерні системи», 2014, №6 (70), С.130 – 134.
15. Волочій Б.Ю. Оцінка надійності програмно–апаратних систем за допомогою моделі їх поведінки / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Р.С. Чопей, А.В. Мащак, О.П. Шкілюк// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації, _– 2014, № 796, – С. 222 – 231.
16. Волочій Б.Ю. Порівняння методів оцінки показників ефективності алгоритмів поведінки радіоелектронних комплексів / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак// Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, – 2014, №59, С. 29–39.
17. Volochiy B. Technique of Construction Models of Behavior Algorithms of Radio Electronic Complex System using the Scheme of Paths Method / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyi, Oleksandr Shkiliuk, Andriy Mashchak// International Journal of Computing, – Vol. 13, Issue 3, –2014, – pp. 183 – 190.
18. Мандзій Б.А. Оцінка ефективності комбінованої стратегії технічного обслу-

- говування мережі коміркового зв'язку / Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, С.І. Гнатів, І.В. Кулик// Східно–Європейський журнал передових технологій. Інформаційно–керуючі системи. – Том 1, № 9 (61), – 2013, – С. 40 – 44.
19. Мандзій Б.А. Дослідження впливу профілактичного технічного обслуговування на надійність відмовостійкого джерела безперебійного електроживлення/ Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Д.С. Кузнєцов, І.В. Кулик // Східно–Європейський журнал передових технологій. Енергозберігаючі технології та обладнання. – Том 1, №8 (61), 2013, с. 8 – 12.
20. Волочій Б.Ю. Методика розрахунку мінімальних січень для відмово стійких систем на основі структурно–автоматної моделі/ Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, А.В. Мащак, О.П. Шкілюк, І.В. Кулик // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ, 2013, вип. 52, – С. 38 – 45.
21. Волочій Б.Ю. Надійнісна модель відмовостійкої багатопроцесорної систем з відновленням працездатності програмного забезпечення / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.В. Муляк, М.М. Змисний, Т.І. Панський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, 2013, № 54, – С.33 – 43
22. Мандзій Б.А. Оцінка економічної ефективності технічного обслуговування та ремонту систем регіональних радіоелектронних комплексів / Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, С.І. Гнатів, Л.Д. Озірковський, І.В. Кулик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, – 2013, № 54, – С. 160 – 170.
23. Волочій Б.Ю. Методика визначення показників надійності відмовостійких програмно–апаратних радіоелектронних систем/ Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Т.І. Панський, О.В. Муляк// Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, – 2013, № 55, – С. 71–79.
24. Волочій Б.Ю. Надійнісна модель відмовостійкої програмно–апаратної системи на основі мажоритарної структури з ковзним резервуванням та автоматичним перезавантаженням програмного забезпечення / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.В. Муляк, М.М. Змисний // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 5 (64). – С. 221 – 226.

25. Волочій Б.Ю. Методика оцінки показників ефективності радіоелектронного комплексу моніторингу повітряного простору/ Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2013, № 766, – С. 194 – 203.
26. Озірковський Л.Д., Модель поведінки програмно–апаратних електронних систем/ Озірковський Л.Д., Панський Т.І.// Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Електроніка. – 2013, № 764, – С. 36 – 43
27. Волочій Б.Ю. Визначення впливу оновлення програмного забезпечення на показники надійності відмовостійкої багатопроцесорної системи/ Б.Ю. Волочій, В.–М.В. Міськів, О.В. Муляк, Л.Д. Озірковський // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2013, № 3/9 (63), – С. 55 – 59
28. Мандзій Б.А. Автоматизація побудови моделей надійності резервованих та відновлюваних складних технічних систем/ Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2013, № 2/4 (62), – С. 44 – 49
29. Mandziy B. Analytical Reliability Model of a Redundant Repairable System with Limited Number of Restorations/ Bohdan Mandziy, Leonid Ozirkovsky// Computational Problems Of Electrical Engineering. – 2013 – Vol. 3, No. 2, – pp. 54 – 60
30. Мандзій Б.А. Порівняльна оцінка надійності трьох конфігурацій відмовостійкої системи з мажоритарною структурою / Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, О.В. Муляк // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління, 2012. – № 2. – С. 44 – 50.
31. Волочій Б.Ю. Оцінка ефективності використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 48. – С. 117 – 125.
32. Volochiy B. Extending The Features of Software For Reliability Analysis of Fault–tolerant Systems/ Bohdan Volochiy, Bohdan Mandziy, Leonid Ozirkovsky//Computational Problems of Electrical Engineering, Lviv Politechnic

- National University, 2012. – Volume 2, number 1, – pp. 113 – 121
33. Волочій Б.Ю. Метод побудови моделей поведінки складних систем немарковського типу у вигляді графа станів і переходів / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Кулик І.В., // Міжнародний науковий журнал "Комп'ютинг" Науково–дослідний інститут Інтелектуальних комп'ютерних систем. Тернопільський Національний Економічний Університет, том 11, випуск №3. Тернопіль. – 2012.– С. 262–271.
 34. Волочій Б.Ю. Формалізація побудови моделей дискретно–неперервних стохастичних систем з використанням методу фаз Ерланга / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Кулик І.В. // Відбір і обробка інформації. Національна академія наук України. Міжвідомчий збірник наукових праць. Вип. №36 (112). – Львів: 2012. – С. 39 – 47.
 35. Озірковський Л. Д. Оцінка показників надійності та безпечності інформаційно–керуючої системи RTP 3000 з використанням RAM Commander / Л.Д. Озірковський, Т.І. Панський, О.В. Сидорчук, І.В. Кулик // Східно–Європейський журнал передових технологій. Радіотехнічні інформаційні засоби. – Том 6, № 11(60), 2012. – С. 37 – 40.
 36. Волочій Б.Ю. Марковська модель як засіб комплексного моделювання інформаційних систем з функціональним резервуванням/ Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Улибін Д.О. // Вісник Нац. ун–ту „Львівська політехніка” № 470. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – Львів. – Вид–во Нац. ун–ту „Львівська політехніка”, 2003. – С.101 – 109
 37. Мандзій Б.А. Визначення параметрів стратегії аварійного відновлення для відмовостійких систем на основі мажоритарної структури/ Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, І.В. Кулик // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2011. – № 705. – С. 216 – 224.
 38. Волочій Б.Ю. Моделі відмовостійкої системи з використанням трьох мажоритарних структур, вкладених у мажоритарну структуру, для розв'язання задач надійнісного проектування/ Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, О.В. Муляк // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2012. – № 738. – С. 223 – 230.

39. Озірковський Л.Д. Оцінка імовірності простою резервованих систем з технічним обслуговуванням / Л.Д. Озірковський, Т.І. Панський, О.В. Сидорчук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 49. – С. 151– 156.
40. Волочій Б.Ю. Удосконалення технології моделювання дискретно–неперервних стохастичних систем з використанням методу фаз Ерланга / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, І.В. Кулик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 48. – С. 159 – 167.
41. Волочій Б.Ю. Модель цифрової системи комутації вузла телекомунікаційної мережі / Волочій Б.Ю., Матічин О.В., Озірковський Л.Д., Стецюк С.О., Улибін Д.О. // Вісник Нац. ун-ту „Львівська Політехніка”, № 508, Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів. – Видавництво Нац. університету «Львівська Політехніка», – 2004. – С. 144 – 152.
42. Мандзій Б.А. Програмні моделі для інтерактивного проектування відмовостійких систем з комбінованим структурним резервуванням/ Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Міжнар. наук.–техн. ж–л “Комп’ютинг”. – 2008. – Т.7. – Вип.1. – С. 153 – 160
43. Мандзій Б. А. Моделювання дискретно–неперервних стохастичних систем у задачах дослідження їх відмовостійкості / Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Міжвідомчий збірник наукових праць “Відбір і обробка інформації”. – Львів: Вид–во ФМІ НАНУ. – 2008, вип. 28, – с. 39 – 47
44. Мандзій Б.А. Методи оцінювання структурної живучості ієрархічних інформаційних мереж регіональних радіоелектронних комплексів/ Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Міжвідомчий збірник наукових праць “Відбір і обробка інформації”. – Львів: Вид–во ФМІ НАНУ. – 2009, вип. 30, – С. 104 – 112
45. Волочій Б.Ю. Моделі для надійнісного проектування вузла пам’яті сервера та джерела безперебійного живлення/ Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.В. Муляк, В.Д. Гиля // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2011. –№ 680. – С. 206 – 216.
46. Ozirkovsky L. Increasement of Functional Safety of the Behavior Algorithms of

- Radio Electronic Safety–Critical Systems Leonid Ozirkovsky, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Oleksandr Shkiliuk/ Proceedings 15 th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020, Lviv–Slavsko, Ukrain, February 25 – 29, 2020
47. Ozirkovsky L. Methodology of Defining the Accident Rate Function for Fault Tolerant System with High Responsibility Purpose// Leonid Ozirkovsky, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Andriy Maschak/ Proceedings of 15th International Conference ICTERI–2019, 5th International Workshop on Theory of Reliability and Markov Modeling for Information Technologies (TheRMIT 2019), Kherson, Ukraine, June 12–15, 2019, – pp. 778 – 793
 48. Озірковський Л.Д. Методика синтезу безпечних алгоритмів поведінки радіоелектронних систем відповідального призначення// Озірковський Л.Д., Волочий Б.Ю., Змисний М.М., Шкілюк О.П./ Фізико–технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: Матеріали VIII міжнародної науково–практичної конференції, 8 – 10 листопада 2019. – Чернівці: «Місто», 2019. – С. 60 – 61.
 49. Ozirkovsky L. Analysis of the maintenance strategy effectiveness based on the reliability/cost ratio / Ozirkovsky L., Kulyk I., Mazur A., Petryshyn N., Malynovska Y.// Proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018
 50. Volochiy B. Research of efficiency indexes of radio telemetry system with short–term use / B. Volochiy, L. Ozirkovsky, O. Shkiliuk, V.–M. Miskiv // Proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018
 51. Volochiy B. Method of developing unified model for estimating safety and reliability of complex systems for critical application / B. Volochiy, L. Ozirkovsky // Proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018
 52. Volochiy B. The scheme of paths method based technique for evaluating of the behavior algorithms efficiency / B. Volochiy, L. Ozirkovsky, O. Shkiliuk, V. Kharchenko // Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on

53. Ozirkovskyy L. The Automation of the Exploitation Risks Assessment of the Navigation Information System of Air Drones / L. Ozirkovskyy, Yu. Pashchuk, A. Mashchak, S. Volochiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science: proc. of the XIIIth Intern. Conf. TCSET'2016, Lviv–Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. – P. 140 – 144.
54. Volochiy B. Automation of Quantitative Requirements Determination to Software Reliability of Safety Critical NPP I&C Systems / Bohdan Volochiy, Oleksandr Mulyak, Leonid Ozirkovskyy, Vyacheslav Kharchenko // Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management, SMRLO 2016, 15 – 18 February 2016, Israel, Beer Sheva. - IEEE, 2016. – pp. 337 – 346.
55. Volochiy B. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyy, Oleksandr Mulyak, Sergiy Volochiy // Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management, SMRLO 2016, 15 – 18 February, 2016, Israel, Beer Sheva. - IEEE, 2016. – pp. 347 - 356.
56. Volochiy, B. Automation of Building the Safety Models of Complex Technical Systems for Critical Application / B. Volochiy, B. Mandziy, L. Ozirkovskyy // ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer: proc. of the 11th Intern. Conf. ICTERI 2015, Lviv, Ukraine, May 14 – 16, 2015. – Lviv, 2015. – P. 550 – 565. – CEUR–WS.org, online (SCOPUS)
57. Volochiy B. Minimal Cut Sets Determination for Renewable Systems with Limited Repairs /B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, A. Mashchak, O. Shkiliuk // Матеріали 12-ої Міжнародної науково–технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії TCSET–2014», Львів – Славсько, 2014. – С. 216 – 218.
58. Волочій Б.Ю. Отримання мінімальних січень, котрі призводять до втрати працездатності телекомунікаційної системи / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д, Мащак А.В., Шкілюк О.П. // Тези Всеукраїнської науково–практичної конфе-

- ренції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій СПТЕЛ–2013», Львів, – 2013. – С. 263 – 266.
59. Bobalo Y. Reliability Analysis of Technical Systems without Redundancy with Limited Number of Repairs / Yuriy Bobalo, Bohdan Mandziy, Bohdan Volochiy, Leonid Osirkovskyy // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії: матеріали XI Міжнар. конф. TCSET'2012, 21 – 24 лют. 2012, Львів-Славське, Україна / Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2012. – С. 83 – 84.
60. Мандзий Б. А. Определение параметров стратегии аварийного восстановления для отказоустойчивых систем на основе мажоритарной структуры / Б.А. Мандзий, Б.Ю. Волочий, Л.Д. Озирковский, М.М. Змысний, И.В. Кулык // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Под ред. Н.К. Юркова. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, Россия, 2011, Т.2. – С. 52 – 57.
61. Волочій Б.Ю. Розрахунок мінімальних січень для відмовостійких систем на основі структурно-автоматної моделі / Волочій Б.Ю., Озирковський Л.Д, Мащак А.В., Шкілюк О.П., Кулик І.В. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи РТПСАС–2013», Київ, – 2013. – С. 160 – 161.
62. Волочій Б.Ю. Оцінка ефективності використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озирковський, М.М. Змисний // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта): матеріали конференції. – Київ. – 2012. – С. 39 – 40.
63. Мандзий Б.А. Отказоустойчивая система с адаптивной мажоритарной структурой / Б.А. Мандзий, Б.Ю. Волочий, Л.Д. Озирковский, М.М. Змысний // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Под ред. Н.К. Юркова. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, Россия. – 2012, Т.1. – С. 351 – 353.
64. Volochiy B. Models of Fault-Tolerant Systems with Reconfiguration of the Core of Structure of «K of N» / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, M. Zmysnyi // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: proceedings of the XI-th. International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavsko,

- Ukraine.: Publishing National University «Lviv Politechnic». – 2012. – pp. 89 – 90.
65. Volochiy B. Estimation of Indexes of Efficiency of Radioelectronic Hardware–Software Systems Based on the Algorithm of Behavior /B. Volochiy, L. Ozirkovskyu, O. Shkiliuk, A. Mashchak // Матеріали 11–ої Міжнародної науково–технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп’ютерної інженерії TCSET–2012», Львів – Славсько, 2012. – С. 322 – 323.
66. Волочій Б.Ю. Розробка надійнісних моделей відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, І.В. Кулик // V міжнародна науково–технічна конференція “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування СПРТП–2011.: Вінниця. – 2011. – С. 51 – 52.
67. Мандзій Б.А. Визначення ефективності стратегії технічного обслуговування керуючої системи з мажоритарною структурою / Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, І.В. Кулик // Матеріали XVIII Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2011», 28 – 30 вересня 2011 р, Львів. – С. 154 – 155.
68. Mandzij B. Kompleksowe modelowanie systemu informatycznego z rezerwowaniem funkcjonalnym/ Mandzij B., Woloczij B., Ozirkowskyj L., Ulybin D. //Prace II Krajowego Sympozjum „Modelowanie i symulacja komputerowa w technice” MiS’2003, Lodz, 2003. – pp. 133 – 136.
69. Мандзій Б.А. Концепция программного модуля для моделирования структуры и поведения информационных систем/ Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Матичин А., Озірковський Л.Д. //Труды Международного симпозиума «Надежность и Качество», Пенза, РФ, 2006. – С.13 – 15.
70. Volochiy B. Designing of Fault–Tolerant Radioelectronic Systems with Majority Structure/ Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyu, Mykhailo Zmysnyi, Ihor Kulyk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommu–nications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET’2010 , February 23 – 27, 2010, Lviv–Slavsko, Ukraine. – pp. 35 – 39

Ozirkovskyy L.D. Development of theoretical basis for empowering assessment of functional safety indicators of safety critical radio electronic systems. - On the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Doctor of Engineering Science Degree in Specialty 05.12.17 – Radio and Television Systems. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2020.

This thesis presents the solution of the actual scientific problem of development the theoretical basis of complex maintenance of safety critical radio electronic system (SCRES) with a required level of functional safety and reliability. The developed means (methods, models, algorithms and techniques) enable an identifying the weaknesses in the SCRES design in terms of functional safety at the stage of system design. This allows an engineer to reasonably induce a necessary types of redundancy (structural, temporary, functional) to increase both functional safety and reliability of SCRES. Thus, the developed tools give the opportunity to synthesize a fault-tolerant structure, behavior algorithm and maintenance strategy, which ensure that the SCRES will not fall into an emergency.

Modern methods of assessing functional safety indexes are based on the determination of minimal cut sets, which show the weaknesses of the SCRES. To obtain minimal cut sets, these methods use fault trees, dynamic fault trees, event trees, or binary decision diagrams. However, the known methods don't allow to take into account the impact on the SCRES functional safety of fault-tolerant majority structures with reconfiguration, fault-tolerant two-tier majority structures, maintenance strategies, temporary and functional redundancy in behavior algorithms. Also, a significant disadvantage of existing methods is that they don't give the opportunity to obtain both functional safety indexes and reliability indexes on the basis of a single model. So, it can lead to the condition when the reliability of the SCRES is reduced with the induction of additional tools for increasing functional safety. Also, these methods aren't suitable enough for solving synthesis tasks via multivariate analysis for a short period time, what is very important at the stage of system design.

In the dissertation, a new method is proposed for automated definition of types of

inoperable states. This method provides a classification of inoperable states of the SCRES according to the level of critical failures and allows obtaining trajectories of accidents. Based on this method, a new technique is proposed for development of complex dynamic models of SCRES in the form of a graph of states and transitions. This technique, unlike the existing ones, allows determining both minimal cut sets and reliability indexes of SCRES without constructing appropriate fault tree.

To reflect the relationship between indexes of functional safety and reliability of fault-tolerant structures, behavior algorithms and maintenance strategies, new indexes and characteristics of functional safety are proposed: the accident function; frequency of fall into an accident state; probability of fall into a pre-accident state; the average value of the probability of a minimal cut set existence.

New models of strategies for planned and preventive maintenance and emergency recovery have been developed to take into account the impact of SCRES downtime on functional safety indexes during maintenance and repair procedures. These models enabled the development of method for synthesizing a maintenance strategy which guarantees to maintain a required level of functional safety of the SCRES. New method was developed to calculate the average value of the probability of the minimal cut set existence that gives an opportunity to solve the problem of minimizing impact of latent failures on the functional safety. This method makes it possible to obtain dependable values of the probabilities of the minimal cut sets existence for cases when the minimal cut set contains only latent failures or a combination of latent and active failures.

New models of fault-tolerant SCRESs with majority structures were developed, which, in contrast to the existing ones, allow to take into account the impact of the use of reconfiguration of the majority structure, two-tier majority structure, maintenance and repair on the functional safety. The proposed models make it possible to solve the problem of synthesis of fault-tolerant systems for SCRES with a required level of functional safety and appropriate level of structural redundancy, that is especially important for onboard information and control systems of aircrafts, including unmanned vehicles, for which mass and size restrictions are critical.

New methodology for the synthesis of safe behavior algorithms of the SCRES was

developed, which, in contrast to the existing ones, takes into account the impact of time and functional redundancy on the functional safety of SCRES. This methodology shows the way to achieve a required level of probability of the task execution with the minimum value of the frequency of accidents.

Keywords: reliability, functional safety, reliable engineering, fault-tolerant systems, behavior algorithm, maintenance, majority system, safety critical radio electronic system.

The list of author's publications: Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

1. Bobalo Yu., Volochiy B., Lozinsky O., Mandziy B., Ozirkovskyy L., Fedasyuk D., Scherbovskikh S., Yakovina V.: *Mathematical Models and Methods for Reliability Analysis of Radio, Electronic and Software Systems*. Lviv Polytechnic National University, 2013. – 300 p. ISBN: 9786176074687
2. Volochiy B. *Designing effective strategies of maintenance. Mathematical models, algorithms and techniques* // Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyy, Ihor Kulyk/ LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, – 2015. – 160 p. ISBN: 9783659633669
3. Patent № 126099 Ukraine, IPC (2006): H02J 1/00. Power supply system of small unmanned aerial vehicle / Pashchuk Yu. M., Korolev VM, Ozirkovskyy L.D., Vasinovich V.Yu., Salnik Yu.P. (Ukraine); the applicant is the National Academy of Land Forces named after Hetman Petro Sagaidachny. - № u201712061; declared 07.12.2017; publ. 11/06/2018, bul. № 11/2018 .// <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=248043>
4. Volochiy B. *The New Method of Building a Safety Model for Quantitative Risk Assessment of Complex Technical Systems for Critical Application*/ B. Volochiy, B. Mandziy, L. Ozirkovskyy // *Communications in Computer and Information Science*. – 2016, Vol. 594. – pp. 56 – 70 (Іноземне періодичне видання з напрямку ISSN , Scopus)
5. Ozirkovskyy L. *The Algorithm of Automated Development of Fault Trees for Safety Exploitation Assessment of Complex Technical Systems*// L. Ozirkovskyy, A.

- Mashchak, O. Shkiliuk, S. Volochiy/ Central European Researchers Journal. – Volume 2, Issue 2, – 2016, P. 1 – 10
6. Volochiy B. Improvement of fidelity of moving objects classification in guard signaling complexes with seismic sensors / Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Leonid Ozirkovskyy, Volodomyr Onyschchenko, Yuriy Salnyk //Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska. – 8(4), – 2018, – P. 36 – 39.
 7. Ozirkovskyy L. Adequacy Increase of Assessment of Minimal Cut Sets Considering Latent Failures /Leonid Ozirkovskyy, Bohdan Volochiy, Andriy Mashchak, Ihor Kulyk/ Central European Researchers Journal. – Vol. 5, Issue 2, –2019. – P. 58–66
 8. Ozirkovskyy L. Synthesis of safe behavior algorithms of radioelectronic systems for critical applications// Leonid Ozirkovskyy, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Oleksandr Shkiliuk/ Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, – volume 10 №1, –2020, – P. 28 – 31
 9. Volochiy B. The maintenance strategy optimization of base stations of communication cellular network/ B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, I. Kulyk, M. Zmysnyi// Radio electronic and computer systems,– 2016, № 5 (79), – C.120 – 129
 10. Volochiy B. Designing of fault– tolerant radio electronic systems with complex majority structures// B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, M. Zmysnyi, I. Kulyk // Radio electronic and computer systems,, 2016, № 6 (80), C.43 – 53
 11. Mandziy B.A. Technology of analytical modeling of discrete-continuous stochastic systems based on block diagrams of algorithms of their behavior/ Mandziy B.A., Volochiy B.Yu., Ozirkovskyy L.D. // Bulletin of the National. University “Lviv Polytechnic ”. - 2008, № 621: Information systems and networks, - P. 171 - 181
 12. Volochiy B.Yu. Method of building a failure tree of a complex technical system based on a graph of states and transitions / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, A.V. Машчак, О.П. Шкільчук // Bulletin of the Academy of Customs Service of Ukraine, series "Technical Sciences", ,2014, №1 (51), P. 10 - 19
 13. Volochiy B.Yu. Risk assessment of operation of navigation-computing system of unmanned aerial vehicle / B.Yu. Volochiy, LD Ozirkovskyy, Yu.M. Pashchuk, A.V. Машчак, В.А. Оніщенко // Military-technical collection: collection. Science.

- pr./Acad. ground forces. Hetman Peter Sagaidachny, –2015, issue. 13, –P. 77 - 87.
14. Volochiy B.Yu. Method of efficiency analysis of algorithms of behavior of safety-critical radio-electronic complexes / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, O.P. Shkilyuk, A.V. Mashchak // Scientific and Technical Journal "Radioelectronic and Computer Systems", 2014, №6 (70), P.130 - 134..
 15. Volochiy B.Yu. Estimation of reliability of software-hardware systems by means of model of their behavior / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, R.S. Chohey, A.V. Mashchak, O.P. Shkilyuk // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Radio Electronics and Telecommunications, _– 2014, № 796, - P. 222 - 231.
 16. Volochiy B.Yu. Comparison of methods for evaluating the efficiency of algorithms for the behavior of electronic systems / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, OP Шкілюк, A.B. Mashchak // Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio Engineering, - 2014, №59, P. 29–39.
 17. Volochiy B. Technique of Construction Models of Behavior Algorithms of Radio Electronic Complex System using the Scheme of Paths Method / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskiy, Oleksandr Shkiliuk, Andriy Mashchak// International Journal of Computing, – Vol. 13, Issue 3, –2014, – pp. 183 – 190.
 18. Mandziy B.A. Evaluation of the effectiveness of the combined strategy of technical maintenance of the cellular network / B.A. Mandziy, B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, S.I. Hnativ, I.V. Kulyk // Eastern European Journal of Advanced Technologies. Information and control systems. - Volume 1, № 9 (61), - 2013, - P. 40 - 44.
 19. Mandziy B.A. Investigation of the influence of preventive maintenance on the reliability of a fault-tolerant source of uninterruptible power supply / B.A. Mandziy, B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, D.S. Kuznetsov, I.V Kulyk // Eastern European Journal of Advanced Technologies. Energy saving technologies and equipment. - Volume 1, №8 (61), 2013, P. 8 - 12.
 20. Volochiy B. Yu. Method of Computation of Minimal Cut Sets of Fault-Tolerant Systems Based on Structural-Automatic Model / B. Yu. Volochiy, L. D. Ozirkovsky, A. V. Mashchak, O. P. Shkiliuk, I. V. Kulyk // Bulletin of National Technical University of Ukraine. Series Radiotechnique. Radioapparatus Building.

- 2013. – № 52. – pp. 38–45. (in Ukranian).
21. Volochiy B.Yu. Reliable model of fault-tolerant multiprocessor systems with software recovery / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovsky, O.V. Муляк, M.M. Zmysnyi, T.I. Pansky // Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio Engineering, 2013, № 54, - P.33 - 43
 22. Mandziy B.A. Estimation of economic efficiency of technical service and repair of systems of regional radio-electronic complexes / B.A. Mandziy, B.Yu. Volochiy, S.I. Hnativ, L.D. Ozirkovsky, I.V. Kulyk // Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio Engineering, - 2013, № 54, - P. 160 - 170.
 23. Volochiy B.Yu. Methods for determining the reliability of fault-tolerant software-hardware radio electronic systems / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovsky, T.I. Pansky, O.V. Mulyak // Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio Engineering, - 2013, № 55, - P. 71–79.
 24. Volochiy B.Yu. Reliable model of fault-tolerant software-hardware system on the basis of majority structure with sliding redundancy and automatic software reboot / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovsky, O.V. Муляк, M.M. Zmysnyi // Radio-electronic and computer systems. - 2013. - № 5 (64). - P. 221 - 226.
 25. Volochiy B.Yu. Methods for assessing the efficiency of the electronic complex of airspace monitoring / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovsky, O.P. Shkilyuk, A.V. Mashchak // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Radio electronics and telecommunications. - 2013, № 766, - P. 194 - 203.
 26. Ozirkovsky L.D., Model of behavior of software and hardware electronic systems / Ozirkovsky L.D., Pansky T.I // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic", Electronics. - 2013, № 764, - P. 36 - 43
 27. Volochiy B.Yu. Determining the impact of software updates on the reliability of a fault-tolerant multiprocessor system / B.Yu. Volochiy, V.–M.V. Miskiv, O.V. Mulyak, L.D. Ozirkovsky // Eastern European Journal of Advanced Technologies. - 2013, № 3/9 (63), - P. 55 - 59
 28. Mandziy B.A. Automation of construction of models of reliability of reserved and restored difficult technical systems / B.A. Mandziy, L.D. Ozirkovsky // Eastern European Journal of Advanced Technologies. - 2013, № 2/4 (62), - P. 44 - 49

29. Mandziy B. Analytical Reliability Model of a Redundant Repairable System with Limited Number of Restorations/ Bohdan Mandziy, Leonid Ozirkovskyy// Computational Problems Of Electrical Engineering. – 2013 – Vol. 3, No. 2, – pp. 54 – 60
30. Mandziy B.A. Comparative assessment of the reliability of three configurations of a fault-tolerant system with a majority structure / B.A. Mandziy, B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, M.M Zmysny, O.V. Mulyak // Radio Electronics. Informatics. Management, 2012. - № 2. - P. 44 - 50.
31. Volochiy B.Yu. Evaluation of the efficiency of using a fault-tolerant system with reconfiguration of the core of the majority structure / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, M..M Zmysnyy // Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio engineering. - 2012. - № 48. - P. 117 - 125.
32. Volochiy B. Extending The Features of Software For Reliability Analysis of Fault-tolerant Systems/ Bohdan Volochiy, Bohdan Mandziy, Leonid Ozirkovskyy//Computational Problems of Electrical Engineering, Lviv Politechnic National University, 2012. – Volume 2, number 1, – pp. 113 – 121
33. Volochiy B.Yu. A method for constructing models of behavior of complex systems of non-Markov type in the form of a graph of states and transitions / olochiy BY, Ozirkovskyy L..D, Kulik IV, // International scientific journal "Computing" Research Institute of Intelligent Computer Systems. Ternopil National Economic University, Volume 11, Issue №3. Ternopil. - 2012.– P. 262–271.
34. Volochiy B.Yu. Formalization of construction of models of discrete-continuous stochastic systems using the Erlang phase method / Volochiy BY, Ozirkovskyy L.D., Kulyk I.V. // Selection and processing of information. National Academy of Sciences of Ukraine. Interdepartmental collection of scientific works. Vip. №36 (112). - Lviv: 2012. - P. 39 - 47.
35. Ozirkovskyy L.D. Estimation of indicators of reliability and safety of information-but-control system RTP 3000 with use of RAM Commander / L.D. Ozirkovskyy, T.I. Pansky, O..V Sydorчук, I.B. Kulyk // Eastern European Journal of Advanced Technologies. Radio engineering information tools. - Volume 6, № 11 (60), 2012. - P. 37 - 40.

36. Volochiy B.Yu. Markov model as a means of complex modeling of information systems with functional redundancy / Volochiy BY, Ozirkovskyy L.D., Ulibin DO // Bulletin of the National. Lviv Polytechnic University № 470. Computer aided design systems. Theory and practice. - Lviv. - Type of Nat. Lviv Polytechnic University, 2003. - P.101 - 109
37. Mandziy B.A. Determining the parameters of the disaster recovery strategy for fault-tolerant systems based on the majority structure / B.A. Mandy, B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, M.M. Zmysnyy, I.V. Kulyk // Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Radio engineering and telecommunications. - 2011. - № 705. - P. 216 - 224.
38. Volochiy B.Yu. Models of fault-tolerant system with the use of three majoritarian structures embedded in the majority structure to solve problems of reliable design / B.Yu. Volochiy, L.D Ozirkovskyy, M.M. Zmisnyy, O.V. Mulyak // Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Radio engineering and telecommunications. - 2012. - № 738. - P. 223 - 230.
39. Ozirkovsky LD Estimation of probability of downtime of systems with redundancy and technical maintenance / L.D. Ozirkovsky, TI Pansky, OV Sydorchuk // Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio engineering. - 2012. - № 49. - P. 151– 156.
40. Volochiy B.Yu. Improving the technology of modeling discrete-continuous stochastic systems using the Erlang phase method / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, I.V. Kulyk // Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering Series. Radio engineering. - 2012. - № 48. - P. 159 - 167.
41. Volochiy B.Yu. Model of digital switching system of telecommunication network node / Volochiy B.Yu., Matychin O.V., Ozirkovskyy L.D., Stetsyuk S.O., Ulibin D.O. // Bulletin of the National. Lviv Polytechnic University, № 508, Radio Electronics and Telecommunications, Lviv. - Publishing House Nat. University "Lviv Polytechnic", - 2004. - P. 144 - 152.
42. Mandziy B.A. Program models for interactive design of fault-tolerant systems with combined structural redundancy / Mandziy B.A., Volochiy B.u.Y, Ozirkovskyy L.D. // International. scientific and technical Computing - 2008. - Vol.7. - Issue.1. - P. 153

43. Mandziy B.A. Modeling of discrete-continuous stochastic systems in problems of research of their fault tolerance / Mandziy B.A., Volochiy B.Yu., Ozirkovskyy L.D // Interdepartmental collection of scientific works "Selection and processing of information". - Lviv: FMI NASU Publishing House. - 2008, issue. 28, - p. 39 - 47
44. Mandziy B.A., Methods for estimating structural survivability of hierarchical information networks of regional electronic complexes./ Mandziy B.A., Volochiy B.Yu., Ozirkovskyy L.D. // Interdepartmental collection of scientific works "Selection and processing of information". - Lviv: FMI NASU Publishing House. - 2009, issue. 30, - P. 104 - 112
45. Volochiy B.Yu. Models for reliable design of server memory node and uninterruptible power supply / B.Yu. Volochiy, L.D Ozirkovskyy, O.V. Mulyak, V.D. Gila // Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Radio engineering and telecommunications. - 2011. –№ 680. - P. 206 - 216.
46. Ozirkovskyy L. Increasement of Functional Safety of the Behavior Algorithms of Radio Electronic Safety–Critical Systems Leonid Ozirkovskyy, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Oleksandr Shkiliuk/ Proceedings 15 th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020, Lviv–Slavsko, Ukrain, February 25 – 29, 2020 (SCOPUS)
47. Ozirkovskyy L. Methodology of Defining the Accident Rate Function for Fault Tolerant System with High Responsibility Purpose// Leonid Ozirkovskyy, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Andriy Maschak/ Proceedings of 15th International Conference ICTERI–2019, 5th International Workshop on Theory of Reliability and Markov Modeling for Information Technologies (TheRMIT 2019), Kherson, Ukraine, June 12–15, 2019, – pp. 778 – 793
48. Ozirkovskyy L.D. Methods of synthesis of safe algorithms of behavior of radio-electronic systems of responsible purpose // Ozirkovskyy L.D, Volochiy B.Yu., Zmysnyy M.M., Shkilyuk O.P. / Physico-technological problems of transfer, processing and storage information in infocommunication systems: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, November 8 - 10, 2019. -

- Chernivtsi: "City", 2019. - P. 60 - 61.
49. Ozirkovskyy L. Analysis of the maintenance strategy effectiveness based on the reliability/cost ratio / Ozirkovskyy L., Kulyk I., Mazur A., Petryshyn N., Malynovska Y. // Proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018
 50. Volochiy B. Research of efficiency indexes of radio telemetry system with short-term use / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, O. Shkiliuk, V.–M. Miskiv // Proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018
 51. Volochiy B. Method of developing unified model for estimating safety and reliability of complex systems for critical application / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy // Proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018
 52. Volochiy B. The scheme of paths method based technique for evaluating of the behavior algorithms efficiency / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, O. Shkiliuk, V. Kharchenko // Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018
 53. Ozirkovskyy L. The Automation of the Exploitation Risks Assessment of the Navigation Information System of Air Drones / L. Ozirkovskyy, Yu. Pashchuk, A. Mashchak, S. Volochiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science: proc. of the XIIIth Intern. Conf. TCSET'2016, Lviv–Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. – P. 140 – 144.
 54. Volochiy B. Automation of Quantitative Requirements Determination to Software Reliability of Safety Critical NPP I&C Systems [Electronic source] / Bohdan Volochiy, Oleksandr Mulyak, Leonid Ozirkovskyy, Vyacheslav Kharchenko // Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management, SMRLO 2016, 15 – 18 February 2016, Israel, Beer Sheva. IEEE, 2016. – pp. 337 – 346.
 55. Volochiy B. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method [Electronic source] / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyy, Oleksandr Mulyak, Sergiy Volochiy // Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic

- Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management, SMRLO 2016, 15 – 18 February, 2016, Israel, Beer Sheva. IEEE, 2016. – P. 347 - 356.
56. Volochiy B. Automation of Building the Safety Models of Complex Technical Systems for Critical Application / B. Volochiy, B. Mandziy, L. Ozirkovskyy // ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer: proc. of the 11th Intern. Conf. ICTERI 2015, Lviv, Ukraine, May 14 – 16, 2015. – Lviv, 2015. – P. 550 – 565. – CEUR–WS.org, online
57. Volochiy B. Minimal Cut Sets Determination for Renewable Systems with Limited Repairs /B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, A. Mashchak, O. Shkiliuk // Proceedings 12th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2014, Lviv – Slavsko, 2014. – P. 216 – 218.
58. Volochiy B.Yu. Obtaining minimal cut sets, which lead to loss of telecommunication system dependability / Volochiy B.Yu., Ozirkovskyy L.D. Mashchak A.V., Shkilyuk O.P/ // Proceedings of the Ukrainian scientific-practical conference "Modern problems of telecommunications and training of specialists in the field of telecommunications SPTEL-2013", Lviv, - 2013. - P. 263 - 266.
59. Bobalo Y. Reliability Analysis of Technical Systems without Redundancy with Limited Number of Repairs / Yuriy Bobalo, Bohdan Mandziy, Bohdan Volochiy, Leonid Osirkovskyy // Proceedings 11th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2012, Lviv – Slavsko, 2012.. – P. 83 – 84..
60. Mandziy B. A. Determination of the parameters of the disaster recovery strategy for fault-tolerant systems based on the majority structure / B.A. Mandziy, B.Yu. Volochy, L.D. Ozirkovskyy, M.M. Zmysny, I.V. Kulyk // Proceedings of the international symposium “Reliability and Quality”. Ed. N.K. Yurkova. Penza: Publishing House of Penz. state University, Russia, 2011, Vol. 2. - P. 52 - 57.
61. Volochiy B.Yu. Calculation of minimal cut sets for fault-tolerant systems based on a structural-automatic model / Volochiy B.Yu., Ozirkovskyy L.D., Mashchak A.V., Shkilyuk O.P., Kulyk I.V. // Proceedings of the International Scientific and Technical

- Conference "Radio Fields, Signals, Apparatus and Systems RTPSAS-2013", Kyiv, - 2013. - P. 160 - 161.
62. Volochiy B.Yu. Evaluation of the efficiency of using a fault-tolerant system with reconfiguration of the core of the majority structure / B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, M.M. Zmysnyy // International Scientific konferen-tion "Radio field signals, devices and systems (theory, practice, isto-dence, education), conference materials. - Kyiv. - 2012. - P. 39 - 40.
63. Mandziy B.A. Fail-safe system with an adaptive majority structure / B.A. Mandziy, B.Yu. Volochy, L.D. Ozirkovskyy, M.M. Zmysnyy // Proceedings of the international symposium "Reliability and Quality". Ed. N.K. Yurkova. Penza: Publishing House of Penz. state University, Russia. - 2012, T. 1. - P. 351 - 353.
64. Volochiy B. Models of Fault-Tolerant Systems with Reconfiguration of the Core of Structure of «K of N» / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, M. Zmysnyi // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: proceedings of the XI-th. International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavsko, Ukraine.: Publishing National University «Lviv Politechnic». – 2012. – pp. 89 – 90.
65. Volochiy B. Estimation of Indexes of Efficiency of Radioelectronic Hardware-Software Systems Based on the Algorithm of Behavior /B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, O. Shkiliuk, A. Mashchak // Proceedings of the XI-th. International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavsko, Ukraine.: Publishing National University «Lviv Politechnic». 2012. – P. 322 – 323.
66. Volochiy B.Yu. Development of reliable models of fault-tolerant system with reconfiguration of the core of the majority structure / B.Yu. Volochiyy, L.D. Ozirkovskyy, M.M. Zmysnyy, I.V. Kulyk // V International Scientific and Technical Conference "Modern Problems of Radio Electronics, Telecommunications and Instrument Making SP RTP-2011 .: Vinnytsia. - 2011. - P. 51 - 52.
67. Mandziy B.A. Determining the effectiveness of the maintenance strategy of the control system with a majority structure / B.A. Mandziy, B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyy, M.M. Zmysnyy, I.V. Kulyk // Proceedings of the XVIII International Conference on Automatic Control "Automation - 2011", September 28 - 30, 2011, Lviv. - C. 154 - 155.

68. Mandzij B. Kompleksowe modelowanie systemu informatycznego z rezerwowaniem funkcjonalnym/ Mandzij B., Woloczij B., Ozirkowskyj L., Ulybin D. //Prace II Krajowego Sympozjum „Modelowanie i symulacja komputerowa w technice” MiS’2003, Lodz, 2003. – pp. 133 – 136.
69. Mandziy B.A. The concept of a program module for modeling the structure and behavior of information systems / B. Mandziy, B. Volochiy, A. Matichin, L. Ozirkovskyy // Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”, Penza, RF, 2006. - P.13 - 15.
70. Volochiy B. Designing of Fault-Tolerant Radioelectronic Systems with Majority Structure/ Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyy, Mykhailo Zmysnyi, Ihor Kulyk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET’2010 , February 23 – 27, 2010, Lviv-Slavsko, Ukraine. – pp. 35 – 39

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	34
ВСТУП.....	35
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕОРІЇ СИНТЕЗУ БЕЗПЕЧНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ЕТАПІ СИСТЕМОТЕХНІЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ.....	48
1.1. Сучасний стан методів оцінки безпечності та надійності на етапі системотехнічного проектування.....	53
1.1.1. Загальна характеристика технологій моделювання для аналізу ризиків експлуатації радіоелектронних систем відповідального призначення.....	54
1.2. Обмеження та «вузькі місця» сучасних методів оцінки надійності та безпечності РЕСВП на етапі експлуатації.....	64
1.3. Особливості синтезу безпечних радіоелектронних систем відповідального призначення, в склад яких входить інформаційно- керуюча система.....	75
1.4. Аналіз підходів синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП на етапі системотехнічного проектування.....	78
Висновки до розділу 1.....	91
РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАСАД ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕЧНОСТІ ПРОГРАМНО- АПАРАТНИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ПРОСТОРИ СТАНІВ.....	94
2.1. Показники функціональної безпечності програмно-апаратних систем відповідального призначення та методи їх отримання.....	96
2.2. Метод розділення станів системи на працездатні та непрацездатні.....	100
2.2.1. Удосконалення структури вектора стану для однозначної класифікації різновидів непрацездатних станів.....	102

2.2.2. Принципи побудови бінарної структурно-автоматної моделі.....	105
2.2.3. Методика вибору непрацездатних станів з простору станів.....	107
2.3. Формування функції аварійності для оцінювання безпечності програмно-апаратних систем відповідального призначення.....	109
2.3.1. Поняття функції аварійності.....	109
2.3.2. Створення маски для вибору непрацездатних станів, які формують вираз функції аварійності.....	110
2.3.3. Метод формування функції аварійності в підпросторі непрацездатних станів.....	111
2.4. Метод побудови дерева відмов на основі функцій аварійності.....	119
2.4.1. Запис логічної функції дерева відмов на основі функції аварійності..	120
2.4.2. Побудова графічного представлення дерева відмов.....	121
2.5. Валідація розроблених методів та методик.....	121
Висновки до розділу 2.....	129
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, ЯКА ЗАБЕЗПЕЧУЄ ЗАДАНИЙ РІВЕНЬ БЕЗПЕЧНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	131
3.1. Взаємодія ремонтної бригади з сервісним центром при проведенні аварійно-відновлювальних робіт.....	132
3.2. Взаємодія ремонтної бригади з сервісним центром при проведенні планово-профілактичного обслуговування планово-профілактичного обслуговування.....	134
3.3. Показники функціональної безпечності обслуговуваних радіоелектронної системи відповідального призначення.....	135
3.4. Визначення середнього значення ймовірності виникнення аварійної ситуації через середні значення ймовірностей виникнення мінімальних січень.....	137

3.4.1. Метод визначення середнього значення ймовірності виникнення мінімального січення при наявності прихованих відмов.....	138
3.4.2. Валідація методу.....	140
3.5. Представлення процесу технічного обслуговування радіоелектронних систем відповідального призначення у вигляді моделі системи масового обслуговування.....	145
3.6. Методика синтезу моделі стратегії технічного обслуговування групи РЕСВП у вигляді системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена.....	150
3.6.1. Розроблення структурно-автоматної моделі стратегії технічного обслуговування радіоелектронної системи відповідального призначення з врахуванням виникнення аварійних ситуацій, спричинених явними та прихованими відмовами.....	151
3.7. Визначення функції готовності радіоелектронної системи відповідального призначення з врахуванням ймовірності виникнення аварійних ситуацій.....	160
3.7.1 Метод визначення функції готовності з врахуванням ймовірності виникнення аварійної ситуації.....	161
3.7.2. Методика дослідження функції готовності, ймовірності виникнення аварійної ситуації та функцій аварійності радіоелектронної системи відповідального призначення з використанням розробленого методу.....	169
3.8. Розроблення методу синтезу параметрів стратегії технічного обслуговування за заданим значенням показника її ефективності.....	171
3.9. Автоматизація синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування та ремонту радіоелектронної системи відповідального призначення.....	176
Висновки до розділу 3.....	176

РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ БЕЗПЕЧНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА БАЗІ МАЖОРИТАРНОЇ СТРУКТУРИ.....	178
4.1. Синтез безпечних необслуговуваних радіоелектронних систем відповідального призначення на базі відмовостійкої системи з мажоритарною структурою і реконфігурацією.....	183
4.1.1. Відмовостійка радіоелектронна система відповідального призначення з реконфігурацією мажоритарної структури.....	184
4.1.2. Перелік процедур, що формують поведінку відмовостійкої РЕСВП, після відмови системи в ядрі мажоритарної структури.....	185
4.1.3. Розроблення моделі відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури.....	186
4.1.4. Методика надійнісного синтезу відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури за допомогою розробленої моделі.....	197
4.2. Синтез необслуговуваних відмовостійких радіоелектронних систем відповідального призначення на базі використання дворівневих мажоритарних структур.....	204
4.2.1. Конфігурація відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур.....	205
4.2.2. Перелік процедур, які визначають поведінку відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних після відмови модуля або мажоритарного елемента.....	207
4.2.3. Опис особливостей поведінки відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, обумовлених наявністю програмного забезпечення.....	208
4.2.4. Розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійкої РЕСВП для двох правил прийняття рішення для формування вихідного сигналу.....	208

4.2.5. Модель відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур.....	213
4.2.6. Методика синтезу відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур.....	215
4.3. Застосування розроблених моделей та методик до процедур аналізу та синтезу відмовостійких РЕСВП з різними типами мажоритарних структур.....	220
4.3.1. Порівняння надійності відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур та відмовостійкої РЕСВП на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом голосування.....	220
4.3.2. Порівняння надійності відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур у та відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури і відповідною зміною правила голосування.....	223
4.3.3. Надійніший параметричний синтез радіоелектронної системи відповідального призначення довготривалого використання.....	225
Висновки до розділу 4.....	235
РОЗДІЛ 5. СИНТЕЗ БЕЗПЕЧНИХ АЛГОРИТМІВ ПОВЕДІНКИ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	237
5.1. Методологія синтезу безпечних алгоритмів поведінки радіоелектронних систем відповідального призначення.....	243
5.2. Методика підтвердження достовірності отриманого результату синтезу безпечного алгоритму поведінки.....	247
5.3. Методика формування блок-схеми еквівалентного алгоритму поведінки.....	250
5.4. Методика побудови структурно-автоматної моделі алгоритму поведінки радіоелектронної системи відповідального призначення.....	252
5.4.1. Формування множини формальних параметрів та вектора стану.....	253

5.4.2. Відображення в структурно-автоматній моделі часової надлишковості, внесеної в алгоритм поведінки	255
5.4.3. Методика верифікації розробленої структурно-автоматної моделі...	257
5.5. Формування аналітичної моделі алгоритму поведінки у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена та її розв’язання.....	257
5.6. Методика компонування формул для визначення показників ефективності алгоритму поведінки.....	259
5.7. Методика розв’язання задач синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП.....	261
Висновки до розділу 5.....	271
ВИСНОВКИ.....	273
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	277
Додаток А Структурно-автоматні моделі відмовостійких РЕСВП з мажоритарною структурою.....	307
ДОДАТОК Б. Алгоритм втоматизації синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування та ремонту радіоелектронної системи відповідального призначення	315
ДОДАТОК В. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	322
ДОДАТОК Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	331

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АВР – аварійно-відновлювальні роботи

АП – алгоритм поведінки

ВС – вектор станів

ГСП – граф станів і переходів

МС – мажоритарна структура

ППО – планово-профілактичне обслуговування

РЕСВП – радіоелектронна система відповідального призначення

САМ – структурно-автоматна модель

ТО – технічне обслуговування

ФА – функція аварійності

ВСТУП

Дисертаційна робота присвячена проблемі підвищення рівня функціональної безпеки радіоелектронних систем відповідального призначення (Safety Critical Systems) на етапі їх системотехнічного проектування. Особливістю радіоелектронних систем відповідального призначення є те, що їх функціональна безпека залежить не тільки від надійності апаратних чи програмних засобів, але й від алгоритму поведінки (функціонування), наявності та різновиду відмовостійкої структури системи та процедур її технічного обслуговування. Проте моделі, методи та методики, які дозволяють оцінити рівень їх безпеки з врахуванням вищезазначених особливостей – відсутні.

Актуальність теми. Радіоелектронна система відповідального призначення (РЕСВП) – це програмно-апаратна система, яка є складовою системи керування складними технічними системами (телекомунікаційні системи, транспорт (авіація, залізниця, трубопроводи), медичні системи, робототехнічні системи, енергетичні системи, військова техніка, технологічні лінії тощо), вихід з ладу яких призводить до втрати працездатності системи керування, а це в свою чергу – до аварійної ситуації складної технічної системи. Функціональною безпекою, згідно стандартів IEC 61508, ISO 26262, називають властивість системи, при виході з ладу її окремих підсистем чи модулів, переходити в такий режим роботи, в якому вона не несе загрози життю людей, навколишньому середовищу чи іншим системам.

Стрімке впровадження штучного інтелекту у системи керування призводить до того, що кінцеве рішення про управляючу дію приймає система керування, а не людина. Крім цього, такі системи стають повністю автономними (роботизовані безпілотні літальні апарати, пристрої та системи Інтернету речей, розподілені хмарні телекомунікаційні системи, системи індустріального Інтернету речей тощо), і помилки в проектуванні їх структури та алгоритмів поведінки, які згодом реалізують як програмне забезпечення, призводять до відмов чи збоїв. А вони в свою чергу призводять до появи аварійної ситуації, яку вже неможливо усунути за допомогою оператора. Відповідно, зважаючи на потенційні наслідки аварійних ситуацій, проблема забезпечення функціональної безпеки РЕСВП на етапі

системотехнічного проектування виходить на перше місце.

Проблемою підвищення функціональної безпечності РЕСВП займається велика кількість фахівців та вчених, найвідомішими з яких є Н. Бар, З. Блувбанд, А. Верма, Б. Волочій, К. Ерікссон, І. Кнєзевич, Х. Кумамото, А. Можаяев, І. Рябінін, Х. Фам, В. Харченко, Е. Хенлі, М. Чепін. В їх працях розглянуто різні методи забезпечення та аналізу функціональної безпечності, що заклало теоретичні підвалини для розроблення сучасних програмно-інформаційних комплексів (Safety Commander, RAM Commander, ReliaSoft Suite, ITEM ToolKit, AttackTree, Reliability Workbench).

Зокрема, в працях Е. Хенлі та Х. Кумамото розроблена методологія оцінювання ризику експлуатації технічних систем на базі дерев відмов, що дало поштовх для подальшого розвитку теорії безпечності в працях Н. Бара, А. Верма та І. Кнєзевича. Теорія функціональної безпечності апаратних засобів докладно розвинута в працях В. Харченко, а програмних засобів – в працях Х. Фама. Для систем, які склалися з декількох підсистем чи модулів дані підходи були прийнятними. Однак, із збільшенням складності технічних систем ці підходи вимагали побудови громіздких моделей і потребували значних часових затрат на їх валідацію та аналіз. Спроби автоматизувати цей процес були здійснені З. Блувбандом, А. Можаяєвим та І. Рябініним. Крім цього, основним недоліком методики аналізу безпечності за допомогою дерева відмов виявилось те, що отримані моделі є статичними і не відображають можливості активного резервування, особливості стратегій технічного обслуговування, вплив засобів контролю та діагностики. Частково усунути ці недоліки вдалося М. Чепіну завдяки застосування динамічних дерев відмов для оцінювання функціональної безпечності систем. Однак на сьогодні застосування динамічних дерев відмов не реалізовано в жодному з доступних спеціалізованому програмному забезпеченні для оцінювання функціональної безпечності.

Наблизитись до динамічних моделей безпечності дав змогу метод автоматизованої побудови моделей дискретно-неперервних стохастичних систем у вигляді графа станів і переходів на основі структурно-автоматної моделі,

запропонований Б. Волочієм та В. Беляєвим. Даний метод покладено в основу інформаційної технології аналізу надійнісної та функціональної поведінки радіоелектронних систем та комплексів і дає змогу автоматизовано будувати динамічні ймовірнісні моделі без обмеження на їх розмірність.

Незважаючи на розвиток теорії та практики, вирішення проблеми підвищення рівня функціональної безпечності РЕСВП призводить до зменшення рівня надійності таких систем. Це породжує протиріччя, оскільки до сучасних РЕСВП висуваються однаково високі вимоги, як до рівня функціональної безпечності, так і до рівня надійності. Справа в тому, що засоби забезпечення функціональної безпечності проектують як окрему додаткову підсистему і з точки зору надійності вона є послідовним з'єднанням з основною системою, що зменшує надійність РЕСВП в цілому.

Тому актуальною проблемою є розвиток теоретичних засад, а на їх основі методів, моделей та методик, які дадуть змогу визначати слабкі місця в РЕСВП з точки зору функціональної безпечності. В ці місця вносять необхідні види надлишковості, щоб підвищити функціональну безпечність і підвищувати або принаймні не знижувати надійність. Причому моделі та методи повинні враховувати як особливості підключення різних видів надлишковості і наявність засобів контролю та діагностики, так і особливості стратегій технічного обслуговування та ремонту.

Таким чином, в дисертаційній роботі розв'язана важлива науково-прикладна проблема розвитку теоретичних засад комплексного забезпечення рівня функціональної безпечності та надійності радіоелектронних систем відповідального призначення на етапі їх системотехнічного проектування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувалися у відповідності до наукового напрямку кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету «Львівська політехніка» – «Теорія і методи проектування радіотехнічних кіл, систем і комплексів та забезпечення їх якості», в рамках низки держбюджетних науково-дослідних робіт: ДБ Вербаль (2004 – 2006) «Розробка комп'ютерних

моделей відмовостійких радіоелектронних засобів», № держ. реєстрації 0104U002291; ДБ КРОКІТ (2007 – 2009) «Розробка комп'ютерних макромделей радіоелектронних систем та їх функціональних вузлів, адаптованих до задач надійнісного проектування», № держреєстрації 0107U000836; ДБ ПНРЛ (2010 – 2012) «Розроблення моделей, методів та алгоритмів для автоматизованої оцінки показників надійності радіоелектронних та електромеханічних пристроїв та систем», № держреєстрації 0110U001098; ДБ Трикаф (2013 – 2014) «Розроблення моделей надійності, ризику та безпечності програмно–апаратних технічних систем», № держреєстрації 0113U001371; ДБ/Ризик (2017 – 2018) «Розробка математичного забезпечення для програмного засобу аналізу функціональної безпечності та надійності програмно-апаратних систем відповідального призначення», № держреєстрації 0117U004458.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процедур синтезу радіоелектронних систем відповідального призначення шляхом розвитку теоретичних засад, а на їх основі створення нових методів для побудови комплексних моделей, які дають змогу оцінювати, як рівень функціональної безпечності, так і рівень надійності РЕСВП з урахуванням їх відмовостійкої структури, специфіки алгоритму поведінки та різновиду стратегії технічного обслуговування.

Для досягнення поставленої мети в межах дисертаційних досліджень були сформульовані і розв'язані такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан теоретичних підходів та практичних методик забезпечення заданого рівня безпечності систем відповідального призначення на етапі їх системотехнічного проектування.
2. Удосконалити існуючі теоретичні засади побудови моделей РЕСВП, з яких можна отримувати, як показники функціональної безпечності, так і показники надійності шляхом розділення простору непрацездатних станів на непрацездатні безпечні стани, критичні та катастрофічні стани.
3. Розробити методи оцінювання показників функціональної безпечності

РЕСВП, які дають змогу синтезувати доцільну, з точки зору безпечності, стратегію технічного обслуговування та ремонту.

4. Розробити моделі для синтезу безпечних відмовостійких радіоелектронних систем відповідального призначення з мажоритарною структурою з реконфігурацією ядра, з дворівневим принципом мажоритарного резервування, з технічним обслуговуванням та ремонтом і з системою контролю та діагностики.
5. Запропонувати характеристики функціональної безпечності, які дають змогу синтезувати безпечні алгоритми поведінки РЕСВП з доцільним рівнем часової та функціональної надлишковості та розробити методи та методики синтезу таких алгоритмів.

Об'єктом дослідження є процес синтезу радіоелектронних систем відповідального призначення із заданим рівнем функціональної безпечності та надійності.

Предмет дослідження: методи, моделі, алгоритми і методики аналізу та синтезу відмовостійкої структури безпечних радіоелектронних систем відповідального призначення, алгоритму її поведінки та стратегії технічного обслуговування.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше запропоновано:

1. Функцію аварійності, яка на відміну від існуючих кількісних показників функціональної безпечності, відображає взаємозв'язок між показниками безпечності та надійності, що дає змогу синтезувати із заданими рівнем функціональної безпечності та надійності наступні складові РЕСВП: відмовостійкі структури, алгоритми поведінки з часовою та функціональною надлишковістю, процедури стратегій технічного обслуговування та ремонту.
2. Метод визначення функції аварійності на підставі розділення непрацездатних станів на непрацездатні безпечні стани, непрацездатні критичні та непрацездатні катастрофічні стани, що на відміну від існуючих підходів, дає змогу отримати мінімальні січення (слабкі місця системи) з моделі у вигляді

графа станів і переходів без побудови дерева відмов. Це забезпечує врахування впливу на показники функціональної безпечності: динаміки підключення та різновиди активного резерву (гарячий, холодний, теплий); функціонування засобів контролю, діагностики та комутації; різновиду стратегії технічного обслуговування; часової та функціональної надлишковості, введеної в алгоритм поведінки радіоелектронної системи відповідального призначення.

3. Метод розрахунку середнього значення ймовірності існування мінімального січення, який на відміну від існуючих, враховує дію прихованих відмов не тільки в кінці інтервалу планово-профілактичного обслуговування, а в будь-який момент часу на інтервалі експлуатації, що дає змогу отримати достовірні значення ймовірностей існування мінімальних січень для випадків, коли мінімальне січення містить виключно приховані відмови або комбінації прихованих та явних відмов. Разом з цим, за допомогою середніх значень ймовірностей появи мінімальних січень можна отримати середнє значення ймовірності появи аварійної ситуації РЕСВП за наявності прихованих відмов.
4. Показники безпечності для відмовостійких РЕСВП з мажоритарною структурою: ймовірність потрапляння РЕСВП в передаварійну ситуацію та частоту потраплянь в аварійну ситуацію, які на відміну від існуючих кількісних показників, дають змогу визначити момент здійснення реконфігурації мажоритарної структури та вибрати доцільні варіанти резервування та стратегії технічного обслуговування. А це, насамперед, дає змогу синтезувати безпечні РЕСВП з мажоритарною структурою, які з мінімальною кількістю надлишковості забезпечують задані показники функціональної безпечності та надійності.
5. Характеристику безпечності експлуатації алгоритму поведінки РЕСВП – частоту потрапляння у стани неуспішного завершення, яка на відміну від існуючих показників, відображає зв'язок між надлишковістю (часовою і функціональною) введеною в алгоритм і функціональною безпечністю. Це дало змогу під час розв'язання задачі синтезу алгоритму поведінки оцінювати вплив введеної часової і функціональної надлишковості на показники

ефективності РЕСВП, а врахування замість абсолютних значень від'ємних приростів частоти потрапляння в стани неуспішного завершення алгоритму поведінки, дає змогу не завищувати вимоги до апаратних засобів РЕСВП.

Набули подальшого розвитку:

1. Метод простору станів з використанням структурно-автоматної моделі, в якому, на відміну від існуючого, запропоновано удосконалену структуру вектора стану та маску аварійної ситуації, що дало змогу автоматизовано розділити простір непрацездатних станів в залежності від рівня критичності відмови, що забезпечило отримання траєкторії розвитку аварійних ситуацій і в результаті отримати комплексну модель, з якої визначати як показники надійності, так і функціональної безпечності.
2. Метод побудови дерева відмов, згідно якого, на відміну від існуючого, дерево відмов формується на базі функції аварійності і дає змогу перейти до логіко-ймовірнісної моделі від моделі у вигляді графа станів і переходів, що забезпечує візуалізацію аварійної ситуації і полегшує валідацію логіко-ймовірнісної моделі проектантом.
3. Моделі стратегій технічного обслуговування для планово-профілактичного обслуговування та аварійно-відновлювальних робіт, які, на відміну від існуючих, дають змогу враховувати вплив на показники функціональної безпечності: виникнення прихованих відмов в будь-який момент часу; простою РЕСВП при відключенні її підсистем під час проведення процедур технічного обслуговування; аварій, спричинених раптовими відмовами; і призначені для розв'язання задач синтезу стратегії технічного обслуговування із заданим рівнем функціональної безпечності та мінімізувати вплив на безпечність прихованих відмов.
4. Моделі відмовостійких систем з мажоритарною структурою для РЕСВП, які на відміну від існуючих, забезпечують врахування впливу на функціональну безпечність наявності резерву, можливість реконфігурації мажоритарної структури, використання технічного обслуговування і ремонту, і дають змогу синтезувати структуру РЕСВП із заданим рівнем функціональної безпечності

і доцільним рівнем структурної надлишковості, що є особливо важливим для бортових інформаційно-керуючих систем літальних апаратів, зокрема безпілотних, для яких масо-габаритні показники є критичними.

5. Метод синтезу параметрів стратегії технічного обслуговування за заданим значенням показника функціональної безпечності, в основу якого покладено визначення функції готовності з врахуванням ймовірності появи аварійної ситуації і, на відміну від існуючих методів, враховує в тривалостях простою не тільки зупинку РЕСВП при проведенні аварійно-відновлювальних робіт, а й примусову зупинку роботи РЕСВП підчас проведення планово-профілактичних обслуговувань для пошуку та усунення прихованих відмов, що дає змоги уникнути завищення значень функції готовності, а відповідно підвищити достовірність.

Практичне значення одержаних результатів. Основним практичним результатом дисертації є зменшення інтелектуального навантаження на розробника РЕСВП за рахунок розроблення низки методик і алгоритмів. Ці методики і алгоритми дали змогу: автоматизувати окремі етапи процесу оцінювання ризику експлуатації РЕСВП; підвищити достовірність, отриманих показників функціональної безпечності та надійності за рахунок підвищення ступеня адекватності моделей у вигляді графа станів та переходів; зменшити затрати часу розробника на розв'язання проектних завдань синтезу відмовостійкої структури, алгоритму поведінки та процедур стратегії технічного обслуговування та ремонту РЕСВП. Серед одержаних практичних результатів слід відзначити:

- 1) Методику синтезу моделі стратегії технічного обслуговування сукупності РЕСВП у вигляді системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Розроблена методика, на відміну від існуючих, дає змогу проектантові отримувати модель, в якій враховано вплив на показники функціональної безпечності РЕСВП (ймовірність появи аварійної ситуації та ймовірності існування мінімальних січень) наступних параметрів стратегії технічного обслуговування: періодичності фази моніторингу прихованих відмов; середнє значення тривалості фази проведення планово-профілактичного обслуговування; періодичності фаз проведення планово-

профілактичного обслуговування; середнє значення тривалості фази проведення аварійно-відновлювальних робіт; швидкість переходу ремонтної бригади від планово-профілактичного обслуговування до аварійно-відновлювальних робіт; кількість РЕСВП, які можуть бути на обслуговуванні одної ремонтної бригади. А також враховано показники надійності РЕСВП.

2) Методики надійнісного параметричного синтезу РЕСВП з мажоритарною структурою з реконфігурацією та дворівневою мажоритарною структурою. Показано, що середнє значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневої мажоритарної структури, з умовою збереження її працездатності, коли справним залишається 1 ядро із 3, є більшим, зокрема в порівнянні з відмовостійкою РЕСВП на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом прийняття рішення типу «2 із 3» на 9480 годин (або на 114 %), а в порівнянні з відмовостійкою РЕСВП з використанням дворівневої мажоритарної структури, з умовою збереження її працездатності, коли справними залишаються 2 ядра із 3, на 10937 год. (або на 159 %).

3) Методологію синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП, в яких на відміну від існуючих врахована часова надлишковість, у вигляді циклів повторного виконання критичних функцій, та функціональну надлишковість у вигляді передачі виконання задачі іншим підсистемам РЕСВП. Ця методологія дає змогу проєктантам створювати методики синтезу безпечних алгоритмів поведінки для кожного конкретного типу РЕСВП, в яких є можливість використовувати названі вище види надлишковості і досягти заданого рівня ймовірності виконання задачі при жорстких обмеженнях на тривалість виконання задачі.

4) Методику підтвердження достовірності отриманого результату синтезу безпечного алгоритму поведінки. Дана методика забезпечує підтвердження достовірності отриманого результату синтезу безпечного алгоритму поведінки РЕСВП шляхом його отримання принципово іншим методом, оскільки на етапі системотехнічного проєктування отримати результати експериментальним шляхом є неможливим.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено:

- Компанія МС Зв'язок, при розробленні стратегій технічного обслуговування коміркових станцій мобільного зв'язку.
- ТОВ «Поліном–Стиль» – для оцінювання безпечності системи автоматизованого керування.
- Науковий центр Академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного – для оцінювання функціональної безпечності та надійності безпілотних літальних апаратів, для аналізу ефективності розвідувальних комплексів.
- У держбюджетних науково–дослідних роботах , що виконувалися на кафедрі теоретичної радіотехніки та радіовимірювань з 2004 по 2018 рік.
- у навчальний процес спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» в курс лекцій з дисциплін «Надійнісне проектування телекомунікаційних систем та мереж», «Методи забезпечення надійності великих систем», «Технологія моделювання ТК систем».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належить: [1, 4, 6, 26, 47, 51, 54, 69] – обґрунтування необхідності розділення простору непрацездатних станів на безпечні, критичні та аварійні, поняття функції аварійності, метод визначення функції аварійності, удосконалення структури вектора станів, поняття маски аварійної ситуації, концепція автоматизації процедур вибору різних типів непрацездатних станів; [7] – метод отримання середніх значень ймовірності існування мінімальних січень для випадку, коли вони містять комбінації прихованих та явних відмов або виключно приховані відмови; [5, 12] – метод отримання дерева відмов з функції аварійності, алгоритм автоматизованої побудови дерева відмов; [8, 11, 14, 15, 16] – метод синтезу безпечних алгоритмів РЕСВП, поняття функції безпечності для алгоритмів поведінки; [2, 9, 18, 19, 39] — преставлення процесу технічного обслуговування РЕСВП у вигляді системи масового обслуговування, метод синтезу параметрів стратегії технічного обслуговування за заданим значенням показника її ефективності, моделі стратегій планово–профілактичного обслуговування та

аварійно–відновлювальних робіт, алгоритми автоматизованого синтезу стратегій технічного обслуговування; [10] – моделі відмовостійких систем з мажоритарною структурою; [3] – структурна схема надійності РЕСВП безпілотного літального апарата; [13, 20, 26, 35, 54, 55, 56, 60, 62] – комплексна модель у вигляді станів для отримання з неї мінімальних січень, поняття бінарної структурно–автоматної моделі; [17, 53] – методика валідації методу синтезу безпечних алгоритмів поведінки за допомогою схеми шляхів; [21, 22, 57, 58] – математична модель стратегії технічного обслуговування з врахуванням виникнення аварійних ситуацій, спричинених явними та прихованими відмовами; [37, 61] – метод визначення функції готовності з врахуванням ймовірності появи аварійної ситуації; у роботах [27, 67] – метод синтезу параметрів стратегії технічного обслуговування за заданим значенням показника її ефективності; [32, 33, 34, 41] – методика та моделі синтезу моделі стратегії технічного обслуговування групи РЕСВП у вигляді системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена для випадків експоненційного та неекспоненційного розподілу ймовірності для тривалостей перебування у станах; [29, 49] – модель та методика дослідження функції готовності, ймовірності появи аварійної ситуації та функцій аварійності РЕСВП; [24, 31, 63, 64, 66] – модель безпечної відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією ядра мажоритарної структури; [28, 40] – алгоритми автоматизації для методики синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування та розрахунку функції готовності РЕСВП за допомогою програмного забезпечення MatLab; [23, 39] – модель та методика визначення показників надійності для синтезу структури РЕСВП із заданим рівнем безпечності; [30, 64, 38, 70] – модель та методика синтезу безпечної відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневої мажоритарної структури; [43 – 46, 48, 50, 52, 59, 65] – метод та моделі для розв’язання задачі синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП; [36, 42, 68] – модель та методика введення часової та функціональної надлишковості в алгоритм поведінки.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертаційної роботи представлялися, доповідалися та були обговорені на 30-ти

міжнародних та всеукраїнських науково–технічних конференціях: міжнародна науково–технічна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп’ютерних наук TCSET» (Україна, Славське–Львів, 2004, 2006, 2008, 2010, 2016, 2018, 2020), міжнародна науково–технічна конференція CADSM «Досвід розробки та застосування приладо–технологічних САПР в мікроелектроніці» (Україна, Поляна 2003, 2005, 2011), міжнародна науково–технічна конференція «International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management, SMRLO» (Ізраїль, Бер–Шева, 2016), міжнародний симпозиум «Надёжность и качество» (Росія, Пенза, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008, 2011, 2012), міжнародна науково–технічна конференція «Modelowanie i symulacja komputerowa w technice» MiS’2003, (Польща, Лодзь, 2003), міжнародна науково–технічна конференція «Uradzenia I systemy radioelektroniczne UiSR’09» (Польща, Варшава, 2009), міжнародна науково–технічна конференція «ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer: ICTERI» (Україна, 2015, 2019), міжнародна науково–технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи, РТПСАС» (Україна, Київ 2012, 2013, 2014), міжнародна науково–технічна конференція «Фізико–технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано– та мікроелектроніки PREDT», (Україна, Чернівці, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018, 2019); міжнародна науково–технічна конференція «Dependable Systems, Services & Technologies DeSSerT» (Україна, Київ, 2018); міжнародна конференція з інформаційно–телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки УкрМіКо’2017 (Україна, Київ, 2017); міжнародна науково–технічна конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Україна, Запоріжжя 2012, 2014), міжнародна науково–технічна конференція «Computer Science & Engineering CSE» (Україна, Львів, 2013), міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика» (Україна, Львів, 2011), міжнародна науково–практична конференція «Информационно–телекоммуникационные системы» (Росія, Москва, 2005), міжнародна науково–технічна конференція

«Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития» (Росія, Туапсе, 2007), всеукраїнські науково–практичні конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій СПТЕЛ» (Львів, 2011, 2012, 2013, 2014), «Проблеми та перспективи розвитку економіки і підприємництва та комп'ютерних технологій в Україні» (Львів, 2006, 2008, 2011, 2013), «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування СПРТП» (Вінниця, 2009, 2011).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертаційній роботі, опубліковано 118 наукових праць, серед них монографій – 2, патент України на винахід – 1, статей у іноземних періодичних виданнях – 5 (з них 5 – у науковій періодиці, що входить до міжнародних наукометричних баз різного рівня Scopus, Index Copernicus, Infobase Index, Academic Research Index), статей у фахових виданнях України – 36 (з них 13 – у науковій періодиці, що входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus), у періодичних наукових виданнях України – 1, у збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських конференцій – 73, (з них – 27 індексованих у наукометричних базах Scopus та Web of Science).

Структура та обсяг роботи. Робота складається з переліку умовних скорочень, розширеної анотації українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 353 сторінки друкарського тексту, з яких 245 сторінок основного тексту, 61 рисунок, 17 таблиць, список використаних джерел із 253 найменувань, 4 додатки на 76 сторінках. Додатки містять структурно-автоматні моделі та алгоритм автоматизації синтезу показників ефективності стратегій технічного обслуговування РЕСВП, акти впровадження та список наукових праць автора.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕОРІЇ СИНТЕЗУ БЕЗПЕЧНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ЕТАПІ СИСТЕМОТЕХНІЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Особливістю етапу системотехнічного проектування радіоелектронних систем відповідального призначення (РЕСВП) є те, що він має обмежену тривалість – два-три місяці. За цей час потрібно сформувані конкурентні варіанти реалізації системи і на основі аналізу вибрати доцільний.

Разом з формуванням структури та алгоритму поведінки РЕСВП, на етапі системотехнічного проектування, необхідно вирішити дві важливих задачі – забезпечення заданого рівня безпечності та заданого рівня надійності. Безпечність - це властивість системи, при виході з ладу підсистем чи модулів, переходити в такий стан, в якому система не несе небезпеки для життя і здоров'я людей, небезпеки для навколишнього середовища і для інших систем.

Забезпечення заданого рівня надійності РЕСВП здійснюють при синтезі структури і при синтезі алгоритму поведінки. При синтезі структури системи використовують відмовостійкі конфігурації та вибирають стратегії технічного обслуговування. Забезпечення заданого рівня надійності при синтезі алгоритму поведінки вирішують введенням різних видів надлишковості (часової, інформаційної, функціональної).

При формуванні структури та алгоритму поведінки РЕСВП, на етапі системотехнічного проектування, необхідно вирішити дві важливі задачі: забезпечення заданого рівня функціональної безпечності та заданого рівня надійності. Під час вирішення цих задач виникає протиріччя (рис. 1.1). Для досягнення заданого рівня функціональної безпечності визначають слабкі місця РЕСВП і вводять засоби підвищення безпечності. Однак при введенні в систему додаткових засобів для забезпечення безпечності знижується надійність системи, оскільки д-даткові елементи будуть, з точки зору надійності, послідовно з'єднані з іншими елементами системи. Разом з цим рівень безпечності, особливо на етапі

експлуатації, залежить від технічного обслуговування. А стратегія технічного обслуговування системи в конкретних умовах експлуатації закладається (вибирається) саме на етапі системотехнічного проектування.

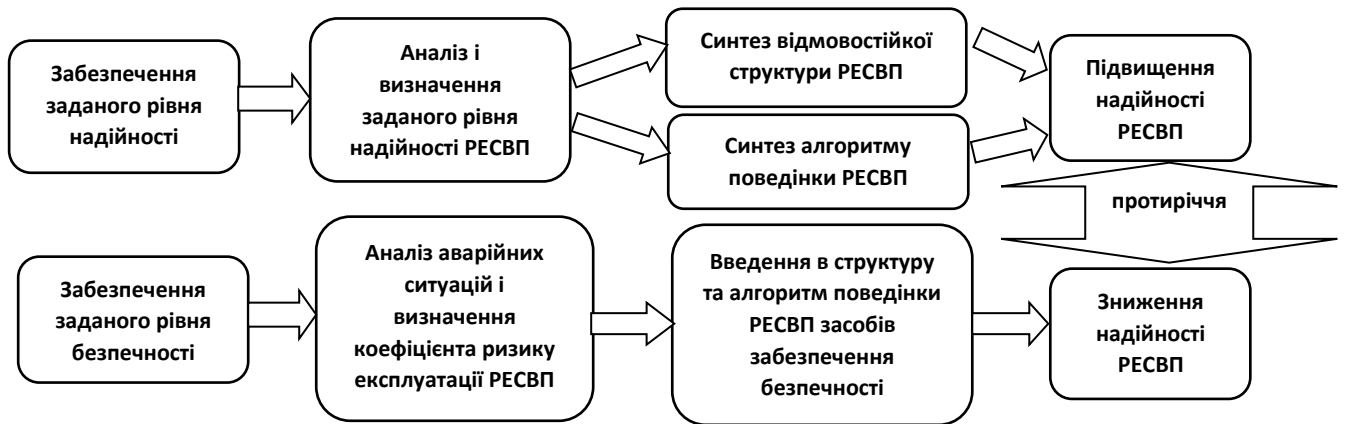


Рис. 1. Протиріччя між надійністю та функціональною безпечністю РЕСВП

Це протиріччя посилюється й тим, що існуючі стандарти з надійності (MIL-HDBK-217, FIDES, Telcordia) регламентують визначення показників надійності і не враховують безпечність системи, а стандарти з безпечності (IEC 60812:2066 Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA), IEC 61508 Edition 2.0 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, та Guidance on Failure Modes & Effects Analyses (FMEAs)) визначають показники безпечності без урахування впливу засобів забезпечення безпечності на значення показників надійності (рис. 1.2).

Оцінка ризику виникнення аварійної ситуації підчас експлуатації РЕСВП регламентується рекомендаціями європейської комісії [1], рядом військових стандартів [2, 3] та міжнародних стандартів [4 – 6] і є необхідною практично на усіх етапах життєвого циклу РЕСВП, і в першу чергу, на системотехнічному етапі проектування. В цьому випадку показником безпечності експлуатації РЕСВП є рівень ризику експлуатації. Метою оцінювання ризику експлуатації є ідентифікація та виявлення усіх можливих джерел небезпеки та обґрунтовані рішення з їх нейтралізації та усунення чи зменшення серйозності наслідків [7–10].

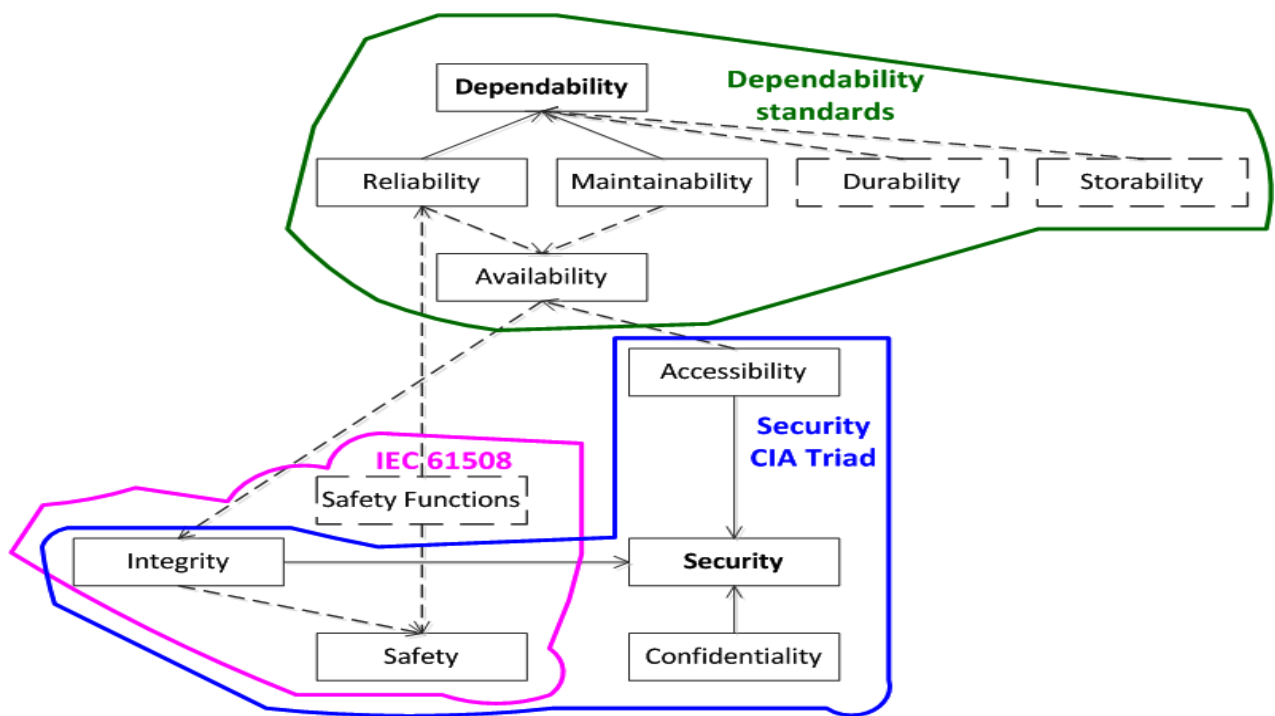


Рис. 1.2. Взаємозв'язок між стандартами з надійності, безпечності та безпеки

Згідно стандартів [4 – 6, 11] *функціональна безпечність* це частина загальної безпечності, яка відноситься до устаткування, що перебуває під постійним моніторингом систем контролю, і залежить від правильності функціонування електричних, електронних, програмних систем, пов'язаних з безпечністю [6]. Функціональна безпечність, з одного боку - це виявлення потенційно небезпечного стану, що призводить до активації захисного чи коригуючого пристрою чи механізму для запобігання виникнення небезпечних подій, а з іншого - реалізація заходів для зменшення наслідків небезпечної події шляхом блокування або вимкнення системи.

Згідно [12 – 15] абсолютного рівня безпечності забезпечити не можливо, оскільки, навіть після прийняття захисних чи корегуючих рішень, буде існувати певний рівень ризику. У відповідності до стандарту [4] *ризик* це поєднання ймовірності появи аварійної ситуації та серйозності її наслідків. Згідно стандарту [11] ризик є ймовірність появи аврійної ситуації в результаті функціонування системи і як наслідок цього нанесенню шкоди життю та здоров'ю людей, навколишньому середовищу та іншим системам. Рівень серйозності наслідків аварійної ситуації ранжуються за результатами експертних оцінок.

Всі існуючі підходи для визначення показників безпечності передбачають визначення мінімальних січень та ймовірностей їх появи з сукупності усіх наборів січень.

Мінімальні січення (*Minimal Cut Sets*) – комбінації мінімальної кількості відмов елементів системи, що призводять до аварійної ситуації. Вилучення хоча б одного елементу з комбінації унеможливує виникнення аварійної ситуації. Якщо з МС вилучити хоча б одну подію, то катастрофічна відмова системи унеможливується [16 – 21]. Мінімальні січення дозволяють кількісно оцінити вплив відмов сукупностей елементів на настання аварійної ситуації системи. Вони дають змогу визначити найбільш критичні елементи системи з точки зору ризику її експлуатації («слабкі місця» системи). Ймовірність появи мінімального січення є кількісним рівнем ризику експлуатації (допустимого, граничного) системи при виході з ладу її складових.

Мінімальні січення отримують з наборів січень (Cut Sets), які є комбінаціями відмов елементів системи (підсистем, модулів), які призводять до відмови системи в цілому (аварійної ситуації).

Набори січень та мінімальні січення [16, 18] отримують з аналізу дерев відмов [16, 18, 22, 23], динамічних дерев відмов [24, 25], дерев подій або бінарних діаграм рішень [26, 27] (табл.1.1). Для кожної аварійної ситуації, що може статися, необхідно будувати нове дерево [28]. Разом з цими методами, в цій таблиці представлено методи для розроблення надійнісних моделей РЕСВП (ліва колонка).

Для усіх цих методів (права колонка табл.1.1) притаманні ряд спільних недоліків:

- Дані методи непридатні для аналізу відмовостійких систем із складною поведінкою (реконфігурація, певна послідовність подій для усунення відмови (підключення гарячого резерву, переведення з холодного в гарячий резерв), активне комбіноване резервування тощо).
- Методи враховують лише необмежене відновлення і не враховують стратегій технічного обслуговування.
- Методи не враховують обмеження на кількість відновлень.

- Не враховують можливості виникнення взаємозалежних аварійних ситуацій.

Таблиця 1.1 – Методи оцінювання надійності та безпечності

Методи для аналізу надійності	Методи для аналізу безпечності
Структурні схеми надійності (RBD)	Дерева відмов (FTA)
Логіко-ймовірнісні методи	Динамічні дерева відмов (DFTA)
Метод простору станів	Дерева подій (ETA)
Вдосконалений метод простору станів	Бінарні діаграми рішень (BDD)

Зазначені в таблиці методи не забезпечують отримання інтегральних показників, які враховують надійність і безпечність.

Для оцінки безпечності, як на етапі системотехнічного проектування так і на етапі експлуатації РЕСВП використовують технологію FMEA/FMECA [29, 33, 34], яка регламентована міжнародними стандартами [35 – 37]. В цій технології ключовим моментом також є отримання мінімальних січень, ймовірність виникнення яких є кількісним показником ризику експлуатації системи. Мінімальні січення дають змогу отримати кількісну оцінку безпечності [30 – 32] для подальшого визначення методом експертної оцінки частоти появи аварійної ситуації (Occurrence).

Для цілого ряду задач (наявність прихованих відмов – Latent Failure, наявність відмов із спільною причиною – Common Cause Failure, наявність технічного обслуговування з різними періодами процедур моніторингу та технічного обслуговування тощо) вищезазначені методи (табл.1.1) дають лише наближені значення ймовірностей виникнення мінімальних січень.

Основним недоліком дерев відмов, динамічних дерев відмов, дерев подій або бінарних діаграм рішень є великі затрати часу на повторну побудову моделі, після внесення в систему змін, коли ймовірність виникнення мінімальних січень перевищує граничне значення. Час побудови однієї моделі для РЕСВП становить від 200 год і більше в залежності від складності системи. Причому для кожної аварійної ситуації необхідно будувати нову модель з аналогічними затратами часу.

Наступним етапом технології FMEA/FMECA, після визначення мінімальних січень, є визначення коефіцієнта ризику (Risk Priority Number), який є добутком

трьох величин – Occurrence, Severity та Detection [33, 34]. Якщо коефіцієнт ризику приймає значення більше від заданого, то потрібно зменшити одну з його складових – Occurrence, Severity або Detection і після цього повторно здійснити оцінку коефіцієнта ризику. Однак для цього потрібно заново будувати дерева відмов та знаходити мінімальні січення і ця процедура може повторюватись декілька разів. Тому, у більшості випадків, після внесення змін у РЕСВП для підвищення безпечності здійснюють лише якісну оцінку запропонованих змін і перерахований коефіцієнт ризику має суттєві відхилення від реального значення, які можна отримати лише після побудови нового дерева відмов.

1.1. Сучасний стан методів оцінки безпечності та надійності на етапі системотехнічного проектування

Особливості радіоелектронних систем відповідального призначення з точки зору оцінки ризику експлуатації. Для РЕСВП характерними є низка особливостей, які необхідно враховувати при оцінюванні показників функціональної безпечності. Такими особливостями є:

- Радіоелектронні системи відповідального призначення складаються, як правило, з великої кількості елементів та підсистем [9, 15, 38 – 40], надійнісну поведінку яких потрібно враховувати при оцінці ризику експлуатації.
- Радіоелектронну систему відповідального призначення реалізують як відмовостійку конфігурацію, з різними видами надлишковості [38], яка не зводиться до паралельно - послідовних з'єднань елементів. Крім цього, РЕСВП може мати: складну надійнісну поведінку; підсистеми та елементи з прихованими та залежними відмовами; елементи, які мають обмежену кількість відновлень [38, 41, 42] та реконфігурацію структури після відмови [43].
- Функціональну безпечність сучасних РЕСВП та їх ризик експлуатації необхідно оцінювати по множині аварійних ситуацій [15, 42, 44, 45], з врахуванням того, що в багатьох випадках аварійні ситуації є взаємопов'язаними.

- Сучасні РЕСВП містять в своєму складі інформаційно-керуючі системи [41, 46], надійність яких визначає надійність системи в цілому і вносить визначальний вплив на безпечність РЕСВП. Крім цього на безпечність РЕСВП суттєво впливає алгоритм поведінки інформаційно-керуючої системи [47], який реалізують у вигляді програмного забезпечення [48, 49].
- На етапі системотехнічного проектування, для забезпечення заданого рівня надійності та функціональної безпечності, потрібно мати такі засоби (моделі, методики та алгоритми) які дають змогу проводити «швидкий» багатоваріантний аналіз для синтезу структури та алгоритму поведінки РЕСВП [14, 45, 50].

Оцінка ризику експлуатації РЕСВП, окрім всього вищевказаного, має специфіку, оскільки необхідно враховувати вплив на функціональну безпечність періодів, коли РЕСВП не використовується (знаходиться на зберіганні), вимушено простоє в очікуванні технічного обслуговування і ремонту [51 – 53] тощо.

1.1.1. Аналіз особливостей методів моделювання для аналізу функціональної безпечності радіоелектронних систем відповідального призначення

В процесі проектуванні РЕСВП оцінку показників функціональної безпечності здійснюють за допомогою ряду методів моделювання а саме: методів імітаційного моделювання (ІМ) [54, 55], методів логіко-імовірнісного моделювання (ЛІМ) [50, 56 – 58], методу простору станів [59 – 61]. Найширше при проектуванні РЕСВП використовуються методи ЛІМ. Це пояснюється тим, що для побудови логіко – імовірнісної моделі існують багато алгоритмів, реалізованих у вигляді програмного забезпечення із зручним графічним інтерфейсом. Крім цього частина методів ЛІМ рекомендуються для використання цілим рядом стандартів та рекомендацій.

Найрозповсюдженішим методом ЛІМ є метод аналізу дерев відмов (Fault Tree Analysis) [18, 61] . Дерево відмов (ДВ) – це структурна схема, яка відображає причинно – наслідкові зв'язки між відмовами окремих елементів чи підсистем і аварійною ситуацією РЕСВП. Дерево відмов будується дедуктивним методом

(зверху – вниз) і дає змогу отримати логічну функцію залежності ймовірності появи аварійної ситуації системи від ймовірностей відмов елементів базового рівня [17, 18, 51, 55, 62]. Графічне зображення ДВ є візуалізацією розвитку аварійної ситуації і дає змогу якісно оцінити рівень функціональної безпечності РЕСВП. Для кількісного оцінювання функціональної безпечності здійснюють мінімізацію логічної функції появи аварійної ситуації і отримують мінімальні січення. Аналіз отриманих мінімальних січень дає можливість виявити найбільш вразливі місця РЕСВП. Для подальшого аналізу безпечності застосовують FMEA/FMECA-аналіз [19, 33 – 37], який дає змогу оцінити серйозність наслідків та критичності несправностей при виникненні аварійної ситуації. Результатом FMEA/FMECA-аналізу є показник – коефіцієнт ризику (Risk Priority Number), який отримується у вигляді експертних оцінок. Такі оцінки дають змогу зменшити потенційні наслідки катастрофічних відмов, шляхом розроблення коректуючих дій на основі рекомендацій експертів. Коректуючими діями є введення надлишковості (часової, функціональної, структурної), введення засобів контролю та діагностики, введення технічного обслуговування та ремонту. Оскільки, з огляду на великі затрати часу, повторної побудови ДВ після внесення коректуючих дій не проводять, тому кількісна оцінка ефективності цих рекомендацій відсутня.

Оцінювання функціональної безпечності РЕСВП методами логіко-імовірнісного моделювання. Значний внесок у дослідження систем зі складною структурою за допомогою логіко-імовірнісного моделювання, здійснили колективи під керівництвом І.А.Рябініна та Г.Н.Черкесова, А.С. Можасєва та А.А.Нозіка, досягнення яких представлені в роботах [7, 50, 58, 63 – 66]. В працях Рябініна та Черкесова [50, 58, 64, 65] закладено підвалини використання логіко – імовірнісних методів для аналізу функціональної безпечності систем зі складною структурою. В основі ЛІМ лежать операції над функціями булевої алгебри. Аналіз функціональної безпечності проводиться шляхом визначення умов попадання системи в аварійну ситуацію. В працях [9, 50, 58, 64] представлено методичні основи практичної оцінки надійності та ризику експлуатації систем зі складною структурою. Основним недоліком цих підходів є значна кількість складних логічних

перетворень, результатом яких є перехід від логічної функції аварії системи до ймовірності появи аварійної ситуації. Даний метод, на сьогодні, частково автоматизовано і реалізовано у вигляді програмного забезпечення «АРБИТР». Автоматизація полягає в побудові схеми функціональної цілісності, на основі якої отримують логічну функцію аварії. Структура, принципи побудови та методика застосування даного програмного забезпечення представлені в роботах [7, 56, 58, 63, 67, 68]. Оцінювання функціональної безпечності здійснюється шляхом визначення ступеня ризику виникнення аварійної ситуації за певний інтервал експлуатації РЕСВП. Ступінь ризику - це ймовірність невиконання РЕСВП своєї функції при виникненні конкретної аварійної ситуації. Перевагою цього методу є отримання коефіцієнтів значущості для кожного елемента, що дає змогу оцінити їх вплив на функціональну безпечність системи в цілому. Однак, врахування несумісних подій, при побудові схеми функціональної цілісності, навіть для простих систем є трудомісткою процедурою, а для складних систем затрати часу є невиправдано великими. Разом з цим, саме при розробленні схеми функціональної цілісності існує ймовірність внесення помилки в модель системи, а відсутність валідації моделі не дає змоги виявити та виправити такі помилки.

Оцінювання функціональної безпечності методом аналізу дерева відмов.

Дерево відмов (ДВ) - це структурна схема, яка графічно відображає логічні причинно-наслідкові зв'язки між аварійною ситуацією системи та відмовами її елементів та іншими подіями, які можуть спричинити аварійну ситуацію. В результаті побудови ДВ отримують логічну функцію аварійної ситуації від якої переходять до ймовірнісного представлення аварійної ситуації [16, 17, 51, 69 – 72]. Застосування ДВ знайшло своє місце для розв'язання задач аналізу, моделювання та проектування: теплоелектростанції [73], гідроелектростанції [74], інтелектуальних транспортних мереж [75]; комп'ютерних систем управління [57].

Перевагою даного методу є відносна простота побудови самого дерева відмов і перехід до ймовірності появи аварійної ситуації, візуалізація розвитку аварійної ситуації. Однак ДВ є статичними моделями, в яких вважається, що всі події є незалежними [18]. Крім цього ДВ дають лише точкову оцінку ймовірності появи

аварійної ситуації. Для врахування у моделі взаємозалежностей подій були запропоновані динамічні дерева відмов [24, 76].

В роботі [24] представлено принципи побудови динамічних ДВ та підходи до їх аналізу. Динамічне ДВ дає змогу враховувати елементи РЕСВП для яких притаманна надійнісна поведінка (певна послідовність підключення резерву, робота засобів контролю та діагностики, робота засобів перемикання тощо). Для таких елементів розроблені спеціальні логічні блоки ДВ. Перехід від цих логічних блоків до ймовірностей відбувається, в даному випадку, за допомогою застосування імітаційного моделювання (ІМ) методом Монте-Карло. Такий підхід збільшує від декількох разів до декількох десятків разів затрати часу на аналіз такого ДВ. І навіть у цьому випадку не дає змоги врахувати вплив обмеженої кількості ремонтів, наявності прихованих відмов на ймовірність аварійної ситуації РЕСВП.

В роботі [77] запропоновано підхід побудови удосконаленого статичного ДВ. Особливістю підходу є введення в ДВ логічних блоків з часовими залежностями. В цих блоках задаються часові інтервали, в якому відбудеться динамічна подія. Даний підхід є простішим від динамічних дерев відмов, однак має суттєво вужче практичне застосування. Продовження даної роботи є в [78]. Дерева відмов з часовими залежностями застосовуються при оцінюванні функціональної безпечності та надійності наступних систем відповідального призначення:

- індустріальних систем [25];
- електричних та енергетичних систем [79];
- комп'ютерних мереж [13, 80];
- транспорту та логістики [81, 82];

Для складних систем, до яких відносяться РЕСВП, розмірність ДВ значно зростає і не дає змоги зобразити таке дерево навіть на великому екрані монітора. Тому розроблено методики декомпозиції громіздких дерев з подальшим згортанням показників безпечності кожного з них до показника безпечності усієї системи. В роботі [83] представлено побудови вкладених ДВ. В результаті декомпозиції ДВ отримуються дерева відмов меншої розмірності. Після проведення аналізу сукупності ДВ здійснюється процедура об'єднання результатів.

Таким чином отримують мінімальні січення та ймовірність появи аварійної ситуації. Доний метод дає суттєву похибку при отриманні ймовірностей мінімальних січень при наявності хоча б однієї прихованої відмови серед базових подій. Крім цього об'єднання результатів може занижувати ймовірність появи аварійної ситуації через здійснення операції cut-off при визначення мінімальних січень.

Для адекватного відображення функціональної залежності базових подій між собою застосовують динамічні ДВ [84]. Перевагами застосування динамічних ДВ є використання логічних блоків з пріоритетом та блоків повторення. Динамічні ДВ дають змогу отримати наступні показники функціональної безпечності: ймовірність виникнення аварійної ситуації та мінімальні січення, причому враховується кореляція між відмовами. Проблеми застосування динамічних ДВ полягають в тому, що для визначення мінімальних січень для блоків з пріоритетом та блоків повторення необхідно застосовувати методи імітаційного моделювання або методу простору станів. Трудомісткість цих процедур нівелює вищезазначені переваги і це обмежує практичне застосування даного підходу.

Автори роботи [85] пропонують здійснювати перерозподіл ймовірностей виникнення подій для врахування динаміки розвитку аварійної ситуації в ДВ. В такому різновиді динамічних ДВ закладено алгоритм зміни інтенсивностей виникнення відмов елементів системи з врахуванням інших залежних відмов. Даний метод автори застосовували для аналізу функціональної безпечності системи аварійного відключення атомної електростанції. Однак в даного підходу наступні суттєві проблеми для практичного застосування: алгоритм зміни інтенсивностувиникнення відмов для кожного варіанту реалізації РЕСВП є унікальним, а його розробка потребує значних витрат часу. Тому для багатоваріантного аналізу цей підхід не придатний. Крім цього, даний підхід не забезпечує адекватного відображення в моделі сучасних стратегій технічного обслуговування.

Автори роботи [86] представляють різновид динамічних ДВ з відображенням перерозподілу навантаження елементів при деяких різновидах активного та

пасивного резервування. Для цього автори пропонують використовувати комбінацію логіко-ймовірнісної моделі для відображення структурної схеми причинно-наслідкових зв'язків розвитку аварійної ситуації та марковську модель для динамічних логічних елементів. На першому етапі будується статичне ДВ, а на другому – будується модель подій, для якої необхідно створити марковську модель. В результаті аналізу марковської моделі отримують мінімальні січення для динамічних логічних блоків, які на наступному етапі імплементують в ДВ. Даний різновид динамічних ДВ є малоформалізованим, вимагає побудови статичного ДВ та марковської моделі. Причому імплементация мінімальних січень динамічних блоків в ДВ є ручною. Крім цього, даний підхід не дає змоги враховувати складну надійнісну поведінку, характерну для мажоритарних систем з реконфігурацією, багаторівневих мажоритарних систем та не враховує стратегії технічного обслуговування.

В роботі [87] здійснено порівняльний аналіз з точки зору отримання показників функціональної безпечності двох методів: дерева відмов та FMEA-аналізу. В роботі зроблено спробу застосувати ці методи для оцінювання функціональної безпечності системи управління гідравлічної турбіни та окремо аналіз її технічного обслуговування. Обидва методи дають різні показники (мінімальні січення та коефіцієнт ризику) для системи та для технічного обслуговування. Отримання комплексного показника функціональної безпечності в даному підході не виявлено.

В роботі [72] для аналізу телекомунікаційної системи запропоновано методіку побудови ДВ. В даному підході запропоновано засади розроблення моделей телекомунікаційних систем та моделей функціональної поведінки для забезпечення надійності та визначення критичності відмов. Побудова моделей функціональної поведінки підвищує адекватність отриманих моделей. Однак, для оцінки функціональної безпечності в даному випадку використовується два різних класи моделей, які не дають змоги побачити зв'язки між показниками надійності та безпечності.

Для побудови та аналізу динамічних ДВ складних технічних систем в [54]

запропоновано використовувати імітаційне моделювання методом Монте-Карло. Використання ІМ для оцінювання функціональної безпечності відновлювальних РЕСВП вимагає значних часових затрат. Ці затрати суттєво зростають при збільшенні вимог до точності моделювання. Також цей підхід малопридатний при аналізі багатьох варіантів реалізації РЕСВП.

В роботах [88 – 92] представлено авторами методики оцінювання безпечності, що представляють собою поєднання FMEA/FMECA-аналізу та ДВ. Цей підхід забезпечує зменшення ймовірності внесення помилок при оцінюванні безпечності [89]. В роботі [90] представлено розроблений авторами частково автоматизовану методику валідації показників безпечності, отриманих за допомогою FMEA/FMECA-аналізу та ДВ. Разом зцим автори представили алгоритм узгодження результатів, отриманих цими двома методами.

В роботах [89 – 92] запропоновано часткову автоматизацію отримання динамічних ДВ з подальшим використанням отриманих мінімальних січень для FMEA-аналізу. В основі підходу лежить модель у вигляді графа станів. Слід відзначити, що низький рівень формалізації цих методик призводить до внесення помилок в модель, які важко виявити. Крім цього громіздкість підходу не дає змоги застосувати його для багатоваріантного аналізу.

Для підтвердження достовірності отриманих значень показників безпечності в роботі [93] показано підхід валідації результатів FMEA-аналізу за допомогою ДВ. Цей підхід створення додаткової моделі для валідації, причому складність валідаційної моделі перевищує складність вихідної. Це призводить до суттєвих витрат часу, що є критичним на системотехнічному етапі проектування РЕСВП.

Отже для отримання показників функціональної безпечності на етапі системотехнічного проектування РЕСВП сучасні підходи передбачають побудову моделі у вигляді ДВ або динамічного ДВ. Побудова таких дерев відмов є ручною і потребує значних витрат часу навіть для побудови одного варіанту моделі. Для врахування надійнісної поведінки РЕСВП застосовують динамічні дерева відмов, які потребують побудови додаткових моделей у вигляді графустанів і переходів або імітаційних моделей. Причому затрати часу на їх побудову перевищують затрати

часу на побудову статичного ДВ. І навіть у цьому випадку динамічні ДВ не забезпечують повног врахування як надійнісної поведінки так і процедур технічного обслуговування.

Оцінка ризику експлуатації методом простору станів. Одним з перспективних підходів для оцінювання показників функціональної безпечності є метод простору станів. В роботах [49, 93 – 95, 97] представлено основи моделювання системи за методом простору станів. Згідно даного методу отримують дискретно-неперервну стохастичну модель об'єкта дослідження марковського типу. Графічним представленням такої моделі є граф станів та переходів. Аналітична модель є системою лінійних диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Методики використання методу простору станів потребують підвищення рівня автоматизації, оскільки, передбачають ручну побудову моделі об'єкта дослідження, що є надзвичайно трудомістким процесом. Показники безпечності на основі розподілу ймовірностей перебування у станах не визначаються.

В роботах [98, 99] приведено моделі РЕСВП, зокрема системи керування дисковими сховищами дата-центрів, системи керування хмарними сховищами і засобами обчислень та на основі методу простору станів визначають лише показники надійності, показники безпечності тут не визначаються. Також всі моделі будуються вручну.

В роботі [97] здійснено докладний огляд і приведено практично всі існуючі підходи моделювання надійності складних систем. Значна частина роботи присвячена побудові марковських моделей і визначення на їх основі показників ефективності системи. Всі приведені методики передбачають ручну побудову моделі і не придатні до багатоваріантного аналізу. Крім цього серед показників ефективності системи, які пропонує автор відсутні показники безпечності.

В роботі [100] автор пропонує для визначення показників безпечності застосувати метод простору станів. Даний підхід дає змогу отримати: залежність показника безпечності (ймовірність потрапляння в аварійну ситуацію) від тривалості його експлуатації та середній час напрацювання до небезпечної відмови.

В даному підході автор фактично пропонує використовувати модель для оцінювання показників надійності замінивши інтенсивності відмов в графі станів на інтенсивності небезпек. Однак, методика отримання інтенсивностей небезпек в роботі відсутня. Закон розподілу інтенсивностей небезпек автор пропонує розподіляти за законом розподілу Вейбула. Це дасть змагу підвищило ступінь адекватності розробленої моделі. Однак, розв'язання задач аналізу за допомогою побудованої моделі вимагає від розробника значних затрат часу та не дає змоги отримати мінімальні січення.

Методика автоматизованої побудови моделі об'єкта дослідження методом простору станів представлено в роботі [101]. Згідно даної методики, у створеному авторами програмному забезпеченні реалізовано такі (наступні) етапи. На першому етапі розробник створює моделі елементів системи. На другому етапі даної методики розробник визначає стани, які є непрацездатними та працездатними. На третьому етапі розробник встановлює взаємозв'язки між елементами, задає стратегію технічного обслуговування РЕСВП. Отримана модель у вигляді графа станів дає змогу в автоматизованому режимі складається систему рівнянь. В результаті розв'язання системи рівнянь отримується показники безпечності – функцію готовності та ймовірність виникнення небезпечної відмови. Проведення аналізу безпечності системи здійснюється на трьох рівнях: на рівні окремих елементів, на рівні модулів та підсистем та рівні системи загалом. Оскільки отриманий граф має велику кількість станів, автори спрощують модель, а це призводить до зниження достовірності результатів. Даний підхід не придатний для багатоваріантного аналізу, оскільки вимагає розроблення графа станів для кожної реалізації системи. Мінімальні січення даний підхід не дає змоги отримати.

На сьогоднішній день розроблено удосконалену технологію використання методу простору станів з високим рівнем формалізації, що дозволило автоматизувати процес побудови моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів та переходів [102, 103]. Представлена технологія дає змогу детально описати надійнісну [104] та функціональну [105 – 108] поведінку системи і при певних доопрацюваннях дана технологія дасть змогу представляти в моделі і аварійні

ситуації. Дана технологія моделювання розроблялася для опису надійнішої та поведінки функціональної відмовостійких РЕСВП. Для оцінювання безпечності вона потребує певних вдосконалень, оскільки в даній реалізації вона не дає змоги розрізняти непрацездатні стани, а відповідно об'єднувати їх в аварійні ситуації для визначення показників функціональної безпечності. На сьогодні не виявлено методик автоматизованої побудови дерева відмов РЕСВП на основі графу станів і переходів, чи іншого представлення РЕСВП.

Отже, в результаті огляду інформаційних джерел виявлено, що для оцінки показників безпечності – мінімальних січень існує цілий ряд методів, які мають ряд спільних обмежень та недоліків:

1. На етапі системотехнічного проектування, враховуючи тривалість етапу та тривалість побудови моделі, можливо побудувати лише модель для одного варіанту реалізації структури системи. Звідси випливає непридатність методів, приведених в табл. 1.1 до багатоваріантного аналізу.
2. Всі зазначені в табл 1.1 (права колонка) методи оцінювання безпечності дають лише точкові оцінки і відповідно не дають змоги досліджувати динаміку зміни ймовірності виникнення аварійних ситуацій від часу експлуатації РЕСВП.
3. Іншою групою суттєвих недоліків цих методів є неможливість врахування впливу введення комбінованих засобів забезпечення відмовостійкості (реконфігурації структури в перед аварійній ситуації, активного резерву з комбінацією гарячого, холодного та полегшеного резерву тощо) на ймовірність виникнення мінімальних січень. Також ці методи не враховують вплив обмеження на кількість ремонтів на ймовірність виникнення мінімальних січень, оскільки дерева відмов (подій тощо) враховують лише необмежене відновлення, а це суттєво занижує значення ймовірності появи мінімального січення і тим самим завищує оцінку безпечності усєї системи.
4. Метод простору станів та удосконалений метод простору станів призначені для аналізу функціональної та надійнішої поведінки складних систем, до яких відносяться РЕСВП. Для оцінки безпечності, а саме отримання мінімальних січень необхідно розробити методи розрізнення непрацездатних станів і

формування на їх основі мінімальних січень.

1.2. Обмеження та «вузькі місця» сучасних методів оцінки надійності та безпеки РЕСВП на етапі експлуатації

На етапі системотехнічного проектування здійснюється вибір та розроблення правил проведення технічного обслуговування та ремонту РЕСВП, які будуть застосовуватися на етапі експлуатації системи. Ці правила визначають, коли і які планові і непланові відновлювальні роботи проводяться в РЕСВП при її експлуатації, і формують відповідну стратегію технічного обслуговування (ТО) [108 - 112]. Стратегії ТО є основним способом забезпечення та підтримування необхідного рівня безпеки та надійності РЕСВП на етапі її експлуатації. Вибір відповідної стратегії ТО РЕСВП визначається її структурою та призначенням, її розташуванням відносно станції ТО, умовами експлуатації та встановленими показниками безпеки та надійності, які необхідно забезпечити. Правильний вибір стратегії ТО дозволяє оптимізувати роботу ремонтного органу, досягнути максимального приросту показників безпеки та надійності системи та мінімізувати витрати на експлуатацію РЕСВП.

В процесі експлуатації РЕСВП можна виділити два типи відмов, які визначають безпеку системи: катастрофічні – спричиняють появу аварійної ситуації в системі і призводять до повної втрати нею працездатності; приховані – відмови, які не спричиняють появу аварійної ситуації в РЕСВП проте їх наявність призводить до збільшення частоти виникнення аварійних ситуацій і суттєвого зниження безпеки. Приховані відмови спричиняються процесами старіння та розрегулюванням параметрів апаратури, помилками в програмному забезпеченні, деградаційними процесами, втратою початкових властивостей конструкціями, неправильно вибрані періодами планово – профілактичного обслуговування тощо. Особливістю прихованих відмов є те, що їх виявлення можливе лише під час проведення огляду РЕСВП спеціалізованою ремонтною бригадою.

Для усунення відмов, які виникають в РЕСВП, передбачено проведення двох видів відновлювальних робіт (аварійно-відновлювальні роботи (АВР) та планово-

профілактичне обслуговування (ППО)). Аварійно-відновлювальні роботи проводяться з метою усунення аварійних ситуацій РЕСВП і термінового відновлення втрати працездатності, яке виникло в РЕСВП в результаті раптових відмов. Планово-профілактичне обслуговування підсистем РЕСВП проводиться для усунення прихованих відмов та для запобігання виникнення в підсистемах РЕСВП аварійної ситуації. Для швидшого усунення аварійної ситуації в підсистемі РЕСВП та відновлення працездатності РЕСВП аварійно-відновлювальним роботам присвоєно вищий пріоритет.

Вибір відповідної стратегії ТО здійснюється на основі показника надійності РЕСВП (наприклад, коефіцієнт готовності), який досягається при проведенні аварійного відновлення і профілактичного ТО та врахуванням впливу прихованих відмов [113].

Вибір стратегії ТО є складною задачею, яка залежить від багатьох факторів: призначення обслуговуваних систем; умови експлуатації РЕСВП та її розміщення відносно станції ТО; можливості проведення відновлювальних робіт; кількості бригад, які проводять обслуговування; задані значення показників надійності системи, які необхідно досягнути шляхом проведення ТО. Вибір стратегії ТО вимагає вирішення задачі оптимізації процесів проведення відновлювальних робіт для забезпечення заданого значення показників функціональної безпечності та готовності РЕСВП.

На даний час багато авторів працюють над дослідженням впливу аварійно-відновлювальних робіт та планово-профілактичного обслуговування на показники надійності систем різного призначення [109 – 111, 114 – 123 133, 134]. Окремо слід відзначити ряд робіт [124 – 132] з оцінки впливу технічного обслуговування на показники ефективності РЕСВП, виконаних школою професора Креденцера.

В роботі [109] автором розроблено математичні моделі для декількох варіантів реалізації стратегії ТО та запропоновано шляхи вибору оптимальної періодичності профілактичних робіт. В моделях відновлювальних враховано різні типи відмов. Також даній роботі розглянуто розрахунок показників надійності на основі напівмарковських і марковських моделей. Теорію експлуатації складних систем та

організацію оптимального ТО представлено в [110]. Представлені моделі експлуатації елементів системи враховують старіння елементів та структурне резервування. Врахування прихованих відмов при визначенні показників надійності не враховується, показники безпечності в даному підході не визначаються. В роботі [113] цим же автором розглядається проблема експлуатації авіаційної техніки за технічним станом, пропонується оптимальний вибір стратегії ТО і запропоновано методику вибору кількості запасних деталей. Таким чином, результати отримані в роботах [109, 110, 113] мають теоретичний характер, оскільки математичні моделі враховують тільки вплив необмеженого відновлення на показники безпечності системи і не відображають особливостей стратегії ТО. В роботі [111] автором викладено основні теоретичні засади розрахунку показників ефективності стратегій ТО. Також розглянуто декілька варіантів стратегій ТО систем, як з врахуванням так і без врахування їх структури, поставлено задачу вибору оптимального варіанту стратегії ТО та запропоновано алгоритм її вирішення, а також сформовано методику визначення періодичності проведення профілактичного ТО. Представлені в роботі моделі ТО базуються на використанні графа станів і переходів, процес побудови якого здійснюється вручну без засобів автоматизації. В зв'язку з цим з метою зменшення розмірності графа деякі стани було укрупнено, а саме з множини працездатних станів сформовано один стан і аналогічно сформовано по одному стану для множин непрацездатних станів, станів в яких проводяться профілактичні роботи та станів в яких здійснюється аварійне відновлення. Це в свою чергу не дозволило відобразити всі аспекти стратегії ТО. Таким чином в роботах [109, 110, 111, 115] сформовано стратегії профілактичного ТО та подано методи розрахунку та показників ефективності відновлювальних технічних систем. Проте розроблені в цих роботах моделі дають змогу оцінити ефективність стратегії ТО, для випадку, коли на обслуговуванні є одна система, не враховують наявності прихованих відмов і не можуть бути застосовані для оцінки стратегії ТО декількох РЕСВП. Також при побудові моделей вважається, що процес відновлення системи та процес проведення профілактичного ТО є одноетапним. Тому розроблені моделі не дозволяють адекватно оцінювати ефективність РЕСВП

при застосуванні конкретної стратегії ТО навіть для випадків, коли процес проведення відновлювальних робіт складається з одного етапу. Вплив стратегії ТО на показники безпеки розглядається лише якісно.

Значний внесок у дослідження ефективності стратегій профілактичного ТО технічних систем здійснив колектив під керівництвом Креденцера Б.П., що представлено в роботах [124 – 132]. Зокрема, цим колективом представлено ряд монографій, присвячених ТО систем з часовою надлишковістю. Питання проведення ТО в процесі експлуатації таких систем розглянуто в роботах [124, 125, 130, 131]. В роботі [124] приведено характеристику різновидів ТО. Автор розглянув два види ТО систем з часовою надлишковістю для яких є притаманним ТО за технічним станом і періодичне ТО. Для цих видів ТО автор наводить формули розрахунку коефіцієнта технічного використання в залежності від режиму експлуатації системи. Побудова моделей, в даному підході реалізована на використанні методу простору станів. В результаті цього отримують граф станів та переходів великої розмірності і для зменшення його розмірності пропонується укрупнення станів, що в подальшому є суттєвим обмеженням при аналізі функціональної безпеки. Укрупнення відбувається за такими правилами: працездатні стани об'єднуються в один стан; стани планового та непланового ТО розбиваються на дві окремі групи станів, і в цих двох групах здійснюється укрупнення. Це знижує достовірність оцінки показників ефективності РЕСВП, оскільки після укрупнення не можливо адекватно враховувати поведінку системи та особливості стратегії ТО. Разом з цим усі вищезгадані моделі не дають змоги оцінити вплив прихованих відмов та аварійних ситуацій на функцію готовності в залежності від періодичності планово-профілактичного обслуговування.

Важливою проблемою, яку потрібно вирішити на етапі системотехнічного проектування РЕСВП є вибір самої стратегії ТО та вибір оптимальної періодичності проведення ТО [109, 110, 111, 124]. Справа в тому, що періодичність ТО впливає на частоту появи аварійних ситуацій та на функцію готовності. Однак, в даних роботах не розглядається прості системи при проведенні планово-профілактичного обслуговування як аварійна ситуація, що в призводить до

завищених значень функції готовності. В роботах [133, 135] проводиться аналіз стратегії ТО при різних варіантах її реалізації. В роботі [133] розглянуто задачі здійснення ТО автоматизованої системи управління. Розглянуто методи, методика і алгоритми, за допомогою яких такі задачі можуть вирішуватися. В роботі [135] показані варіанти реалізації стратегії ТО за станом об'єктів. Однак, ці роботи є описовими і не дають змоги отримати кількісні показники функціональної безпеки для оцінювання стратегій ТО з точки зору безпеки. Вирішення проблеми вибору стратегії ТО потребує побудови відповідних математичних моделей та розрахунку необхідних показників ефективності, що є окремою складною задачею. Задачі побудови математичних моделей стратегій ТО та оцінювання показників ефективності систем з відновленням розглядається в роботах [116 – 120, 125, 126, 128, 131, 132, 134]. В роботах [118, 120] запропоновано формули для розрахунку показників надійності відновлювальної системи. Зокрема в роботі [120] пропонується метод розрахунку коефіцієнта готовності, в основі якого лежить укрупнення станів. Початковий граф станів укрупнюється до графа, який складається з двох станів. Для такого представлення стратегії ТО об'єкта дослідження відома аналітична формула розрахунку нестационарного коефіцієнта готовності. Однак таке укрупнення не дозволяє враховувати процеси, при багатозадачному ТО та знижує достовірність отриманих показників ефективності системи. В роботі [118] наведено формули для розрахунку коефіцієнта оперативної готовності, середніх питомих витрат і коефіцієнта готовності системи. Вхідними даними для цих формул є функція розподілу сумарного часу безвідмовної роботи елемента за період між відмовами та безвідмовної роботи. В роботах [126, 128] розглядаються проблеми побудови моделі ТО об'єктів озброєння та військової техніки. Моделі, розроблені в [118, 120, 126, 128], призначені для оцінювання показників ефективності складних систем при врахуванні декількох різновидів стратегій ТО. Обмеженнями цих підходів є наявність тільки однієї системи на обслуговуванні ремонтної бригади та одноетапний процес ТО. В усіх цих публікаціях проблема впливу прихованих відмов на виникнення аварійних ситуацій не розглядається взагалі.

В роботі [135] запропоновано стратегію ТО технічних засобів за її технічним станом. Для цього розроблено математичну модель стратегії ТО системи у вигляді графа станів та переходів. На основі сформованого вручну графа станів і переходів здійснюється розрахунок коефіцієнта технічного використання. Це дає змогу в залежності від періоду ТО та технічного стану системи оцінити значення її коефіцієнта технічного використання. Дана модель забезпечує оцінювання ефективності стратегії ТО за реальним технічним станом для системи, що складається з однієї основної і однієї резервної підсистем, і не дозволяє оцінити ТО групи підсистем, які зв'язані між собою і входять до складу однієї РЕСВП. Суттєвим обмеженням підходу є ручна побудова графа станів та переходів, що потребує значних витрат часу. Аварійно – відновлювальні роботи та вплив прихованих в даному підході не розглядаються.

В роботах [125, 131] розглянуто особливості систем тривалого зберігання з часовою надлишковістю та засади побудови математичних моделей стратегій профілактичного ТО для такої техніки. Зокрема, в роботі [131] вирішено задачу вибору оптимального періоду проведення ТО такого класу систем. При розрахунку коефіцієнта готовності враховано наступні чинники: неповна інформація про безвідмовність об'єкта, який знаходиться на зберіганні, часова надлишковість та тривалість інтервалу часу, коли система є в стані відмови. В результаті отримано модель у вигляді графа станів та переходів, в якому частину станів об'єднано. Вплив особливостей профілактичного ТО (простоїв, тимчасове відключення системи) на функцію готовності в даних роботах не розглядається.

В роботі [136] здійснено розроблення математичних моделей трьох стратегій технічного обслуговування сучасних систем авіоніки. Математичні моделі, які представлені в даній роботі побудовані на основі використання марковських дискретних процесів. На основі використання цих моделей проводиться розрахунок показників ефективності стратегії ТО, серед яких середні значення тривалостей перебування об'єкта дослідження в працездатних станах, станах простою та затрати на проведення ТО. За допомогою розроблених моделей запропоновано рекомендації щодо вибору стратегії ТО та кількості запасних

деталей. Проте сформовані рекомендації базуються на вартісних показниках проведення ТО, надійнісний аспект визначається лише середнім значенням тривалості перебування системи в працездатному стані, аспект безпечності в даних моделях не розглядається взагалі.

В роботі [137] розроблена узагальнена модель у вигляді простору станів, яка відображає функціонування складних технічних систем з відновленням з часовою надлишковістю. В роботі представлено формули розрахунку коефіцієнта готовності системи. Розроблений граф станів та переходів забезпечує оцінювання ефективності експлуатації лише РЕСВП, яка складається лише з однієї підсистеми. В графі не враховано багатоетапність процесу ТО. Для врахування різних законів розподілу тривалостей процесів ТО використано методи теорії напівмарковських процесів, що призводить до значного ускладнення процесу розрахунку при кількості станів більше 10..

В роботі [134] розроблено модель, яка враховує поточний ремонт автотранспортних засобів та їх профілактичне ТО. Для цього запропоновано узагальнену марковську математичну модель стратегії ТО. Така модель дає змогу отримати загальні оцінки показників безпечності, оскільки стани відновлення є укрупненими і не відображають фази проведення ТО. Показники отримуються в результаті розв'язання системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена.

В роботі [119] запропоновано моделі ТО систем захисту інформації, в яких враховано проведення планово-профілактичних та відновлювальних робіт при появі каналів несанкціонованого доступу до інформації. За допомогою цих моделей можна отримати показники готовності і на їх основі якісно оцінити показники функціональної безпечності.

В роботі [111] фундаментально висвітлено теоретичні засади оцінювання показників надійності технічних систем та розглянуто різні варіанти реалізацій стратегій ТО. Показники надійності отримуються з графа станів та переходів для випадків як марковської так і напівмарковської моделей. Граф станів та переходів розробляється вручну і для подальшого аналізу в роботі запропоновано укрупнювати стани, що зменшує ступінь адекватності таких моделей. Аспект

безпеки в даній роботі не розглядається.

В роботі [138] для аналізу процесів ремонту та ТО об'єктів залізничного транспорту використано сучасну концепцію Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). При побудові моделі авторами враховані такі параметри як кількість об'єктів для яких проводиться ТО, кількість ремонтних бригад, кількість ремонтних ліній та такі параметри як параметр потоку відмов об'єктів, інтенсивність ремонту тощо. Кінцевим результатом моделювання є розраховані значення коефіцієнта готовності групи вагонів, коефіцієнт вимушеного простою, та об'єднані питомі витрати, які включають в себе питому сумарну вартість технічного обслуговування, питому сумарну вартість поточних ремонтів та питому сумарну вартість капітальних ремонтів. Проте в цій роботі процес ТО є однофазним, що не дає змоги враховувати параметри (тривалості) підготовки до ремонту, доїзду до об'єкта та різних категорій робіт ремонтної бригади. Визначення показників безпеки в даній роботі відсутнє.

В роботі [139] об'єктом розгляду є моделювання процесів ТО локомотивів. При формуванні моделі автор враховує такий аспект як наявність прихованих відмов, однак не розглядає їх впливу на безпеку системи. Кінцевим результатом моделювання є отримані формули розрахунку коефіцієнта готовності та коефіцієнта технічного використання. В роботі наведені графіки залежності коефіцієнта технічного використання, коефіцієнта готовності та середніх питомих витрат від періодичності проведення ТО. Проте в роботі не показано, як здійснюється розрахунок таких параметрів, як фінальні ймовірності знаходження об'єкта в кожному стані, усереднений час переходу об'єкта з одного стану в інший, тощо, на основі яких здійснюється розрахунок функцій залежності коефіцієнта готовності та технічного використання від періоду між ТО.

В міжнародних стандартах [69, 113] та роботах фахівців фірми Boeing Commercial Airplanes [140] на основі дерев відмов приведено рекомендації для отримання значення середнього значення ймовірності потрапляння у аварійну ситуацію у випадку прихованих відмов. Однак приведені рекомендації стосуються конкретних випадків, які відносяться до експлуатації авіаційних систем

відповідального призначення. Крім цього запропонований підхід дозволяє отримати значення мінімальних січень тільки для найгіршого випадку – на кінець найдовшого інтервалу моніторингу.

Аналіз відомих моделей стратегій аварійного та профілактичного ТО показав, що отримані на сьогоднішній день результати є вагомим внеском в розвиток теорії надійності технічних систем. Проте розглянуті моделі, в переважній більшості, призначені для моделювання та оцінки ефективності стратегії технічного обслуговування РЕСВП, яка складається лише з однієї підсистеми і не дають змоги здійснити оцінку ефективності РЕСВП, які складаються з групи підсистем, і одночасно перебувають на обслуговуванні одного ремонтного органу. Практично у всіх роботах стратегію профілактичного ТО розглядають, як однофазний процес, що знижує достовірність розроблених моделей, оскільки стратегії ТО зазвичай передбачають декілька етапів підготовки і проведення відновлювальних робіт. Більшість розглянутих підходів побудови моделей передбачає укрупнення непрацездатних та працездатних станів. Це суттєво зменшує точність розрахунку показників ефективності РЕСВП при врахуванні стратегій ТО. Іншою недоліком розроблених моделей є те, що за винятком робіт [69, 140] вони не враховують впливу прихованих відмов на ймовірність потрапляння в аварійну ситуацію. А методики, представлені в [69] дають змогу лише наближено врахувати вплив ППО на безпечність і не дають змоги побачити вплив різних стратегій ТО на показники безпечності.

Перспективним напрямом, який забезпечує адекватне відображення багатоетапного процесу проведення ТО РЕСВП, врахування впливу ТО не тільки на надійність, але й на безпечність є використання методів теорії масового обслуговування [141 – 143]. Використання систем масового обслуговування (СМО) для моделювання ТО РЕСВП, дозволяє оцінити процес одночасного обслуговування ремонтним органом багатьох систем при врахуванні таких факторів, як інтенсивність надходження систем на обслуговування (інтенсивність появи відмови), зайнятість ремонтного органу, багатофазний процес ремонту та ТО, різну тривалість кожного з етапів ТО тощо.

З оглянутих літературних джерел [141 – 149] для представлення стратегій ТО сукупності систем використано СМО. Роботи [141 – 143] містять теоретичне обґрунтування представлення процесу ТО як СМО. Тут приведено основні підходи та методики отримання показників ефективності технічної системи, на основі СМО. Зокрема в роботах [144, 145] автором розглядається процес ТО нафтових бурових установок, а саме процес постачання запасного обладнання. Для кожної установки передбачено відповідний склад, який розміщується на певній відстані від неї та на якому знаходяться запчастини і до якого вона відсилає заявку на отримання необхідного запасного обладнання. На обслуговуванні одного складу перебуває певна фіксована кількість бурових установок. Також з бурової установки, у разі необхідності можуть надсилатися повідомлення і до інших складів. Для представлення стратегії ТО автором розроблена імітаційна модель, яка базується на багатоканальній замкнутій СМО. В роботі автором досліджується процес постачання запасних частин на склади для трьох різних варіантів реалізації стратегії ТО: ТО по ресурсу (відпрацювання заданої кількості годин), ТО по стану (виявлення критичного стану під час профілактичного обслуговування) та ТО після відмови. При виборі відповідної стратегії ТО основним критерієм, яким керується автор є показник економічних затрат, що включають в себе затрати на підтримання бурової в працездатному стані і затрати за простій та затрати за зберігання запасного обладнання на складах і вартість транспортування. Для опису стратегії ТО автор використав СМО канал обслуговування якої є однофазним, що не дозволяє відобразити багатоетапний процес ТО та ремонту, який присутній при обслуговуванні радіоелектронних систем відповідального призначення. Також в даній роботі не розглядається вплив прихованих відмов на показники ефективності системи.

В роботі [137] розглядається задача моделювання та оцінка ефективності стратегії ТО нафтових бурових установок. На основі теорії масового обслуговування автором отримано нову модель, яка дозволяє проаналізувати процес ТО бурових установок. Розроблена модель враховує дві стадії ремонту, різнотипність використаного обладнання та пріоритетне обслуговування. Однак

самим автором зазначено, що розроблена модель виявилася неефективною для розв'язання задачі оптимального планування ТО в зв'язку з складністю ймовірнісного опису об'єкта дослідження при достатньо «грубих» вхідних даних.

В роботах [147 – 149] автором розглядається задача розроблення методики планування ремонту електродвигунів на основі математичного моделювання їх життєвого циклу. Як математичну модель для відображення процесу ремонту електродвигунів вибрано СМО. В роботі [147] автор розглядає основні питання обслуговування великої кількості електричних двигунів сервісним центром та проводить аналіз різних планів ремонту електродвигунів вказуючи їх переваги та недоліки, а також визначає можливості використання різних СМО з точки зору їх складності. В роботах [148, 149] на основі запропонованої автором СМО з необмеженою чергою розглядається процес ремонту електродвигунів. Для розрахунку імовірнісних показників СМО таких, як ймовірність простою каналу обслуговування, ймовірність перебування заявки в каналі обслуговування, тощо, використано процес загибелі та розмноження. Розроблена модель не дозволяє адекватно розглядати процес ТО і оптимізувати його, а лише дає змогу визначити необхідну кількість ремонтних ліній для різних значень інтенсивності відмов обладнання.

Отже, на основі оглянутих літературних джерел встановлено, що

1. Вплив на безпечність РЕСВП на етапі експлуатації здійснюють явні та приховані відмови. Для їх виявлення та усунення розробляють різні стратегії ТО: для усунення явних відмов – аварійно – відновлювальні роботи, а для усунення прихованих відмов – планово – профілактичне обслуговування. Причому обидва види робіт виконуються однією ремонтною бригадою.
2. Для моделювання таких стратегії ТО РЕСВП найбільш доцільно використати підхід, що базується на застосуванні систем масового обслуговування для побудови моделі.
3. Однак, в оглянутих інформаційних джерелах, в якості моделі стратегії ТО використовуються однофазні СМО, що не дозволяє адекватно моделювати

процеси ТО. Це пояснюється тим, що кількість фаз планово – профілактичного обслуговування є не менше двох, а аварійно-відновлювальні роботи є однофазними. Крім цього СМО повинна містити додаткову чергу прихованих відмов і виконуючий орган є спільним для усіх черг. Тому необхідно розробити моделі стратегій ТО які призначені для усунення як явних так і прихованих відмов

4. Не виявлено моделей у вигляді СМО які б давали, в явній формі, можливість оцінити вплив прихованих відмов на функцію готовності в залежності від конкретної стратегії ТО.

1.3. Особливості синтезу безпечних радіоелектронних систем відповідального призначення, в склад яких входить інформаційно-керуюча система

Особливістю ряду РЕСВП є те, що в їх склад входить інформаційно-керуюча система (ІКС). Такі РЕСВП широко застосовуються в авіації, ядерній енергетиці, залізничному транспорті, військовій техніці тощо. Особливістю таких систем є те, що при виході з ладу ІКС, а у багатьох випадках і при апаратних чи програмних збоях в ІКС, РЕСВП виходить з ладу і спричиняє аварійну ситуацію. Тому проектування ІКС, які входять в склад РЕСВП передбачає обов'язкове забезпечення для них властивості відмовостійкості [150] та стійкості від збоїв. Властивість відмовостійкості ІКС забезпечується використанням відмовостійких підсистем, для яких необхідно розв'язати задачу надійнісного структурно-параметричного синтезу на етапі системотехнічного проектування. Для вирішення цієї задачі проектуванню необхідно мати в своєму розпорядженні високого ступеня адекватності надійнісні моделі відмовостійких систем з різними конфігураціями. Ці моделі, крім показників надійності, повинні надавати можливість отримувати й показники безпечності – частоту потрапляння в аварійну ситуацію та ймовірність потрапляння в передаварійний стан.

При проектуванні ІКС, які входять в склад РЕСВП найчастіше використовують відмовостійкі системи з мажоритарною структурою [150 – 154].

Відмовостійкі системи з мажоритарною структурою мають багато варіантів практичної реалізації (з фіксованим правилом голосування, з реконфігурацією структури та зміною правила голосування, багаторівневі мажоритарні структури). Однак лише для деяких варіантів їх реалізації є надійнісні моделі, придатні для розв'язання задачі надійнісного структурно-параметричного синтезу відмовостійких РЕСВП з мажоритарною структурою та оцінки їх безпечності.

Безпечність функціонування сучасних РЕСВП, в склад яких входить ІКС, найчастіше забезпечується за рахунок резервування каналів оброблення інформації на апаратному рівні. Як правило, в практиці проектування використовують три канали, які реалізують мажоритарний принцип резервування [151, 155 – 157]. Активізація виконавчого пристрою (наприклад, в авіації – для автоматичної зміни положення літака) здійснюється тільки тоді, коли збігається відповідне повідомлення у всіх або у більшості каналів. Таким чином застосовується мажоритарний принцип прийняття рішення $\{2 \text{ із } 3\}$. В роботах [157 – 159] досліджено вплив на надійність та функціональну безпечність параметрів відновлення у РЕСВП, в якій використана мажоритарна структура $\{2 \text{ із } 3\}$. Автори представили дві моделі відмовостійкої системи з мажоритарною структурою (МС) з фіксованим правилом прийняття рішення $\{2 \text{ із } 3\}$ з відновленням модулів, що входять в склад ядра. Перша модель є у вигляді графа станів і переходів РЕСВП, в якому не відображено простої. Граф станів для другої моделі РЕСВП враховує можливі простої. При розробленні моделей прийнято наступні припущення: засоби контролю, діагностики та комутації виконують свої функції з ймовірністю одиниця, кількість ремонтів необмежена, відновлення завжди успішне. Моделі представлені у вигляді системи рівнянь Колмогорова – Чепмена. В роботі [158] наведено аналітичні вирази для відмовостійкої РЕСВП з мажоритарною структурою типу $\{2 \text{ із } 3\}$, які дають змогу розрахувати середнє значення тривалості безвідмовної роботи, ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності. Безпечність прямо не оцінюється, а при розрахунку коефіцієнта готовності введено коефіцієнт безпечності. Недоліком такого підходу є те, що кількість відновлень вважається нескінченною, а частота потрапляння в аварійну

ситуацію не оцінюється взагалі.

В роботах [151, 160, 161] представлено структурну схему РЕСВП в якій, до складу технічних засобів входять три комплекти CPU, які працюють за мажоритарним принципом резервування типу $\{2 \text{ із } 3\}$. Безвідмовність та функціональна безпечність і РЕСВП забезпечується за рахунок використання мажоритарного резервування $\{2 \text{ із } 3\}$ і періодичного контролю справності каналів оброблення інформації. Однак не запропоновано моделей для розрахунку показників безпечності та надійності таких систем.

В статтях [159, 162] розроблено надійнісні моделі відмовостійкої системи на основі дубльованої мажоритарної структури, які враховують параметри стратегії технічного обслуговування. Розроблено дві моделі у вигляді графа станів і переходів для двох варіантів поведінки системи. Проте в розроблених марковських моделях прийнято ряд спрощень: не враховано збоїв в роботі засобів контролю та діагностики, відновлення модулів ядра завжди успішне; роботу пристроїв комутації та мажоритарного елемента - безвідмовна. Мінімальні січення чи частоту потрапляння в аварійний стан дані моделі не дають змоги визначити.

В монографії [152] приведена РЕСВП з мажоритарною структурою типу $\{2 \text{ із } 3\}$. Для визначення ймовірності безвідмовної роботи наведено формулу, в якій враховано показники надійності мажоритарного елемента та модулів ядра. Показники безпечності не оцінюються.

В статті [163] на основі використання генераторів випадкових чисел запропоновано метод імітаційного моделювання РЕСВП з МС. Розглядається відмовостійка система з мажоритарною структурою типу $\{2 \text{ із } 3\}$. В даному випадку в моделі враховується процес відновлення апаратних засобів. Розроблена модель дозволяє враховувати час відновлення каналу, що відмовив. Проте розроблена модель не враховує: ненадійну роботу засобів контролю та діагностики, ненадійну роботу мажоритарного елемента, можливість неуспішного відновлення, можливість формування ковзного резерву.

В монографіях [164] та [165] для розрахунку середнього значення тривалості безвідмовної роботи для РЕСВП з МС типу $\{2 \text{ із } 3\}$ приведено аналітичні

залежності.

В роботі [166] наведено формули для розрахунку середнього значення тривалості безвідмовної роботи та розроблено моделі відмовостійких РЕС з МС типу {2 із 3} та {3 із 5}. Проте розроблення моделей здійснена при наступних допущеннях: не враховано, що кількість відновлень є необмеженою, ефективності засобів контролю та діагностики є ідеальною, а відновлення (ремонт) завжди успішне. Показники безпечності в даних моделях не оцінюються.

Таким чином,

- В переважній більшості праць, в якості відмовостійких конфігурацій для ІКС, розглядаються мажоритарні структури типу {2 із 3} для яких розроблено цілий ряд моделей.
- Розроблені моделі для мажоритарних структур типу {2 із 3} мають такі обмеження:
 - за винятком кількох моделей, надійність мажоритарного елемента вважається абсолютною;
 - не враховується надійність засобів комутації при наявності резерву;
 - не враховується ефективність засобів контролю та діагностики;
 - кількість відновлень завжди є нескінченною.
- Моделі для МС типу {3 із 5} є лише у спрощеному варіанті, а для МС типу {4 із 7} і більше відсутні взагалі.
- В моделях для МС типу {3 із 5} не враховується можливість реконфігурації.
- У всіх оглянутих моделях відсутня можливість оцінити частоту потрапляння в аварійну ситуацію.

1.4. Аналіз підходів синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП на етапі системотехнічного проектування

Безпечність РЕСВП оцінюють, розглядаючи аварійні ситуації, базовими подіями яких є відмова апаратних засобів. Вплив алгоритму поведінки РЕСВП

розглядається лише частково, як правило у випадках, коли відмова апаратного засобу призвела до невиконання певної функції алгоритму. Особливістю алгоритму поведінки (АП) радіоелектронних систем відповідального призначення є те, що завершальним блоком крім успішного виконання є ще й неуспішне виконання. При неуспішному виконанні РЕСВП, як правило, потрапляє в аварійну ситуацію, яка може призвести до виходу з ладу інших систем чи комплексів, екологічних катастроф чи людських жертв. Причому потрапляння РЕСВП в аварійну ситуацію може спричинятися не тільки відмовами апаратних засобів, а й в результаті помилок в АП.

Успішне виконання АП оцінюється ймовірністю виконання задачі, а неуспішне виконання – ймовірністю невиконання задачі [115]. Однак, за час виконання задачі системою, ймовірність невиконання задачі не показує скільки разів за цей інтервал часу РЕСВП потрапляє в аварійну ситуацію і скільки часу там знаходиться. Для оцінки безпечності АП ключовим показником буде частота потрапляння в стан неуспішного виконання.

Тому необхідно проаналізувати сучасні підходи до оцінки показників ефективності АП і виявити ті, що дозволяють кількісно оцінити потрапляння РЕСВП в стан неуспішного виконання (ймовірність і частоту).

Для забезпечення заданого рівня безпечності РЕСВП в АП необхідно закласти надлишковість, щоб мінімізувати попадання системи в стан неуспішного виконання задачі (аварійну ситуацію). На сьогодні існує значна кількість методів введення надлишковості в АП [167], однак оцінка приросту безпечності робиться або на основі експертних оцінок [168, 169], або за допомогою евристичних підходів.

Оцінка ефективності АП полягає у побудові моделі РЕСВП, яка б враховувала її поведінку (надійнісну або/і функціональну), і забезпечувала кількісне оцінювання показників ефективності. Для забезпечення достовірності отриманих результатів, моделювання поведінки систем, зазвичай проводять як мінімум двома різними методами [168, 170].

Узагальнений показник ефективності РЕСВП згідно [167] визначається як ймовірність виконання завдання, що для прикладних задач може інтерпретуватися

як:

- ймовірність успішного виконання АП;
- середнє значення тривалості виконання АП.

Для визначення показників ефективності АП (ймовірність успішного виконання АП, середнє значення тривалості виконання АП) [171] на сьогодні найчастіше застосовують такі підходи:

- мову алгоритмічних алгебр [169, 172 –181];
- логіко-ймовірнісне моделювання [182 – 187];
- імітаційне моделювання [188 –192];
- мережі Петрі [193 – 196];
- GO-, GO-FLOW-методи [197 –199];
- метод траєкторного моделювання [200 –202];
- метод простору станів [94, 95, 202 –209].

Значний вклад в теорію надійності алгоритмів внесли роботи І.Сафонова з надійнісного проектування та оптимізації алгоритмів [175 – 178], А.Губінського [167], А.Ашерова [169], О.Ротштейна [173, 174], М.Грифа та Е.Цоя [172] з надійності людино-машинних алгоритмічних систем.

Для алгоритмічних структур, до яких відносяться АП, розроблено моделі розрахунку показників надійності за імовірнісно-часовими характеристиками безпомилкового виконання окремих операцій. Основою моделювання поведінки РЕСВП є сукупності алгоритмічних структур, представлених у вигляді типових наборів логічних операцій.

Згідно монографії [173] алгоритмічний процес - це розгорнута у часі послідовність дій, операцій або робіт, виконання яких забезпечує досягнення визначеної наперед мети. Таку послідовність можна формалізувати алгоритмом з наступними властивостями:

- правильне виконання АП забезпечує досягнення РЕСВП наперед заданої мети;
- АП складається з набору елементарних операцій, які утворюють скінченну

множину;

- послідовність операцій АП є детермінованою;
- в АП може виконуватися одночасно лише дискретна, наперед визначена кількість операцій;
- АП має початок і кінець, причому перехід з початкового стану в кінцевий здійснюється за кінцеву кількість операцій.

До алгоритмічних процесів відносяться процеси функціонування комп'ютерних мереж, автоматизованих систем управління, технологічні процеси виробництва, процеси автоматизованого оброблення інформації і прийняття рішень, алгоритми діяльності операторів, процеси функціонування людино-машинних систем тощо.

У працях [175 - 178] для моделювання функціональної і надійної поведінки РЕСВП запропоновано застосовувати мову алгоритмічних алгебр, яку запропонував В.Глушков і вдосконалив І.Сафонов. За допомогою мови алгоритмічних алгебр можна змоделювати будь-який АП РЕСВП. Для цього використовують чотири канонічні регулярні форми алгоритмів, а саме лінійну, диз'юнктивну, ітеративну та паралельну. Модель АП РЕСВП, в такому випадку, має вигляд вигляді логічної функції і будується шляхом формування логічних виразів. В результаті отримують модель АП РЕСВП, яку графічно представляють у деревовидній формі. Процес побудови такої моделі є трудомісткою задачею, оскільки мінімальні зміни внесені в структуру АП потребують перебудови моделі заново. Дані моделі, при певній модифікації, дають змогу отримати ймовірність неуспішного виконання, однак частоту потрапляння в стан неуспішного виконання ними отримати неможливо.

Як показано в монографії [176] для АП, що містить цикли, ймовірність правильного виконання та тривалість виконання визначається одним із нижченаведених шляхів:

- якщо кількість повторень циклів можна вважати необмеженою, то слід використовувати ітеративну регулярну форму. В даному випадку ймовірність правильного виконання алгоритму є завищеною, але тривалість виконання

нормується за імовірністю правильного виконання;

- якщо кількість повторень циклів є строго визначеною, то слід використовувати диз'юнктивну регулярну форму. Ймовірність правильного виконання алгоритму, в даному випадку, не завищується, але тривалість виконання АП є заниженою, бо не відбувається нормування за імовірністю правильного виконання.

В роботі О.Ротштейна [174] для врахування помилок різних типів при моделюванні АП запропоновано компактні матричні моделі надійності операторів, логічних умов та алгоритмічних структур. Частота потрапляння в аварійну ситуацію тут не розглядається.

Напрацювання І.Сафонова, А.Губінського, А.Ашерова, О.Ротштейна були розвинуті та вдосконалені у наукових працях С.Штовби [173, 174, 179, 180, 181]. У цих роботах представлена методологія моделювання АП на основі вдосконаленої мови алгоритмічних алгебр, яка містить 15 типових алгоритмічних структур. Для 10 алгоритмічних структур запропоновано нечіткі моделі надійності та нечіткі моделі переривання трьох алгоритмічних структур з пам'яттю на кількість контролів. Використання оператора циклічного повторення дозволяє враховувати цикли в алгоритмі. Запропонована методологія орієнтована на аналіз АП мікропроцесорних структур, однак громіздкість процедур моделювання ускладнює її практичне застосування. Крім непридатності до багатоваріантного аналізу дані методи не дають змоги оцінити частоту потрапляння в стан неуспішного виконання АП.

В роботах А.Можаєва, І.Рябініна та їх послідовників [185, 187] розроблені теоретичні підходи і рекомендації до побудови логіко-імовірнісних моделей (ЛІМ) АП. Також ними закладено підвалини формалізації побудови ЛІМ, що згодом переросло в логіко-імовірнісну технологію моделювання структурно – складних систем. Формалізація полягає в тому, що вручну будується граф функціональної цілісності, який є графічним відображенням ЛІМ на основі вербальної моделі. Цей граф є вхідними даними для подальшого формування ЛІМ. Позитивними рисами цієї технології моделювання є значне скорочення часу розроблення надійнісних ЛІМ складних систем, можливість оперативного проведення багатоваріантного аналізу.

Ця технологія орієнтована лише на аналіз надійності автоматизованих систем керування, технологічних процесів, літальних апаратів, наземного транспорту, та електроенергетичних систем. Неможливість врахування в функціональній поведінці досліджуваної РЕСВП циклічних процесів та неможливість оцінити ймовірність потрапляння системи в аварійний стан робить даний підхід не придатним, без кардинальної переробки, для аналізу функціональної безпечності.

У статтях J. Magott, P. Skrobanek [182] і Y. Papadopoulos, J. McDermid, R. Sasse, G. Heiner [183] на основі дерева відмов представлено методи моделювання поведінки систем для оцінювання їх функціональної безпечності. Древа відмов в графічній формі відображають зв'язок між головною подією – аварійною ситуацією та базовими подіями, які призвели до аварії. Основними недоліками такого підходу є ручна побудова дерев відмов, яка потребує значних затрат часу, та неможливості детально розглянути взаємопов'язані події, які призводять до аварійної ситуації.

У статті Andrew Rae і Peter Lindsay [184] представлено прототип програмного засобу "Eucalypt", в якому реалізовано автоматизований метод побудови дерева відмов. Суттєвим недоліком цього методу є неврахування циклічної поведінки досліджуваної системи, що не дає змоги оцінити вплив часової надлишковості. Дані підходи дають змогу визначити ймовірність потрапляння в аварійну ситуацію, що при певних припущеннях можна вважати станом неуспішного виконання. При певній доробці процедур аналізу можна отримати частоту потрапляння в аварійну ситуацію, однак ця оцінка буде точковою і важко контролювати її достовірність.

У роботі К.Мушовця [186] на базі модифікованого аналітичного логіко-імовірнісного методу створено універсальну модель надійності телеметричної системи космічного апарату та запропоновано методика її аналізу. Дана модель враховує впливи, що виникають при взаємодії РЕСВП з навколишнім середовищем та вплив надійності елементів телеметричної системи на появу аварійної ситуації. Однак для оцінки показників ефективності АП ця методика не дає змоги оцінити частоту потрапляння в аварійну ситуацію.

Альтернативним до ЛІМ підходом є GO-метод, представлений у роботах [198,

199]. Цим методом здійснюють аналіз ймовірності успішного виконання функцій алгоритмом функціонування систем електроживлення (power supply system) [199] та систем закачування води (water injection system) [208]. Для моделювання поведінки РЕСВП даним методом будують GO-схему, яка складається з операторів, якої відображають операційні блоки АП, а сигнали – переходи між операційними блоками АП. Суттєвим недоліком цього методу є неврахування циклів при функціонуванні системи, що не дозволить врахувати вплив часової надлишковості на безпечність.

У роботі Takeshi Matsuoka [197] для вирішення задачі врахування логічних циклів для аналізу надійності РЕСВП представлено точний метод, який є подальшим розвитком GO-методу. Даний метод орієнтований для аналізу РЕСВП з часовою залежністю станів. Кожен такий стан включає в себе логічний цикл та описується логічним рівнянням. Оскільки L сигналів схеми утворюють 2^L комбінацій станів, то основним недоліком розробленого методу є значне розширення GO-FLOW-схеми при збільшенні кількості логічних циклів.

Для формалізованого опису з врахуванням причинно-наслідкових зв'язків у АП складних систем, де паралельно протікає декілька процесів, застосовують мережеві підходи (N-схеми), різновидом яких є мережі Петрі [194, 195]. Використання N-схем дає змогу відносно просто побудувати ієрархічні конструкції, а це в свою чергу забезпечує можливість ефективного використання N-схем для моделювання паралельних, асинхронних і розподілених процесів в алгоритмах поведінки РЕСВП. N-схеми застосовують для опису подій довільної тривалості і для цього використовують розмічені мережі Петрі. Даний клас моделей відображають тільки порядок появи подій у досліджуваній системі, а для відображення часових параметрів функціонування використовують розширений апарат мереж Петрі.

Блок-схему АП представляють мережею Петрі у вигляді вузлів та дуг між ними. Моделювання процесу виконання АП здійснюється рухом токена (маркера). Операційні блоки АП представляються вузлами, а умовні блоки - дугами (переходами). Моделювання роботи АП виконується запуском переходів під

керуванням міток та їх розподілом у N-схемі. Видаленням маркерів з вхідних позицій і утворенням нових маркерів у вихідних позиціях запускається перехід.

Якщо перехід може видалити маркер, то він здійснює відключення другого переходу, а це вводить мережу в конфлікт. Розв'язання таких конфліктів є суттєвою перешкодою використання N-схем для моделювання АП і шляхи вирішення цієї проблеми представлено в [194]. Практичних рекомендацій до застосування даного методу для оцінювання впливу АП на функціональну безпечність РЕСВП не виявлено.

У статті N. Sadou та H. Demmou [196] представлено метод що базується на мережі Петрі, який призначено для аналізу імовірності виникнення аварійних ситуацій при функціонуванні вбудованих систем. Даний підхід дає змогу відслідкувати по ланцюжку причинності та виявити можливі сценарії, які призводять до небезпечних станів АП. Сценарії відображаються у вигляді послідовності подій, які ведуть появи небезпечної події. Використання такого підходу дає змогу визначити мінімальний сценарій потрапляння у аварійну ситуацію.

В представленому методі не має змоги проводити кількісний аналіз небезпечних сценаріїв. Для оцінювання імовірності виникнення небезпечного сценарію додатково рекомендується застосовувати імітаційне моделювання. Частота потрапляння у аварійну ситуацію тут не розглядається. Також неврахування кількості циклів можна вважати суттєвим недоліком розглянутого методу, оскільки вплив часової надлишковості на надійність і безпечність АП неможливо оцінити.

Для аналізу безпечності вбудованих систем в роботі [193] запропоновано використовувати кольорові мережі Петрі (Colored Petri Nets). Це модифікація мереж Петрі, яка забезпечує врахування циклів за допомогою еволюції значень маркерів (token values evolution). Цикл між вузлом і переходом моделюється простим таймером (sampler). Для уникнення нескінченного повторення ітерацій, автори запропонували використовувати додаткові засоби моделювання: послідовності (sequence) та дуальності (duality). Це дало змогу, в кольорових

мережах Петрі, генерувати значення виконання циклу у відповідності до використаної послідовності. Недоліком такого підходу є те, що немає змоги отримати кількісні значення ймовірності існування мінімальних счень, а відповідно не можливо визначити «слабкі» місця АП, в які потрібно ввести часову надлишковість.

Метод імітаційного моделювання дає змогу вирішувати задачі аналізу АП великих систем практично на будь-якому рівні деталізації [188, 189, 190, 191, 192]. За допомогою цього підходу, на етапі системотехнічного проектування РЕСВП, вирішують наступні задачі: оцінювання та вибір варіанту структури РЕСВП; оцінювання ефективності АП системи; оцінювання впливу зміни різних параметрів на показники ефективності системи. Імітаційне моделювання лежить в основі структурного, алгоритмічного і параметричного синтезу алгоритмів поведінки РЕСВП та в процедурах їх оптимізації.

Суттєвим обмеженням цього підходу є те, що розроблення імітаційної моделі для кожного варіанту АП є окремою громіздкою і слабоформалізованою задачею, яка потребує значних витрат часу і високої кваліфікації виконавця. Тому імітаційне моделювання малоприслатне для багатоваріантного аналізу на системотехнічному етапі проектування, з урахуванням того, що цей етап триває 2 – 3 місяці. Разом з цим, імітаційна модель не прислатна для дослідження поведінки РЕСВП в кожному окремому стані, зокрема в аварійному, що є ключовим для оцінювання функціональної безпеки.

Перспективним методом для аналізу АП складних систем є метод простору станів. Він дає змогу докладно розглядати кожен стан, в якому може перебувати система при виконанні своїх функцій і здійснювати кількісний опис цих станів.

У статті Х.Саркісяна та М.Матюшина [209] реалізовано можливість пошуку вибраних станів в загальному просторі станів за допомогою методу дерев пошуку станів. Розроблений підхід апробовано на системі підтримки прийняття рішень, за допомогою якої було здійснено комплексне оцінювання ефективності функціонування бортової системи космічного апарату. Даний метод передбачає використання оціночних функцій одиничних параметрів і коректно працює лише

тоді, коли кількість параметрів, що описують роботу системи, не перевищує певних меж, інакше динамічне настроювання орієнтованого графа є неможливим. Іншим обмеженням такого підходу є складність створення уніфікованих дерев для різних підсистем РЕСВП, оскільки для кожної підсистеми необхідна побудова окремого дерева.

Метод простору станів широко застосовується на системотехнічному етапі проектування РЕСВП, а саме для оцінювання надійності складних технічних систем, відмови яких малоймовірні через старіння та зношення. Широко цей підхід застосовується для порівняння оцінок показників надійності [210]. Якщо в графі станів тривалість перебування у кожному стані розподілена за експоненційним законом, то така модель називається марковською.

В роботі Ушакова І.А. та Райншке К. [211] запропоновано правила побудови марковських моделей систем у вигляді графа станів і переходів та розроблено практичні методики оцінювання складних систем.

У монографіях Hoang Pham [155], Israel Koren і С. Mani Krishna [204] для моделювання і аналізу надійності АП складних систем пропонується використувати марковські і напів-марковські процеси.

У роботі [203] для аналізу сценаріїв відмов, що призводять до аварійної ситуації представлено модель поведінки комп'ютерної системи, в основу якої покладено дискретний марковський випадковий процес.

В роботі [212] здійснено за допомогою марковської моделі аналіз ефективності функціонування відмовостійкої багатокомпонентної системи, яка представлена у вигляді системи масового обслуговування. Приведено аналітичні формули для функції готовності та функцій вартості простою системи. Частоту потрапляння системи в аварійний стан даний підхід не дає змоги отримати.

В роботі [213] отримано марковські моделі для двох варіантів алгоритму функціонування мажоритарного елемента відмовостійкої системи. Отримана модель дає змогу враховувати вплив ряду чинників, зокрема температури, на правильність функціонування алгоритму. Однак, показники потрапляння в аварійну ситуацію (аварійний стан) дана модель не дає змоги отримати.

В роботі [112] приведено аналітичні формули, отримані на основі марковської моделі, які дають змогу отримати ймовірності потрапляння відмовостійкої системи в аварійну ситуацію. Аварійними ситуаціями тут вважаються стани простою і оцінюються тільки ймовірностями перебування в них. Частота потрапляння в аварійні стани в даному підході не розглядається. Однак, при внесенні будь-яких змін в структуру системи чи в операційний блок АП, необхідно здійснювати заново вивід усіх формул, що буде займати сотні годин.

Для побудови марковської моделі, на першому етапі, необхідно побудувати граф станів і переходів, а на другому, на основі графа, сформулювати систему лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Обидва ці етапи у підходах [112, 203 – 205, 212 – 214] є неавтоматизованими, що сильно звужує область їх практичного застосування. Це пояснюється тим, що розмірність простору станів для АП сягає $10^2 \dots 10^3$ станів і до 10^5 переходів, і ручна побудова графа станів та переходів потребує значних витрат часу при неможливості верифікувати побудовану модель.

На основі технології [102] було розроблено програмний модуль ASNA [103], який автоматизує процес побудови графа станів та переходів та автоматично створює систему диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Даний підхід забезпечує довільну деталізацію опису стану системи, і відповідно можна отримати докладну інформацію про стан РЕСВП в будь-який момент часу.

Дана технологія має суттєве обмеження, оскільки без суттєвої модифікації вона не враховує нормування середнього значення тривалості успішного виконання АП за ймовірністю його успішного виконання. Відсутність нормування занижує середнє значення тривалості виконання алгоритму, що може призвести до потрапляння РЕСВП в аварійну ситуацію.

Для дослідження ефективності варіантів побудови АП широко застосовують метод траєкторного моделювання [200 – 202]. Цей метод дає змогу отримати точкові оцінки ймовірності виконання завдання АП і значення середнього часу виконання і при цьому не відбувається розширення фазового простору при збільшенні кількості компонент, які описують стан РЕСВП. Суть методу

траєкторного моделювання полягає в тому, що алгоритм поведінки РЕСВП представляється як множина маршрутів від початкового блоку до блоку успішного виконання. Кожен з цих маршрутів відображається впорядкованим переліком операційних блоків, що послідовно виконуються. В процесі виконання АП обираються різні маршрути до блоку успішного виконання в залежності від поєднання значень початкових даних. Вибір конкретного маршруту визначається умовними переходами. Випадковий характер появи різних початкових даних визначає випадковість в обиранні маршрутів. Кожен маршрут відрізняються ймовірністю правильного виконання та середнім значенням тривалості виконання АП. Тому для оцінювання ймовірності правильного виконання АП необхідно описати динаміку поведінки РЕСВП за допомогою транзитивних ймовірностей альтернативних переходів. Для проходження усіх можливих маршрутів запам'ятовують всі місця розгалужень алгоритму, щоб мати можливість повернення до них та послідовного перебору всіх можливих маршрутів. У процесі проходження кожного маршруту накопичується значення ймовірностей проходження маршруту та тривалість проходження. Після проходження всіх можливих маршрутів отримується значення ймовірності успішного виконання завдання та середнього часу успішного виконання завдання. Даний підхід після модифікації можна буде застосувати при синтезі безпечних АП в якості другого методу для підтвердження достовірності результатів моделювання. Оскільки даний метод дає лише точкову оцінку ймовірності неуспішного виконання АП, а частоту потрапляння в цей стан визначити неможливо.

Отже:

1. В результаті проведеного огляду інформаційних джерел встановлено, що алгоритм поведінки має визначальний вплив на безпечність функціонування РЕСВП.
2. Задачу оцінки впливу АП на показники функціональної безпечності РЕСВП вирішують на етапі її системотехнічного проектування, оскільки виключно на цьому етапі можливо внести корекції в алгоритм поведінки.
3. В результаті огляду інформаційних джерел виявлено особливості різних

підходів побудови моделей АП для подальшого аналізу ефективності РЕСВП. Порівняльний аналіз цих особливостей приведено в табл. 1.2.

Як видно з табл. 1.1, жоден із розглянутих вище підходів не дає змоги оцінити вплив АП на показники функціональної безпечності РЕСВП. Тому необхідно розробити новий або модифікувати існуючий метод, який враховував би вплив кількості повторень циклів, наявність стохастичних і детермінованих переходів алгоритму на частоту потрапляння АП в стан неуспішного виконання.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз підходів до побудови моделей АП для подальшого аналізу ефективності РЕСВП

Методи побудови моделей алгоритмів поведінки РЕСВП	врахування кількості повторень циклів	нормування часу виконання за імовірністю	врахування стохастичних і детермінованих переходів	автоматизація оцінки показників ефективності	Можливість обчислення частоти потрапляння в стан неуспішного виконання
мова алгоритмічних алгебр	так	так	так	ускладнена	ні
логіко-імовірнісне моделювання	ні	ні	ні	так	ні
імітаційне моделювання	так	ні	так	ускладнена	ні
мережі Петрі	ускладнене	ні	так	ускладнене	ні
GO-метод	ускладнене	ні	ні	ускладнене	ні
метод траєкторного моделювання	так	так	ні	ускладнене	ні
метод простору станів	так	ні	ні	часткова	частково

Висновки до розділу 1

За результатами огляду сучасних методів оцінювання безпечності та надійності РЕСВП на етапі системотехнічного проектування встановлено, що:

1. Всі методи оцінювання безпечності (дерева відмов, динамічні дерева відмов, дерева подій, бінарні діаграми рішень) передбачають визначення мінімальних січень для конкретної аварійної ситуації РЕСВП. Однак всі ці методи не дають змоги враховувати вплив на безпечність відмовостійких конфігурацій з складною поведінкою (з реконфігурацією, з активним резервуванням, з комбінованим резервуванням тощо), стратегій ТО (з багатофазним обслуговуванням, з контролем прихованих відмов, з розподіленою структурою РЕСВП тощо), часової, інформаційної та функціональної надлишковості АП. Дані методи не дозволяють на основі однієї комплексної моделі отримати показники безпечності і надійності. Також ці методи не призначені для багатоваріантного аналізу. Тому необхідно розробити метод побудови комплексної моделі РЕСВП, на основі якої можна отримати показники надійності і безпечності. Обов'язковим показником, який можна визначити з цієї моделі повинні бути мінімальні січення. Розроблена модель повинна дати змогу отримати мінімальні січення без побудови дерева відмов. Метод побудови моделі повинен бути орієнтований на багатоваріантний аналіз РЕСВП. Побудова моделі повинна здійснюватися автоматизовано.
2. На безпечність РЕСВП суттєвий вплив здійснює технічне обслуговування системи на етапі її експлуатації. Тому при розробці стратегії ТО необхідно мати модель, яка дасть змогу оцінити частоту потрапляння РЕСВП в аварійну ситуацію в залежності від різновиду стратегії. При цьому, важливим аспектом є врахування впливу прихованих відмов на показники безпечності. Тому для оцінки впливу стратегії ТО на показники безпечності РЕСВП необхідно розробити модель, яка враховує як аварійно-відновлювальні роботи (усунення раптових явних відмов) так і планово-профілактичне обслуговування (врахування прихованих відмов). Разом з цим модель

повинна враховувати різну кількість фаз обслуговування при аварійно-відновлюваних роботах та планово-профілактичному обслуговуванні.

3. В склад значної кількості складних технічних систем входять інформаційно – керуючі системи, які реалізується як РЕСВП з мажоритарною структурою із складною поведінкою (з реконфігурацією, з активним ковзним резервом, з дворівневою мажоритарною структурою) і її безвідмовність здійснює визначальний вплив на безпечність технічної системи в цілому. Тому необхідно розробити модель, яка дасть змогу визначити як частоту потрапляння в аварійну ситуацію так і показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи, функцію готовності тощо). В такому разі проєктант зможе побачити приріст показників безпечності при зміні (збільшені) показників надійності при зміні конфігурації інформаційно – керуючої системи.
4. Крім забезпечення заданого рівня безпечності за рахунок використання відмовостійких конфігурацій із складною поведінкою та технічного обслуговування, безпечність РЕСВП визначається також і її алгоритму поведінки, оскільки він реалізовується в інформаційно-керуючій системі РЕСВП як програмне забезпечення. Підвищення рівня безпечності РЕСВП здійснюється введенням в алгоритм поведінки часової, інформаційної та функціональної надлишковості. Однак надлишковість призводить до збільшення часу виконання алгоритму, який може перевищити гранично допустимий, що призведе до невиконання РЕСВП задачі, а це, в свою чергу - до аварійної ситуації. Тому необхідно розробити підхід для побудови моделі алгоритму поведінки, яка б дала змогу враховувати потрапляння алгоритму поведінки в стан неуспішного виконання завдання і обчислювати кількісно частоту потрапляння РЕСВП в аварійну ситуацію в залежності від кількості циклів повторного виконання функцій, параметрів апаратних засобів, послідовності використання підсистем тощо.
5. Таким чином, для комплексного забезпечення заданого рівня функціональної безпечності та надійності радіоелектронних систем відповідального

призначення на етапі їх системотехнічного проектування, необхідно ввести ряд нових показників, які дадуть змогу пов'язати між собою загальноприйняті показники надійності та безпечності. Причому такі показники повинні відображати вплив на функціональну безпечність:

- введення відмовостійких конфігурацій в структуру РЕСВП на етапі проектування;
- введення функціональної та часової надлишковості в алгоритм поведінки РЕСВП на етапі проектування;
- застосування різноманітних стратегій технічного обслуговування РЕСВП на етапі експлуатації.

Для отримання таких показників необхідно розробити моделі, методи та методики, які дають змогу не тільки отримати комплексні показники функціональної безпечності та надійності, а й придатні для синтезу нових конфігурацій РЕСВП через багатоваріантний аналіз, що є вимогою системотехнічного етапу проектування. Наявність таких засобів (моделей, методів та методик) дасть змогу створити підґрунтя для розроблення нових інформаційних систем проектування РЕСВП.

РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАСАД ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕЧНОСТІ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ПРОСТОРУ СТАНІВ

Радіоелектронні системи відповідального призначення (РЕСВП) в процесі експлуатації можуть знаходитись в певних станах. Зміна режиму роботи чи значень параметрів системи зумовлює перехід з одного стану в інший, причому тривалість перебування в кожному стані є випадковою величиною. Тому моделлю поведінки РЕСВП є дискретно-неперервна стохастична модель, а метод, за допомогою якого проводять (виконують) дослідження, має назву метод простору станів [49, 215].

Метод простору станів широко застосовується на етапі системотехнічного проектування різноманітних складних систем, в тому числі і РЕСВП. Модель, сформована за цим методом, подається у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, дає змогу адекватно представити всі особливості структури і алгоритму поведінки системи:

$$\frac{d\bar{P}(t)}{dt} = A \cdot \bar{P}(t), \quad (2.1)$$

де $\bar{P}(t)$ – вектор-стовпець ймовірностей перебування РЕСВП у станах,

A – матриця інтенсивностей переходів із стану в стан.

В результаті розв'язання системи диференціальних рівнянь (2.1) отримують розподіли ймовірностей та середні значення тривалостей перебування РЕСВП у кожному стані (2.2.):

$$P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t), \dots; \quad \bar{T}_1, \bar{T}_2, \dots, \bar{T}_i, \dots, \quad (2.2)$$

де $P_i(t)$ - ймовірність перебування РЕСВП у i -му стані, $i=1 \dots s$,

s – кількість станів;

T_i – середнє значення тривалості перебування РЕСВП у i -му стані.

З отриманого розподілу ймовірностей можна сформувати вирази як стандартизованих показників ефективності так і не стандартизованих шляхом сумування ймовірностей перебування у відповідних станах вже на етапі

системотехнічного проектування.

Основними областями застосування методу простору станів є:

1. Оцінка показників ефективності функціонування РЕСВП [104, 105, 212]
2. Оцінка показників ефективності алгоритмів поведінки РЕСВП [106, 206, 213]
3. Оцінка показників готовності та надійності РЕСВП [98, 99, 108, 216, 217]

Вищезазначені застосування методу простору станів регламентуються як рядом міжнародних (FIDES, MIL-HDBK-217, Telcordia SR-332, MIL 217 Plus, IEC TR 62380) так і вітчизняних (ДСТУ 2861-94) стандартів.

Проте, на етапі системотехнічного проектування практичне використання методу простору стану є досить обмеженим. Це пояснюється складністю розроблення моделей, фазовий простір яких складає $10^3 - 10^4$ станів і відповідно такий же порядок має і система диференціальних рівнянь. А якщо врахувати необхідність розв'язання задачі синтезу через багатоваріантний аналіз, то у більшості випадків його замінюють на спрощену оцінку за допомогою типових моделей [218 - 220].

Частково методика використання методу простору станів реалізована у ряді відомих програмних продуктів таких як ReliaSoft Synthesis Master Suite (ReliaSoft США), RAM Commander (A.L.D., Ізраїль), Reliability Workbench (Isograph, США, Великобританія), PTC Windchill QualitySolutions (PTC, США), Item Toolkit (Item Software, США, Великобританія). Однак, в цих програмних продуктах, моделі у вигляді графа станів та переходів будуються вручну з подальшим автоматизованим аналізом показників надійності і безпечності.

В [102] здійснено вдосконалення методики використання методу простору станів. В результаті вдосконалення побудова графа станів і переходів здійснюється автоматизовано. Автоматизована побудова графа станів і переходів базується на структурно-автоматній моделі [102]. Структурно-автоматна модель (САМ) – це формалізоване представлення структури та алгоритму поведінки РЕСВП у вигляді трьох множин даних: вектор стану, показники надійності і функціональності складових РЕСВП та дерево правил модифікації компонент вектора стану.

Алгоритм автоматизованої побудови графа станів і переходів реалізовано у

програмному засобі ASNA [103]. На основі САМ програмний засіб ASNA здійснює автоматизовану побудову графа станів та переходів і формує аналітичну модель у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Розв'язання такої системи рівнянь дає розподіл ймовірностей перебування РЕСВП в кожному стані.

Для оцінювання показників функціональної безпечності метод простору станів не застосовується. Це пояснюється тим, що з одного боку, у відомих методиках отримання графа станів і переходів (ГСП) усі непрацездатні стани, які призводять до аварійної ситуації, об'єднуються в один поглинаючий стан. Це обумовлено тим, що при аналізі надійності важливим є лише факт відмови системи, а наслідки самої відмови не розглядаються. З іншого боку, якщо не об'єднувати непрацездатні стани, то загальна кількість станів зростає у 2 і більше разів і у випадку ручної побудови затрати часу на отримання ГСП можуть суттєво перевищувати тривалість етапу системотехнічного проектування РЕСВП.

Однак основною причиною невикористання методу простору станів для оцінювання показників функціональної безпечності є відсутність методу їх визначення з розподілу ймовірностей перебування РЕСВП в кожному стані.

2.1. Показники функціональної безпечності програмно-апаратних систем відповідального призначення та методи їх отримання

Для кількісної оцінки ризику експлуатації РЕСВП використовують показник «ймовірність виникнення мінімальних січень», який отримують з дерева відмов (ДВ) [18]. Цей показник дає змогу визначати найбільш критичні місця в системі з точки зору функціональної безпечності.

Мінімальні січення (МС) – це «комбінації мінімальної кількості відмов елементів системи», що призводять до аварійної ситуації. Вилучення хоча б одного несправного елемента системи з комбінації мінімальної кількості відмов елементів системи унеможливує виникнення аварійної ситуації. Мінімальні січення дають змогу кількісно оцінювати вплив відмов сукупностей елементів на настання аварійної ситуації системи та визначати найбільш критичні елементи системи з

точки зору ризику її експлуатації («слабкі місця» системи). Ймовірність появи МС є кількісним рівнем ризику експлуатації (допустимого, граничного) системи при виході з ладу її складових [16, 20, 21]. Таким чином, мінімальні січення, як зазначено в [16] - це мінімальні набори подій, необхідні та достатні для настання аварійної ситуації.

Іншим показником для оцінювання функціональної безпечності є «коефіцієнт ризику – RPN (Risk Priority Number)», який визначають використовуючи технологію FMEA/FMECA аналізу [26, 38, 221]. В цій технології ключовим моментом є отримання мінімальних січень, ймовірність виникнення яких є кількісним показником ризику експлуатації системи. А в залежності від його значення визначається показник – «середнє значення частоти появи аварійної ситуації» (Occurrence).

Коефіцієнт ризику – RPN є добутком значень трьох показників:

- серйозність наслідків аварії (Severity);
- частота появи аварійної ситуації (Occurrence);
- наявність засобів контролю і діагностики (Detection), які мають розпізнавати аварійну ситуацію.

Значення показників Occurrence, Severity та Detection визначаються за методом експертних оцінок. Якщо коефіцієнт ризику приймає значення більше від заданого, то потрібно зменшити одну з його складових Occurrence, Severity або Detection і після цього повторно здійснити оцінку коефіцієнта ризику. Як правило зменшити можна показники Occurrence шляхом введення засобів підвищення безпечності та Detection – шляхом введення додаткових засобів контролю та діагностики. Показник серйозності наслідків аварії Severity залишається незмінним.

Мінімальні січення отримують шляхом перетворення логічної структури ДВ методами булевої алгебри. В результаті перетворень дістають нове дерево, логічно еквівалентне оригіналу, яке складається з верхньої події (аварійної ситуації), логічного елемента АБО і мінімальних січень як базових подій, об'єднаних

логічними елементами І.

Однак така методика отримання МС має ряд суттєвих недоліків, що знижує доцільність її використання на етапі системотехнічного проектування РЕСВП:

- Ймовірність виникнення МС визначається лише для фіксованих інтервалів часу.
- В деревах відмов проблематично враховувати послідовність подій, які виникають при відмові окремих підсистем чи модулів. Наприклад: під'єднання резерву, ремонт та заміна несправних елементів тощо. Тому значення ймовірності виникнення МС суттєво відрізняється від реального значення.
- Відмовостійкі конфігурації, зокрема ковзний резерв, комбінований структурний резерв тощо, некоректно реалізуються за допомогою дерев відмов, що призводить до завищення або заниження ймовірності настання аварійної ситуації.
- При внесенні змін в структуру чи алгоритм поведінки системи дерево відмов потрібно заново перебудовувати. А це потребує великих затрат праці та часу.

Ці недоліки частково усунуті в методиці розроблення динамічних дерев відмов (ДДВ) [22, 71]. Основними відмінностями ДДВ від звичайних ДВ є впровадження нових динамічних типів логічних елементів або динамічних вершин (операторів), які реалізуються марковськими моделями [215]. Існує чотири різновиди динамічних вершин (операторів):

- PAND (Priority AND Gate) – пріоритетне І. Це оператор, який моделює ситуацію послідовного виникнення входних подій. Входні події можуть бути як базовими подіями, так і виходами інших логічних вершин. Послідовність спрацьовування входів формується зліва направо.
- SEQ (Sequence Enforcing Gate) – це оператор послідовного виникнення подій, що моделює процес виникнення подій, які можуть відбуватися в одній і тільки одній певній послідовності. Такі процеси відбуваються в системі з ненавантаженим резервуванням однотипними елементами; в системі ненавантаженого функціонального резервування з різними елементами; в

системах з накопиченням відмов. Даний оператор використовується при моделюванні процесів розвитку аварії.

- SPARE (Spare Gate) – цей оператор моделює надійнісну поведінку схем гібридного резервування та описує процес відмови складних резервованих схем: резервування заміщенням (ненавантажений резерв), схем постійного резервування з паралельно працюючими навантаженими елементами, схем з полегшеним резервом. Також цей оператор може відображати послідовності подій і таким чином враховувати нескладні алгоритми поведінки систем.
- FDEP (Functional Dependency Gate) – цей оператор моделює функціональну залежність відмов. Динамічна вершина FDEP моделює процес виникнення залежних каскадних відмов і кратних відмов із загальної причини. Вершина FDEP має два види вхідних подій - тригерні події або просто тригер і залежні події. Залежні події є базовими подіями, які повторюються в інших гілках дерева. Спрацьовування тригера моделює подія виникнення загальної причини, що впливає на залежні вхідні події FDEP.

Проте значна частина недоліків, характерних для ДВ, залишилася і для ДДВ. Наприклад, складно враховувати поведінку системи за наявності функціонального резервування, неможливо коректно відобразити обмежену кількість ремонтів та врахувати простої системи підчас проведення технічного обслуговування. Крім цього ДДВ не дозволяють враховувати вплив засобів контролю, діагностики та комутації на значення ймовірності виникнення (появи) мінімального січення.

Основним недоліком ДДВ [23] є те, що їх побудова не є автоматизованою і вимагає багато ручних кроків та експертних знань. Це дорога процедура як у грошах, так і в термінах часу, необхідного для побудови ДДВ. Особливо це відчутно підчас розгляду модифікацій структури системи і відповідного перебудовування дерева відмов.

Останнім часом для визначення МС набувають популярності діаграми бінарних рішень [26, 27].

На основі проведеного аналізу отримуємо підтвердження того, що актуальною є задача розроблення методу отримання мінімальних січень, який би враховував як

поведінку системи так і різні способи підвищення її відмовостійкості (різні види резервування, технічне обслуговування та ремонт) та безпечності (засоби контролю та діагностики). Таке врахування дасть змогу підвищити достовірність значень ймовірності появи мінімального січення. Разом з цим метод має мати ступінь формалізації придатний для автоматизованого використання, щоб усунути основний недолік ДВ та ДДВ – ручну побудову дерева. А це є особливо актуальним при проведенні багатоваріантного аналізу програмно-апаратних систем відповідального призначення на етапі їх системотехнічного проектування.

2.2. Метод розділення станів системи на працездатні та непрацездатні

Метод, який би забезпечував отримання МС безпосередньо з ГСП, в проведеному інформаційному пошуку не виявлено.

Для аналізу показників безпечності, на відміну від аналізу показників надійності, необхідно мати розподіл ймовірності перебування системи у непрацездатних станах. Причому важливим є не тільки розділення простору станів на працездатні та непрацездатні стани, а й класифікація непрацездатних станів на стани, які безпосередньо призводять до аварії і які призводять до аварії після переходів через кілька проміжних станів. Слід відзначити, що вдосконалений метод простору станів описаний в монографії [102] без суттєвих модифікацій не придатний для виділення різновидів непрацездатних станів, оскільки був орієнтований на аналіз надійності РЕСВП.

Таким чином, для отримання значень ймовірностей виникнення мінімальних січень з ГСП, необхідно коректно розділити усі можливі стани, в яких може перебувати система, на такі групи (Рис. 2.1):

- Непрацездатні безпечні стани – це сукупність станів у які переходить система в результаті відмови підсистем чи модулів, однак з цих станів система безпосередньо не потрапляє в аварійну ситуацію .
- Критичні (передаварійні) стани – це стани в які переходить система і які передують аварійній ситуації. Наступним переходом система потрапляє у аварійну ситуацію.

- Катастрофічні (аварійні) стани – це стани, які відповідають власне аварійній ситуації.

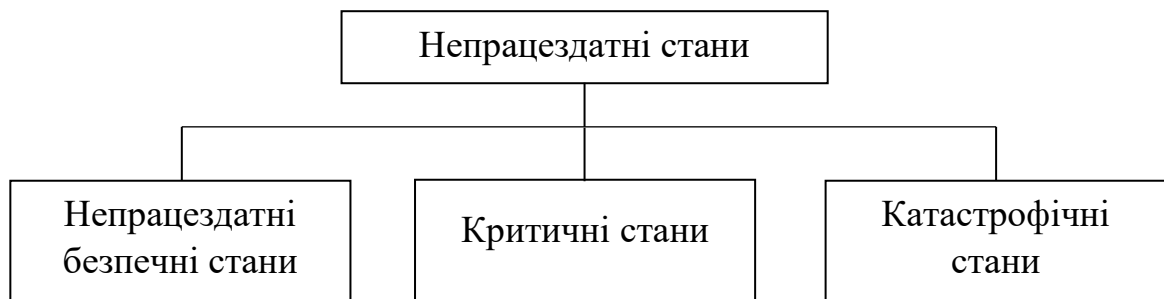


Рис. 2.1. Класифікація непрацездатних станів графа станів і переходів

Така класифікація дає змогу з розподілу ймовірностей перебування в непрацездатних безпечних, критичних та катастрофічних станах сформувати показники функціональної безпечності безпосередньо з ГСП. Разом з цим, з цього ж ГСП, на основі працездатних станів, можна формувати показники надійності, і відповідно, досліджувати вплив засобів підвищення безпечності на надійність системи.

Таким чином, маючи ГСП, який відображає працездатні стани і розділивши непрацездатний стан на безпечні непрацездатні, критичні та катастрофічні стани можна отримати модель у вигляді ГСП, з якої можна отримати показники і функціональної безпечності і надійності. За наявності такої моделі можна не тільки визначати показники функціональної безпечності і надійності, а й досліджувати вплив на безпечність введення відмовостійких конфігурацій, застосування певних стратегій технічного обслуговування і ремонту тощо. Разом з цим модель у вигляді ГСП дала б змогу кількісно визначати вплив введення засобів підвищення функціональної безпечності на надійність РЕСВП, а це б дозволило вирішувати суперечність між надійністю та безпечністю. Таку модель надалі будемо називати «комплексною моделлю».

Структурна схема методу розділення станів РЕСВП на працездатні та непрацездатні представлено на Рис. 2.2.

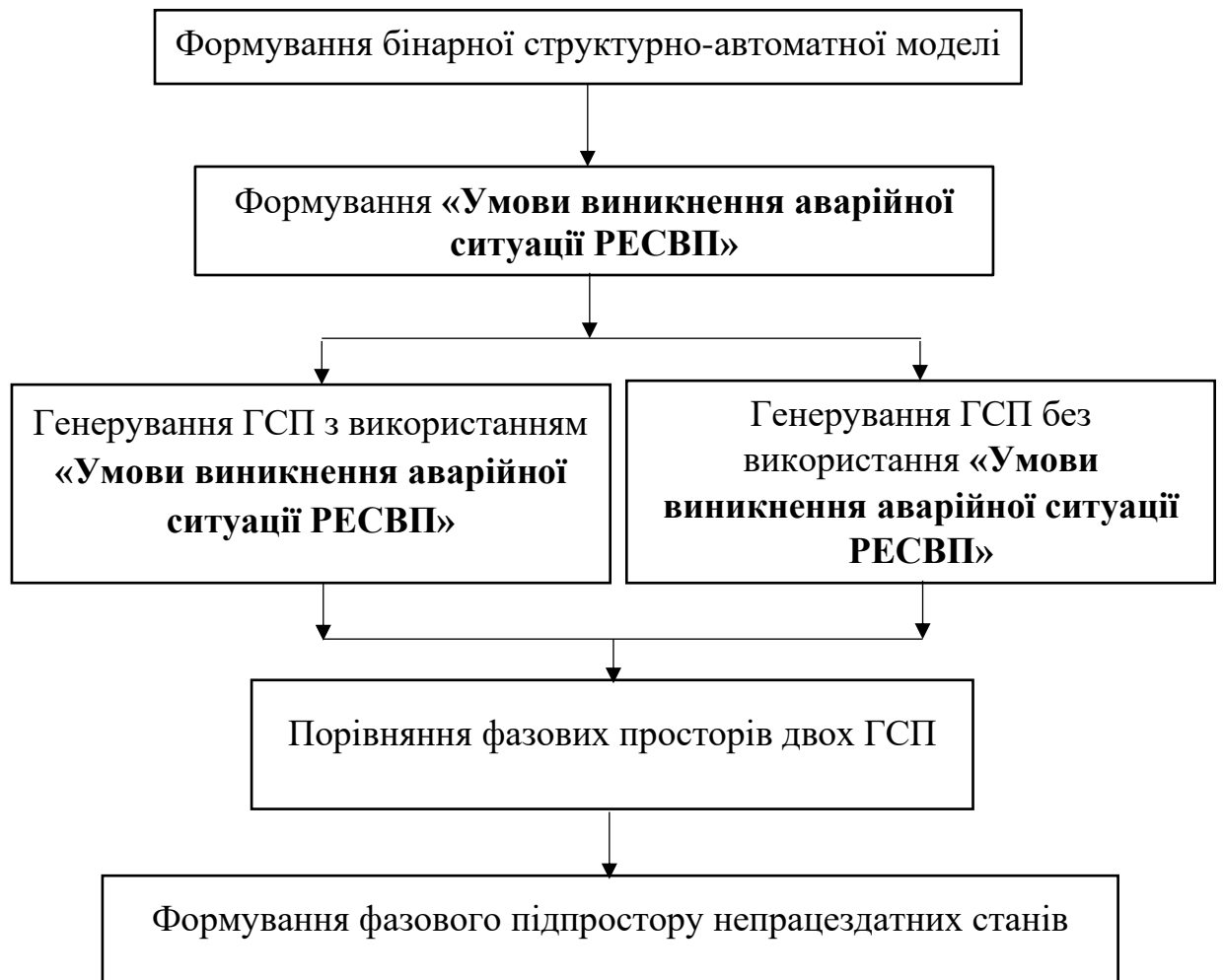


Рис. 2.2. Структурна схема методу розділення станів РЕСВП на працездатні та непрацездатні

2.2.1. Удосконалення структури вектора стану для однозначної класифікації різновидів непрацездатних станів

Для розділення простору станів на працездатні, непрацездатні безпечні, критичні та катастрофічні стани необхідно вдосконалити представлення станів РЕСВП. Кожен стан, в якому може перебувати об'єкт проектування в процесі свого функціонування, описується сукупністю змінних, яка називається вектором стану (ВС), а самі змінні – компонентами ВС. Для розрізнення станів необхідно здійснити перехід до бінарного опису стану кожного елемента системи. Бінарний опис стану передбачає введення окремої компоненти вектора стану для опису працездатного/непрацездатного стану кожного елемента системи. Це забезпечить однозначну ідентифікацію стану (працездатного/непрацездатного) кожного

елемента системи.

Для систем, що складаються з N однотипних модулів, у методі простору станів використовують одну компоненту вектора стану. Значення цієї компоненти буде показувати поточне значення кількості справних модулів (Рис. 2.3 а). При переході до бінарного опису станів, для кожного модуля необхідно мати окрему компоненту вектора стану. У цьому випадку, значення компоненти ВС буде показувати стан конкретного модуля: 1 – модуль справний, 0 – модуль непрацездатний.

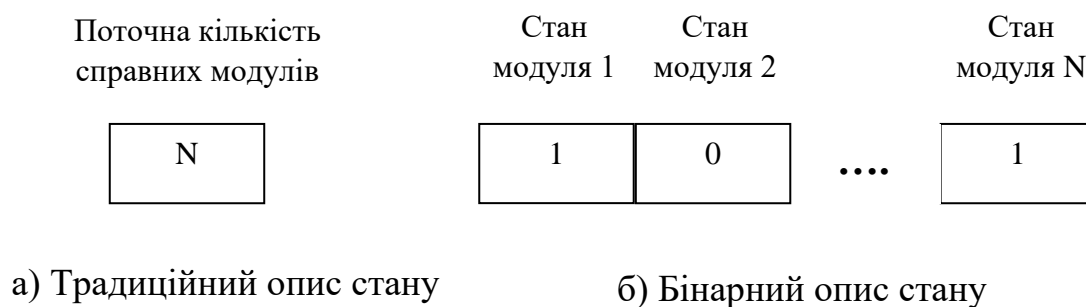


Рис. 2.3. Перехід від традиційного опису стану а) до бінарного опису стану б)

Однак бінарна структура ВС дає змогу розділити стани на працездатні і непрацездатні, однак не забезпечує розділення непрацездатних станів на безпечні, критичні та катастрофічні. Для цього необхідно вдосконалити структуру вектора стану РЕСВП введенням таких додаткових компонент:

- компоненту ВС для ідентифікації функціонального стану кожного елемента системи (режиму роботи). Дана компонента забезпечує розрізнення непрацездатних станів, а саме безпечних, критичних та катастрофічних. Разом з цим дана компонента забезпечує ідентифікацію умовно непрацездатних станів – станів простою РЕСВП під час виконання планово-профілактичних робіт з технічного обслуговування та ремонту, оскільки в певних ситуаціях простій є аналогічним аварійній ситуації;
- компоненту(ти) ВС для ідентифікації стану засобів технічного обслуговування і ремонту (кількість ремонтів, пріоритет ремонту, кількість ремонтних бригад тощо). Дана компонента забезпечує розділення працездатних станів на стани функціонування та стани простою. Для окремих різновидів систем стани

простою є еквівалентними критичним непрацездатним станам. Крім цього таке розділення підвищує достовірність функції готовності РЕСВП;

- компоненту(ти) ВС для ідентифікації стану засобів контролю, діагностики (ЗКД) та засобів комутації (ЗК). Ця компонента призначена для врахування впливу ЗКД та ЗК, як на безпечність системи, так і на її надійність.

Зрозуміло, що таке удосконалення представлення станів РЕСВП збільшує фазовий простір у рази. Однак, у випадку застосування удосконаленого методу простору станів [102] ГСП будується автоматизовано і розмірність простору станів обмежено лише можливостями комп'ютера.

При переході до удосконаленого бінарного опису стану, в загальному випадку, ВС буде мати наступну структуру (Рис. 2.4):

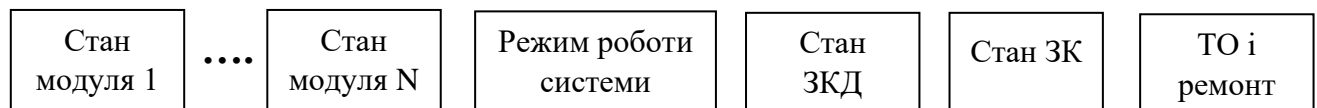


Рис. 2.4. Удосконалена структура вектора стану при бінарному описі кожного модуля системи

Коли розглядається необслуговувана система, компоненту вектора стану *ТО і ремонт* необхідно вилучити. Аналогічно, при розгляді конкретних РЕСВП можна вилучати компоненти: *Стан ЗКД*, *Стан ЗК* та *Режим роботи системи*. Компоненти бінарного опису стану: *Стан модуля 1....Стан модуля N* є **обов'язковими**.

Таким чином, вдосконалення структури ВС забезпечує побудову графа станів та переходів, з якого можна отримувати значення як показників безпечності (з непрацездатних станів) так і значення показників надійності системи (з працездатних станів) (Рис. 2.5). Зауважимо, що комплексна модель (граф станів) дає змогу проводити дослідження залежностей впливу засобів підвищення надійності на значення показника безпечності і засобів підвищення безпечності на значення показника надійності.

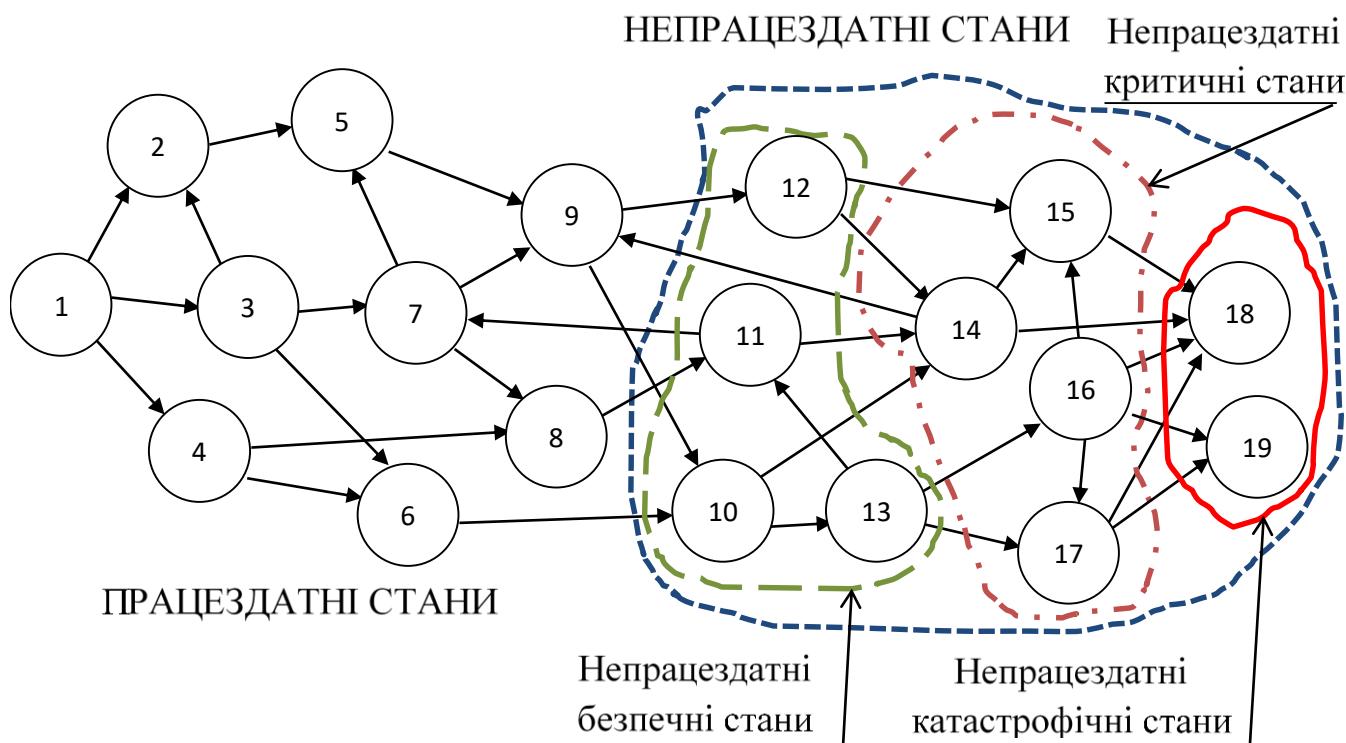


Рис. 2.5. Граф станів і переходів РЕСВП з розділеним простором непрацездатних станів для визначення функції аварійності

2.2.2. Принципи побудови бінарної структурно-автоматної моделі

Для автоматизованої побудови ГСП, крім модифікації структури ВС для поділу непрацездатних станів на три класи, необхідно здійснити вдосконалення структур даних, з яких складається САМ.

Структурно-автоматну модель, в якій використовуються бінарне представлення компонент ВС для опису працездатності кожного елемента системи, будемо називати **бінарною**. Бінарна САМ, на відміну від відомої САМ [102] описує поведінку і структуру РЕСВП не об'єднуючи непрацездатні стани в один стан.

Вектор стану в бінарній САМ повинен відповідати таким вимогам:

- 1) Для опису працездатності кожного елемента системи повинна використовуватись окрема компонента ВС. Навіть у випадку однотипних елементів застосовувати для них спільну компоненту ВС не допускається.
- 2) Компонента ВС, яка описує працездатність окремого елемента повинна приймати лише два значення – 0 і 1.
- 3) Для розрізнення непрацездатних станів на безпечні, критичні та

катастрофічні необхідна окрема компонента ВС для ідентифікації режиму роботи РЕСВП.

- 4) У випадку моделювання систем з відновленням (ремонт чи реконфігурацією) для кожного елемента системи повинен бути передбачений індивідуальний додатковий компонент – лічильник кількості відновлень чи реконфігурацій.
- 5) Для врахування впливу ЗКД та ЗК необхідні додаткові компоненти ВС.

Множина формальних параметрів РЕСВП, представлена в САМ, крім середнього значення тривалості безвідмовної роботи та середнього значення тривалості ремонту, повинна обов'язково містити опис констант, які стосуються кожної компоненти ВС, що описує умовно працездатні стани (простою) та непрацездатні стани:

- кількість використаних ремонтів;
- ймовірність успішного підключення резерву засобами комутації;
- ймовірності виявлення, локалізації та успішного усунення несправності.

Дерево правил модифікації компонент вектора стану в бінарній САМ потребує: зміни базових подій; формалізований опис ситуацій, в яких відбувається кожна базова подія; правило модифікації компонент ВС, а саме:

- Для кожного N-го модуля системи обов'язковою вводиться подія:

Вихід Модуля N з ладу

- Обов'язковою умовою виконання такої події є те, що значення відповідної компоненти ВС повинна бути рівною одиниці: $V_N = 1$.
- Наслідком такої події (правилом модифікації компоненти ВС) буде перехід модуля в непрацездатний стан і відповідна компонента ВС прийме значення рівне нулю: $V_N = 0$.

Фрагмент вдосконаленого дерева правил модифікації бінарної САМ приведено на Рис. 2.6.

Інші базові події, а саме локалізація несправності, заміна модуля, ремонт модулів, робота ЗКД та засобів комутації тощо записуються у відповідності до

правил [102].

На основі розробленої бінарної САМ з використанням програмного засобу ASNA здійснюється автоматизована побудова графа станів та переходів. На основі отриманого графа станів і переходів автоматично формується аналітична модель у вигляді системи лінійних диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена, розв'язок якої, дасть можливість отримати розподіл ймовірностей перебування системи в кожному стані [103].

Події	Умови і обставини	ФРІП	ФРІАП	Правила модифікації ВС
Відмова модуля 1	$V_1=1$	L_1	1	$V_1=0$
.....
Відмова модуля N	$V_N=1$	L_N	1	$V_N=0$
.....

Рис. 2.6. Фрагмент дерева правил модифікації бінарної структурно-автоматної моделі

2.2.3. Методика вибору непрацездатних станів з простору станів

В результаті модифікації вектора стану РЕСВП та введення поняття бінарної САМ отримано деталізоване представлення непрацездатного стану. Воно представлятиме собою масив непрацездатних станів, на основі яких можна аналізувати виникнення аварійних ситуацій РЕСВП з причини відмов окремих елементів та підсистем. Але для такого аналізу необхідно розділити непрацездатні стани у відповідності до класифікації (Рис. 2.1) на: непрацездатні безпечні, критичні та катастрофічні, що дозволить розглядати як окремі аварійні ситуації так і взаємозв'язки між різними аварійними ситуаціями з врахуванням того, що окремі ті ж самі непрацездатні стани можуть входити в різні аварійні ситуації.

Для представлення аварійних ситуацій відповідною групою непрацездатних

станів необхідно сформувавши логічний вираз – «Умову аварії РЕСВП», який описує кожен аварійну ситуацію для об'єкта дослідження.

Логічний вираз «Умови аварії РЕСВП» формується з компонент ВС поєднаних між собою логічними операціями і є необхідним для вибору з графа станів і переходів тих станів, які формують Сукупності (групи) непрацездатних станів, що призводять до виникнення аварійної ситуації.

Для врахування належності певної частини непрацездатних станів ГСП до двох і більше Сукупностей (груп) потрапляння до аварійної ситуації необхідно мінімізувати логічний вираз «Умови аварії РЕСВП», використовуючи правила булевої алгебри. Це дасть змогу розглядати взаємозалежність аварійних ситуацій і позбутися суттєвого недоліку ДВ та ДДВ, коли вважають (припускають), що усі аварійні ситуації є незалежними.

Класифікація масиву непрацездатних станів об'єкта дослідження. 1) В бінарну САМ об'єкта дослідження вводиться мінімізована «Умова аварії РЕСВП». «Умова аварії РЕСВП» – це умова об'єднання всіх непрацездатних станів в один стан. На основі такої САМ, за допомогою програмного засобу ASNA, здійснюється побудова ГСП. Результатом є масив усіх можливих працездатних та умовно працездатних станів і один стан, в якому об'єднано всі непрацездатні стани.

2) З бінарної САМ вилучається умова об'єднання всіх непрацездатних станів в один стан. На основі цієї САМ, за допомогою програмного засобу ASNA, здійснюється побудова іншого ГСП. Цей ГСП включає в себе крім усіх працездатних станів, всі непрацездатні стани.

3) Порівнюючи простори станів обох ГСП необхідно вилучити працездатні стани, які є і в першому і в другому ГСП і в результаті отримаємо масив усіх непрацездатних станів.

2.3. Формування функції аварійності для оцінювання безпеки радіоелектронних систем відповідального призначення

2.3.1. Поняття функції аварійності

Для оцінювання безпеки систем за допомогою ДВ чи інших логіко-ймовірнісних методів використовується поняття мінімальних січень, яке відображають у вигляді логічних функцій [16, 22, 23, 71]. Визначення мінімальних січень за допомогою використання методу простору станів нам не відомо. Однак наш досвід використання моделей у вигляді ГСП дав підстави передбачити, що існує така можливість. Більше того модель у вигляді ГСП дає змогу визначати ймовірність виникнення в системі непрацездатних станів в залежності від тривалості експлуатації. Пропонуємо таку залежність називати «функцією аварійності».

Отже, функція аварійності (ФА) – це залежність ймовірності виникнення в системі непрацездатних станів, які призводять до аварійної ситуації, від тривалості експлуатації (спостереження). Значення функції аварійності визначається як сума ймовірностей перебування в безпечних непрацездатних станах, критичних та катастрофічних станах. Переходи між цими станами показують траєкторію переходу (еволюцію) системи від несуттєвої відмови до аварії. Причому чим менше переходів від непрацездатного безпечного стану до катастрофічного, тим гірші показники безпеки має система, і відповідно є менше можливостей уникнути аварійної ситуації.

Властивості функції аварійності:

- Функція аварійності – невід’ємна функція $Q_A(t) = \begin{cases} 0, & t = 0 \\ f(t), & 0 \leq t \leq \infty \\ 1, & t = \infty \end{cases}$
- Для конкретної системи кількість функцій аварійності $Q_A(t)$ дорівнює кількості мінімальних січень (MCS), що призводять до аварійної ситуації.
- Значення функції аварійності для конкретного інтервалу тривалості

експлуатації системи дорівнює значенню ймовірності появи мінімального січення, яке отримано за допомогою ДВ для такої ж тривалості експлуатації системи.

- Об'єднання усіх функцій аварійності $Q_A(t)$ відповідає ймовірності виникнення аварійної ситуації $Q_{AC}(t)$ на цьому інтервалі:

$$Q_{AC}(t) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - Q_{Ai}(t)), \quad (2.3)$$

де $Q_{Ai}(t)$ – i -та функція аварійності,

k – кількість функцій аварійності.

Метод визначення функції аварійності показано в наступних пунктах.

2.3.2. Створення маски аварійної ситуації для вибору непрацездатних станів, які формують вираз функції аварійності

Для формування виразу ФА необхідно встановити сукупність непрацездатних станів, які призводять до аварійної ситуації. Оскільки одні й ті ж стани можуть входити в склад різних ФА, то необхідно мати засіб для однозначної їх ідентифікації. В якості такого засобу запропоновано використовувати маску аварійної ситуації.

Маска аварійної ситуації – це логічний вираз, сформований з компонент ВС, і у випадку коли вони приймають значення рівне нулю, то це є необхідною і достатньою умовою для виникнення аварійної ситуації. Маска аварійної ситуації отримується з «Умови аварії РЕСВП» шляхом її мінімізації за правилами алгебри логіки.

Маска аварійної ситуації має наступні властивості:

- Якщо логічний вираз, який описує аварійну ситуацію, складається з компонент ВС, об'єднаних тільки оператором «AND», то для об'єкта дослідження властива одна функція аварійності:

$$(Vg=0) \wedge (Vh=0) \wedge \dots \wedge (Vk=0)$$

- Якщо логічний вираз, який описує аварійну ситуацію, складається з N груп складових, об'єднаних оператором «OR», причому в кожній з груп

компоненти ВС об'єднано тільки оператором «AND», то для об'єкта дослідження властиві N функцій аварійності:

$$((V_m=0)\wedge(V_n=0)\wedge\dots\wedge(V_q=0))\vee\dots\vee((V_s=0)\wedge(V_t=0)\wedge\dots\wedge(V_y=0))$$

Наприклад, якщо в результаті мінімізації «Умови аварії РЕСВП» отримано наступний логічний вираз, що складається з трьох груп компонент ВС, об'єднаних логічним оператором OR:

$$((V_1=0)\wedge(V_2=0)\wedge(V_4=0))\vee((V_2=0)\wedge(V_5=0))\vee((V_1=0)\wedge(V_5=0)),$$

то в даному випадку є три функції аварійності. Першу функцію аварійності формують непрацездатні стани системи, в яких 1-й, 2-й та 4-й модулі є непрацездатними. Другу ФА формують непрацездатні стани системи, в яких 2- та 5-й модулі є непрацездатними, а третю - непрацездатні стани системи в яких 1- та 5-й модулі є непрацездатними.

На основі отриманих масок за допомогою методу, який приведено нижче, формують ФА.

2.3.3. Метод формування функції аварійності в підпросторі непрацездатних станів

Метод формування ФА складається з двох етапів. На першому за допомогою маски аварійної ситуації визначаються групи станів, що відповідають конкретній ФА. На другому – з вибраних станів формують вирази для обчислення значень ФА.

Визначення груп станів, що відповідають кожній функції аварійності. Вибираються усі стани, у яких компоненти ВС, що відповідають масці аварійної ситуації, дорівнюють нулю. Якщо маска аварійної ситуації має декілька складових об'єднаних логічним оператором OR, то відповідно буде стільки ж ФА і для кожної з яких буде існувати своя група станів.

Вхідними даними для методу є сукупність непрацездатних станів, які отримуються з графу станів і переходів. Для отримання масиву непрацездатних станів необхідно використати методику приведену в пп. 1.2.4 (Рис. 2.6).

Для розроблення алгоритму автоматизованого визначення ФА прийнято наступні припущення:

- для системи властива хоча б одна ФА;
- катастрофічний стан (КС) – це стан, в якому РЕСВП знаходиться в аварійній ситуації;
- якщо хоча б одній компоненті ВС, яка дорівнює нулю і входить у ФА, у всіх цих станах надати значення одиниці (перевести у справний стан), то аварії РЕСВП не буде.

Для компактного (алгоритмічного) опису розробленого методу прийнято наступні скорочення:

n – вказівник порядкового номера ФА_n.

i, j – вказівники порядкового номера компоненти ВС.

ЛКК – лічильник кількості компонент у масці аварійної ситуації (кількості виразів, розділених операторами OR).

ЛВЦ – лічильник кількості виконань внутрішнього циклу.

ЛКС – лічильник кількості компонент ВС у масці аварійної ситуації системи.

ЛФА – лічильник функцій аварійності.

ЛНСn – лічильник порядкових номерів ФА

ЛЗЦ – лічильник кількості виконань зовнішнього циклу.

ПКВС – кількість компонентів ВС.

n кількість компонентів ВС, значення яких рівне нулю.

МСС – масив компонент маски аварійної ситуації.

МФА – масив ФА.

ОР – ознака рівності.

ОМС – ознака мінімального січення, тобто ФА;

ВСn[i] – значення *i*-го вектора стану компоненти маски аварійної ситуації.

з порядковим номером **n**.

Для знаходження ФА необхідно масив непрацездатних станів РЕСВП впорядкувати за ознакою найменшої кількості подій котрі призводять до аварійної ситуації системи, тобто за мінімальною кількістю компонент ВС, які дорівнюють нулю. Це є ті непрацездатні стани, в які здійснено перехід безпосередньо з працездатного стану. Як правило це є непрацездатні безпечні стани. На основі

просортованого масиву непрацездатних станів системи, у відповідності до компонент маски аварійної ситуації знаходять стани системи, з яких буде сформована конкретна ФА. В результаті отримується масив ФА.

Першим кроком даного етапу є створення матриці, яка складається з трьох стовпців - у першому стовпці вписується порядковий номер компоненти маски аварійності - N , в другий - записується через кому значення компоненти ВС, яка відповідає першій компоненті маски аварійності, у третій - кількість нулів компоненті ВС у відповідному ВС (ЛНС).

Процедура сортування компонент масок аварійних ситуацій. Процедура сортування виконується у двох вкладених циклах - зовнішньому та внутрішньому, шляхом порівняння двох сусідніх компонент масок аварійної ситуації, та передбачає виконання наступних кроків:

Вхідні дані:

ЛЗЦ – лічильник зовнішнього циклу, початковому значенню якого присвоюється значення кількості компонент маски аварійної ситуації.

ЛВЦ = (ЛЦЗ - 1) – лічильник внутрішнього циклу.

n - вказівник порядкового номера компоненти маски аварійної ситуації.

(n+1) – вказівник наступного порядкового номера компоненти маски аварійної ситуації маски аварійної ситуації.

Крок 1. Вказівнику порядкового номера компоненти маски аварійної ситуації системи присвоюється **n = 1**; Вказівнику наступного порядкового номера присвоюється значення **(n+1) = 2**, від поточного значення лічильника зовнішнього циклу **ЛЗЦ** віднімається одиниця - **ЛЗЦ = ЛЦЗ - 1**; Після цього перевіряється умова чи **ЛЗЦ** рівний нулю:

Якщо **ЛЗЦ = 0**, то сортування компонент маски аварійної ситуації вважається **закінченим**. В результаті даної процедури отримується матриця компонент маски аварійної ситуації, в якій вони є просортовані за кількістю компонент ВС і значення яких рівне нулю.

Якщо **ЛЗЦ > 0**, то процедура сортування компонент маски аварійної ситуації продовжується, здійснюється перехід до кроку 2.

Крок 2. Виконується порівняння відповідного лічильника нулів $ЛНС_n$ під номером n та лічильника нулів $ЛНС(n+1)$ під номером $(n + 1)$.

Якщо значення лічильника нулів $ЛНС_n$ з порядковим номером n *більше* значення лічильника $ЛНС(n+1)$ з порядковим номером $(n + 1)$, то ці ВС необхідно поміняти місцями; Далі необхідно зменшити показ лічильника $ЛВЦ = ЛВЦ - 1$ та здійснити перехід до кроку 3;

У матриці компонент маски аварійної ситуації порядкових номерів заміняти не потрібно, а лише поміняти місцями компоненти маски, тобто поміняти місцями компоненти ВС.

Якщо значення лічильника нулів у компоненті маски аварійної ситуації $ЛНС_n$ з порядковим номером n є *меншим чи рівним* значенню лічильника нулів $ЛНС(n+1)$ компоненти під порядковим номером $(n+1)$, то ці компоненти місцями не міняються; Далі зменшується значення лічильника внутрішнього циклу $ЛВЦ = ЛВЦ - 1$ та здійснюється перехід до кроку 3;

Крок 3. Необхідно збільшити на одиницю вказівник порядкового номера компоненти маски аварійної ситуації на одиницю $n = n + 1$ та наступний вказівник порядкового компоненти маски $(n+1) = (n+1) + 1$. На цьому кроці здійснюється перевірка рівності нулю значення лічильника внутрішніх циклів:

Якщо $ЛВЦ > 0$, то не всі сусідні компоненти маски аварійної ситуації були порівняні між собою, тому необхідно повернутися до кроку 2;

Якщо $ЛВЦ = 0$, то усі сусідні компоненти маски аварійної ситуації були порівняні між собою, тому необхідно повернутися до кроку 1.

В результаті переміщення компонент маски аварійної ситуації у матриці отримується просортована матриця цих компонент. Сортування здійснено за кількістю нулів у ФА. Перший рядок отриманої матриці буде містити ВС з найменшою кількістю компонент, які дорівнюють нулю, який відповідає компоненту маски аварійної ситуації. Далі буде компонент маски ВС з такою ж або більшою кількістю компонент ВС, які дорівнюють нулю і так до тих пір поки не виберуться усі стани, значення компонент ВС яких відповідає масці аварійної ситуації.

Процедура знаходження функцій аварійності. Метод визначення ФА використовує наступні процедури: знаходження ФА та порівняння компонент маски аварійної ситуації. Процес знаходження ФА відбувається у декілька вкладених циклів – загальний цикл знаходження ФА та внутрішніх циклів процедури порівняння компонент маски аварійної ситуації.

Вхідні дані:

ЛКС – присвоюється значення кількості компонент маски аварійної ситуації;

ЛФА – лічильник ФА присвоюється нуль **ЛФА = 0**;

j – вказівники порядкового номера компоненти ВС;

n – вказівник порядкового номера аварійної ситуації;

OP – ознака рівності;

ОМС – лічильник ознаки ФА;

Крок 1. Вказівник порядкового номера компоненти маски аварійної ситуації отримує значення кількості компонент в масці мінус одиниця. ПДалі здійснюється перехід до кроку 2.

Крок 2. Вказівник порядкового номера компоненти ВС отримує значення 1, а лічильник ознаки ФА отримує значення вказівника порядкового номера аварійної ситуації. Перехід на крок 3.

Крок 3. Процедура порівняння номера компоненти маски аварійної ситуації. Вхідними даними для неї будуть **n** - вказівник порядкового номера аварійної ситуації та **j** - вказівник порядкового номера компоненти ВС. Після проведення порівняння номера компоненти маски аварійної ситуації необхідно перевірити ознаку рівності **OP**:

Якщо після проведення порівняння номера компоненти маски аварійної ситуації ознака рівності прийме значення рівне нулю **OP = 0**, то значення лічильника ознаки ФА слід декрементувати **ОМС = ОМС - 1**, та перейти на крок 4.

Крок 4. Після збільшення вказівника порядкового компонента ВС вибирають наступну комопоненту **ВС - j = j + 1**; Перед тим потрібно здійснити перевірку існування такої компоненти ВС, для цього здійснюється перевірка умови:

Якщо **j > n**, то перехід на крок 5.

Якщо $j \leq n$, то перехід на крок 3.

Крок 5 Виконується перевірка, чи компонента маски аварійної ситуації з порядковим номером $n \in \Phi A$. Для цього виконується перевірка рівності нулю значення лічильника ознаки ΦA .

Якщо $OMC=0$, то функція аварійності з порядковим номером $n \in \Phi A$ системи. Компоненту маски з порядковим номером n потрібно записати в масив функцій аварійності $M\Phi A$, інкрементувати лічильник ΦA : $L\Phi A = L\Phi A + 1$; перехід на крок 6.

Якщо $OMC > 0$, то перехід на крок 6.

Крок 6. $n = n - 1$;

Якщо $n > 0$, то повернення на крок 2.

Якщо $n = 0$, то це означає, що усі ΦA перевірені та було пройдено повністю процедури знаходження ΦA і усі стани ГСП, що формують дану ΦA були знайдені. Процедура знаходження ΦA завершена.

Процедура порівняння станів у функціях аварійності. Вхідні дані:

ПКВС – присвоюється значення кількості компонент **ВС**.

ЛНС_n – присвоюється значення кількості нулів компонент **ВС** у стані з порядковим номером n .

ВС_n[i] – значення i -ї компоненти **ВС**, яка відповідає компоненті маски аварійної ситуації з порядковим номером n .

ВС_j[i] – значення i -ї компоненти **ВС**, яка відповідає компоненті маски аварійної ситуації з номером j .

$i = 1$;

Вхідними даними є результати знаходження ΦA , а саме n та j .

Крок 1. Порівняння відповідних компонент **ВС** з компонентами маски аварійної ситуації.

Якщо компонента **ВС_n[i]** рівна нулю (**ВС_n[i] = 0**) та компонента **ВС_j[i]** також рівна нулю (**ВС_j[i] = 0**), то **ЛНС_n = ЛНС_{n-1}**; $i = i + 1$; перехід на крок 2.

Якщо хоча б одна умов не виконуються, то $i = i + 1$; тоді перехід на крок 2.

Крок 2. Перевірка чи поточний номер компоненти **ВС** не став більшим за

загальну кількість компонент ВС у масці аварійної ситуації.

Якщо $i \leq \text{ЛВС}$, то повернутись на крок 1.

Якщо $i > \text{ЛВС}$, то перехід на крок 3.

Крок 3. Присвоєння ознаці порівняння **ОР** певного значення.

Якщо $\text{ЛНСn} = 0$, то **ОР** = 1.

Якщо $\text{ЛНСn} > 0$, то **ОР** = 0.

На цьому кроці процедура порівняння компонент маски аварійної ситуації завершена.

Формування виразів для функцій аварійності. Результатом буде сформована матриця, яка містить чотири стовпчики - у перший стовпчик буде вписуватись порядковий номер ФА - N, в другий - записується компонент ВС та його значення, у третій - будуть записуватись номери станів, що формують відповідну ФА.

Вхідні дані:

Масив ФА, отриманих на Етапі 1.

Масив усіх станів системи (працездатних та непрацездатних).

ЛФА - лічильник кількості ФА, які записані в масиві **МФА**.

ПКВС - загальна кількість станів системи.

Крок 1. Вказівнику порядкового номера ФА - **j** присвоюється одиниця. Тобто вибирається перша ФА з масиву функцій аварійності - **j = 1**.

Крок 2. Вказівнику порядкового номера компоненти матриці аварійної ситуації **n** необхідно присвоїти **n=1**.

Крок 3. Порівняння компонент матриці аварійної ситуації. Вхідними даними для неї будуть **n** та **j**.

Якщо після процедури порівняння компонент матриці аварійної ситуації ознака рівності **ОР = 1**, то у в третій стовпчик матриці функцій аварійності записують номер стану – **n**, перехід на крок 4.

Крок 4. Вказівник порядкового номера аварійної ситуації **n** інкрементується: **n = n + 1**; Після цього здійснюється перевірка знаходження вказівника в межах масивів станів системи за наступною умовою:

Якщо $n < \text{ПКВС}$, то значення данго вказівника знаходиться в межах

розмірності масиву станів системи, після перевірки перейти на крок 3.

Якщо $n \geq \text{ПКВС}$, то перехід на крок 5.

Крок 5. Інкрементація вказівника порядкового номера компоненти матриці аварійної ситуації: $\mathbf{j} = \mathbf{j} + \mathbf{1}$; Також необхідно перевірити чи не вийшов даний вказівник за межі розмірності масиву аварійних ситуацій. Умова перевірки :

Якщо $\mathbf{j} \leq \text{ЛФА}$, то вказівник знаходиться в межах з масиву станів системи, перехід на крок 2.

Якщо $\mathbf{j} > \text{ЛФА}$, то пошук ФА закінчено.

В результаті даної процедури заповнюється третій стовпчик матриці аварійних ситуацій.

Процедура отримання значень ймовірностей відповідних ФА полягає у сумуванні значень ймовірностей перебування у станах, номери яких були записано у третьому стовпчику відповідної ФА у матриці масиву ФА. Результат заповнюється в четвертий стовпчик. Таким чином, формула визначення значень функції аварійності дорівнює сумі ймовірностей перебування у тих станах, що відповідають масці аварійної ситуації.

$$Q_{Ai}(t) = \sum_{j=m}^q P_j(t) + \dots \quad (2.4),$$

де $P_j(t)$ – ймовірності перебування РЕСВП у групі непрацездатних станів $m \dots q$, у яких значення компонент ВС дорівнює нулю у відповідності до i -ї маски аварійності. Група непрацездатних станів в найпростішому випадку може включати усі непрацездатні стани. Для РЕСВП таких груп станів може бути декілька.

Наприклад, якщо маска аварійної ситуації:

$$(Vg=0) \wedge (Vh=0) \wedge (Vk=0)$$

відповідає станам 20...27 та 32...35, то вираз для ФА буде мати вигляд:

$$Q_A(t) = \sum_{i=20}^{27} P_i(t) + \sum_{i=32}^{35} P_i(t)$$

2.4. Метод побудови дерева відмов на основі функцій аварійності

Підчас оцінювання ризику експлуатації РЕСВП для візуалізації аварійної ситуації є потреба в побудові дерева відмов. Дерево відмов дає змогу отримати графічне відображення розвитку аварійної ситуації від базових подій (причин) до події верхнього рівня (наслідок). В більшості випадків таке відображення дає змогу експертам швидко виявити «слабкі» місця системи ще на етапі якісного аналізу ДВ і підтвердити свої гіпотези кількісним аналізом мінімальних січень. Представлення аварійних ситуацій у вигляді дерев відмов є обов'язковим при сертифікації РЕСВП у відповідності до міжнародних стандартів з безпечності [2, 222, 223]. Також дерево відмов є необхідним при проведенні FMEA/FMECA – аналізу.

Вхідними даними для побудови ДВ є масив ФА, з якого розробник зможе отримати логічну функцію. Отримана логічна функція буде аналогом логічної суми мінімальних січень, отриманих з традиційного ДВ. Оскільки цю логічну функцію можна поставити у відповідність до дерева відмов, то замінивши логічні оператори на відповідні умовні позначення логічних елементів можна отримати графічне зображення дерева відмов. В такому випадку ДВ буде оптимізоване за критерієм мінімуму компонент, які вийшли з ладу і призвели до аварійної ситуації РЕСВП.

Побудова ДВ відбувається у два етапи. Результатом першого етапу є логічна функція ДВ, отримана шляхом сумування відповідних ФА з матриці аварійності. Результатом другого етапу є отримання графічного зображення ДВ шляхом заміни логічних операторів на логічні елементи. Розгортання логічної функції до дерева здійснюється знизу догори.

Побудоване таким чином графічне представлення ДВ буде суттєво різнитися від традиційного статичного ДВ, оскільки якщо з нього сформувавши мінімальні січення, то у ймовірності появи цих мінімальних січень будуть враховувати наслідки усіх динамічних процесів, котрі відбуваються в РЕСВП. Мається на увазі вплив засобів забезпечення відмовостійкості, вплив стратегій технічного обслуговування та засобів контролю, діагностики та комутації. Таким чином, отримане статичне ДВ має усі властивості притаманні ДДВ, однак в даному випадку відсутня основна проблема ДДВ [23] – їх ручна побудова.

2.4.1. Запис логічної функції дерева відмов на основі функції аварійності

Скорочення, які використовуються в описі методу побудови ДВ на основі ФА:

n – вказівник порядкового номера ФА.

i – вказівник на порядковий номер компоненти ВС.

j – лічильник компонентів ВС, значення яких рівна нулю.

ПКВС – кількість компонентів у ВС.

ЛНС n – лічильник нулів компонент ВС, який входить в дану ФА.

ПКФА – кількість ФА.

ВС n [i] – значення i -го компонента вектора стану n -ї ФА.

ФЛФ – форма логічної функції.

Крок 1. Вибирається перша функція аварійності. В (n) записується 1, а лічильник нулів компонент ВС (ЛНС1) першої ФА фіксує кількість нульових компонентів ВС. Значення лічильника компонентів ВС (j) дорівнює кількості нульових компонентів ВС: $j = \text{ЛНС1}$.

Крок 2. Вибирається перший компонент вектора стану першої ФА системи $i = 1$. У ФЛФ записують символ "(".

Крок 3. Визначити значення i -ого компонента вектора стану ФА з порядковим номером n . В даному випадку існує дві альтернативи:

Якщо $\text{ВС}_n[i] = 0$, то в ФЛФ здійснюється запис вказівника поточного компонента ВС - V "i". Декрементується $j = j - 1$ - значення лічильника компонентів ВС, і здійснюється перевірка чи $j < 0$;

Якщо $j > 0$, то дана ФА містить нульові компоненти ВС і в ФЛФ записуємо слід записати символ множення "x" і перейти на крок 4. Якщо $j = 0$, у даній ФА немає нульових компонентів ВС, і треба здійснити перехід на крок 4.

Якщо значення i -ого компонента вектора стану $\text{ВС}_n[i] > 0$, то перехід на крок 4.

Крок 4. Інкрементація $i = i + 1$ компоненти ВС (i) поточної ФА з порядковим номером n з подальшою перевіркою виходу вказівника за межі значень компонентів ВС. При перевірці здійснюється порівняння вказівника компонента

ВС з ПКВС:

Якщо $i \leq \text{ПКВС}$, то перехід на крок 3.

Якщо $i > \text{ПКВС}$, то перехід на крок 5.

Крок 5. Інкрементація вказівника ФА: $n = n+1$. Перевірка перевищення кількості ФА поточним значенням вказівника порядкового номера ФА. Перевірка проводиться шляхом порівняння поточного інкрементованого вказівника ФА з постійною кількістю ФА.:

Якщо $n \leq \text{ПКВС}$, то у ФЛФ записують ")" та знак додавання "+" і переходять на крок 2.

Якщо $n > \text{ПКВС}$, то в ФЛФ записують ");". Процедура запису логічної функції ДВ завершена.

2.4.2. Побудова графічного представлення дерева відмов

Крок 1. Побудова найнижчого рівня ДВ. Усі елементи в дужках, які об'єднанні знаком множення "x", об'єднують логічними елементами AND. Усі об'єднані знаком «x» елементи повинні мати лише один вихід. Таким чином отримують найнижчий рівень ДВ. Перехід на крок 2.

Крок 2. Побудова рівнів ДВ та головної події. Здійснити об'єднання усіх виходів нижчого рівня ДВ, логічними елементами OR згідно з правилами об'єднання елементів: «Одним логічним елементом AND чи OR можна об'єднати лише два виходи з елементів нижнього рівня дерева відмов». Крок 2 виконується в циклі до того часу поки дерево відмов не завершиться однією подією найвищого рівня.

2.5. Валідація розроблених методів та методик

Валідацію розроблених методів та методик проведено шляхом порівняння результатів отриманих з універсальної моделі у вигляді ГСП за допомогою бінарної САМ та результатів отриманих з дерева відмов, побудованого за допомогою програмного забезпечення Reliasoft BlockSim [224] для тестової відмовостійкої РЕСВП.

Тестова відмовостійка не відновлювана РЕСВП складається з двох різних модулів, з'єднаних послідовно. Обидва модулі мають гарячий резерв. Перший модуль, як менш надійний, має два резервних модулі, а другий - 1. При виході з ладу резервний модуль підключається замість основного. Засоби комутації вважаються абсолютно надійними і швидкодіючими, час комутації прийнятий нескінченно малим.. Резервні модулі можуть відмовляти незалежно від основних.

Структурну схему надійності відмовостійкої РЕСВП представлено на рис. 2.7:

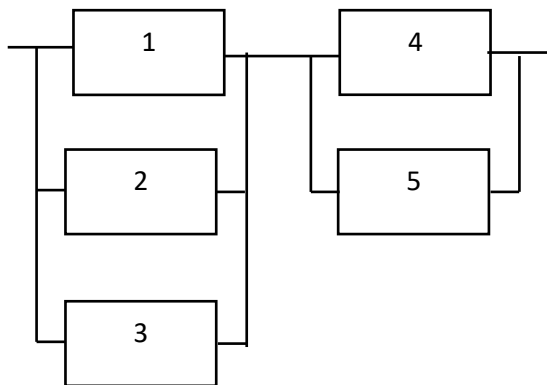


Рис. 2.7. Структурна схема надійності тестової ПАСВП

На першому етапі валідації побудовано бінарну САМ. На Рис. 2.8 представлено множину формальних параметрів.

На Рис. 2.9 представлено вектор станів. Кожному модулю відповідає окрема компонента вектора станів. Початкове значення кожної компоненти вектора станів дорівнює 1, оскільки усі модулі в початковий момент часу є працездатними.

В нижньому рядку вікна представлено умову аварії РЕСВП.

На Рис. 2.10 представлено дерево правил модифікації, яке містить такі поля:

- Події (Event) – Відмова модуля 1,..., Відмова модуля 5.
- Умови (Condition), при якій ці події відбудуться. Щоб Модуль 1 відмовив, він повинен бути справним, тому умова – $V1=1$. Аналогічні умови будуть і для решти модулів.
- Формула розрахунку інтенсивності переходу (Formula). В даному випадку усі інтенсивності переходів є константами $L1, L2$, значення яких задано в множині формальних параметрів (Рис. 2.8).
 - Альтернативних переході (Alternative) немає, тому значення

ймовірностей альтернативних переходів дорівнює одиниці.

- Правила модифікації компонент вектора станів (Modification)

змінюють поточне значення компонент вектора станів після події.

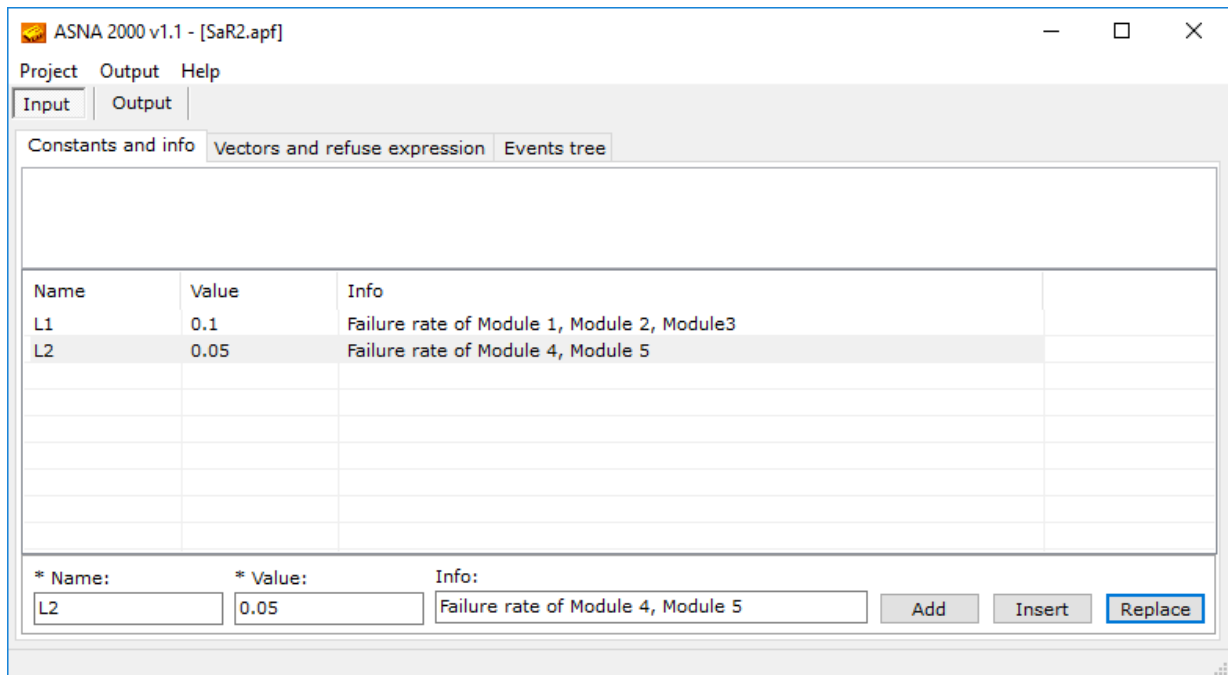


Рис. 2.8. Множина формальних параметрів

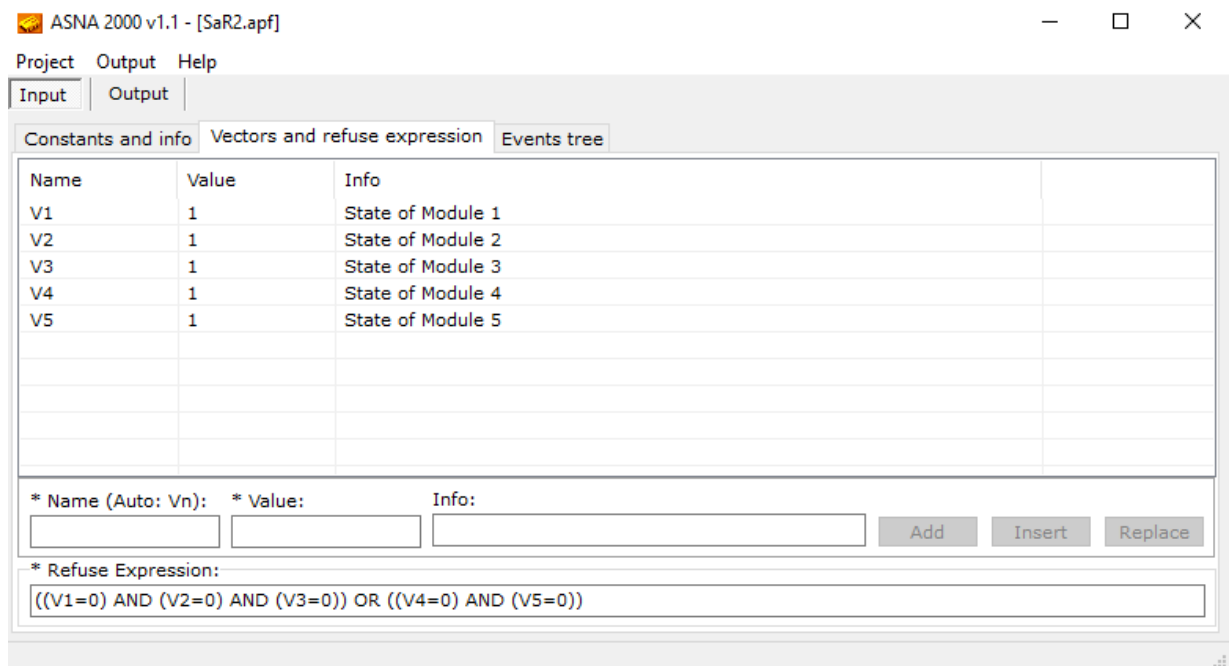


Рис. 2.9. Вектор станів та умова аварії РЕСВІІ

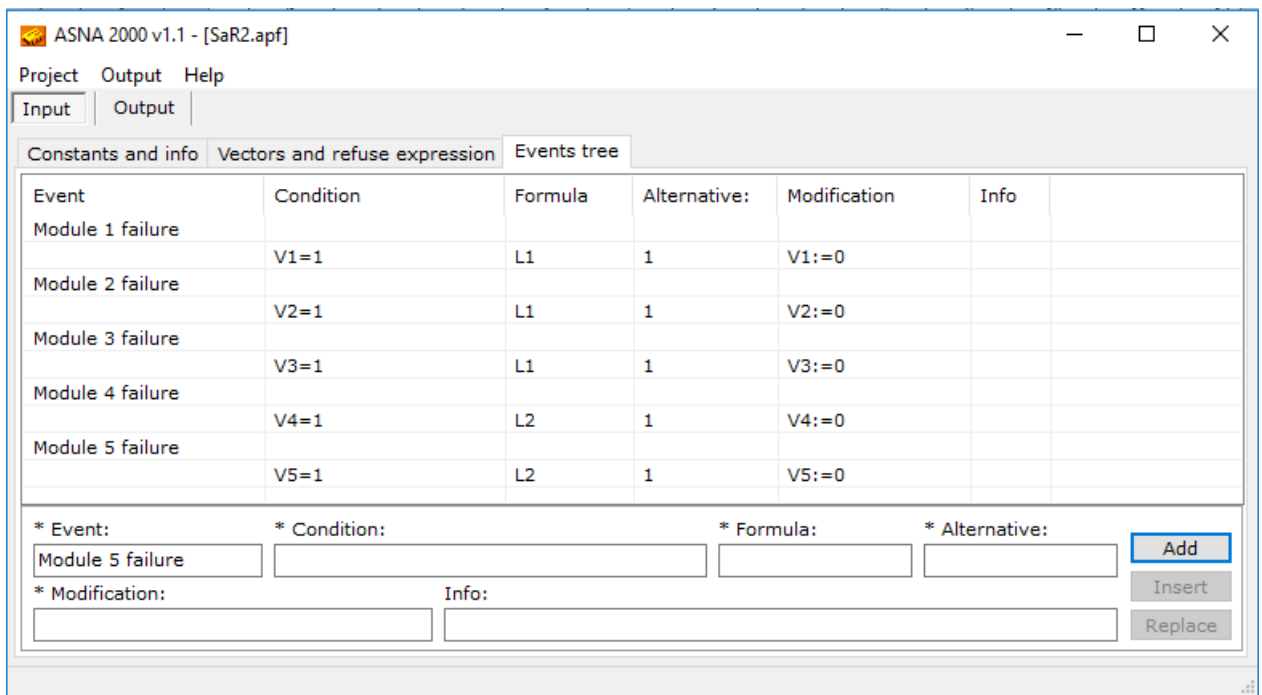


Рис. 2.10. Дерево правил модифікації.

Побудована бінарна САМ є вхідними даними для програмного забезпечення ASNA [103], яке автоматизовано генерує граф станів і переходів. В результаті отримано граф станів і переходів, який містить 32 стани і 111 переходів. Перелік станів з описом значення кожної компоненти вектора станів представлено на Рис. 2.11.

Згідно методики, структурна схема якої показана на Рис. 2.6, проведено визначення масиву непрацездатних станів. Таким чином стани 1-7, 9-15, 17-23 є працездатними. Стани 8, 16, 24-32 є непрацездатними. З цих станів і будуть сформовані функції аварійності.

Для формування функцій аварійності у відповідності до розробленої методики необхідно сформувати маски аварійності шляхом мінімізації умови аварії РЕСВП:

$$((V1=0) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0)) \text{ OR } ((V4=0) \text{ AND } (V5=0))$$

Оскільки в даному прикладі вибрано відносно просту систему, то умова аварії РЕСВП мінімізації не потребує і відразу була записана як диз'юнкція кон'юнкцій. Таким чином у нас є два операнди під знаком диз'юнкції і відповідно отримано дві функції аварійності.

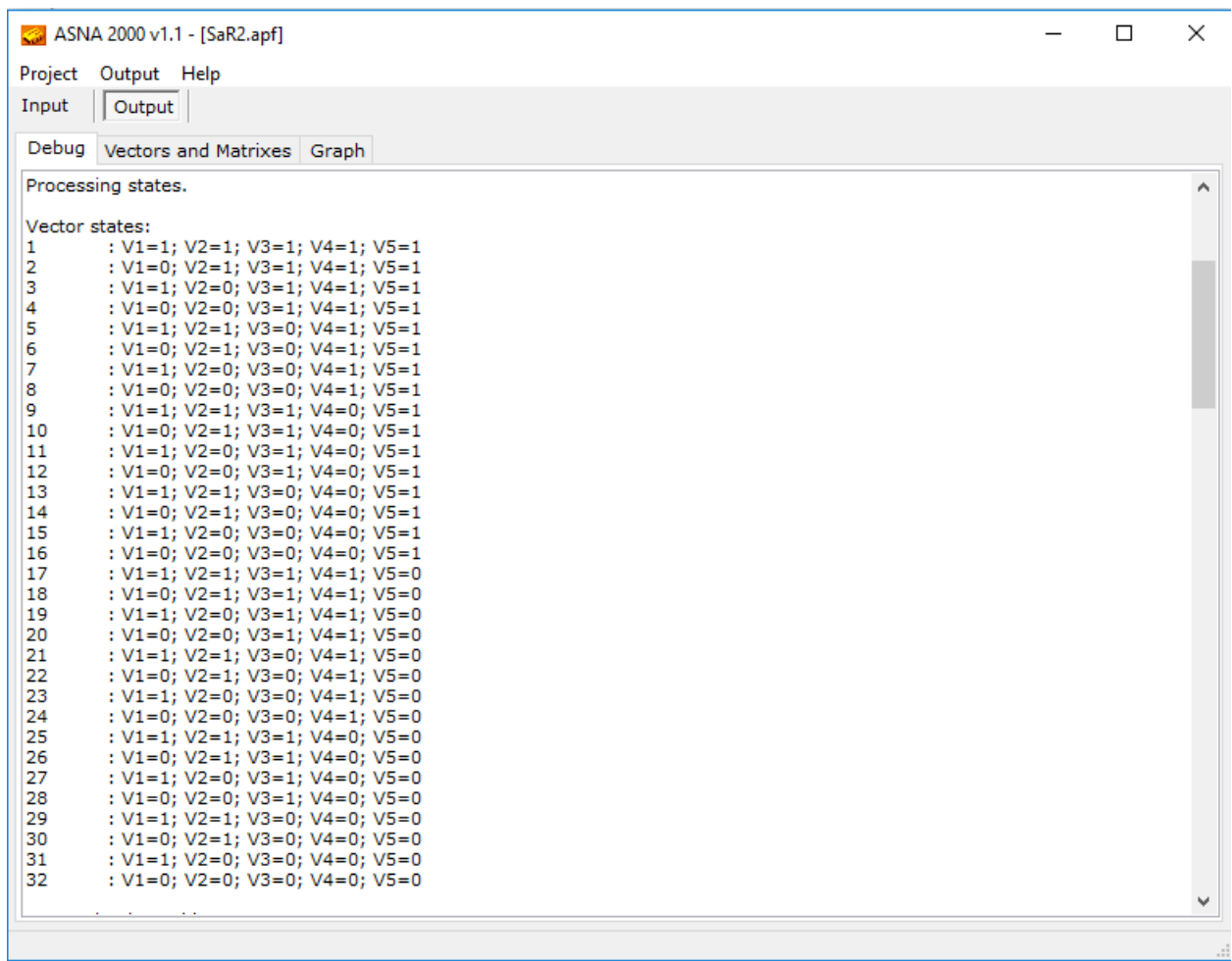


Рис. 2.11. Перелік станів з значенням кожної компоненти вектора станів
Перша функція аварійності має маску - $((V1=0) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0))$, а друга - $((V4=0) \text{ AND } (V5=0))$.

Отже перша функція аварійності буде сумою ймовірностей перебування у станах, в яких компоненти V1, V2 та V3 дорівнюють нулю. Це стани 8, 16, 24 та 32 (див. Рис. 2.11):

$$Q1(t) = P8(t) + P16(t) + P24(t) + P32(t)$$

Друга функція аварійності буде сумою ймовірностей перебування у тих станах, в яких компоненти V4 та V5 дорівнюють нулю. Це стани 24-32 (див. Рис. 2.11):

$$Q2(t) = P24(t) + P25(t) + P26(t) + P27(t) + P28(t) + P29(t) + P30(t) + P31(t) + P32(t)$$

За отриманим графом станів і переходів програмним засобом ASNA було складено систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, розв'язано її та отримано розподіл ймовірностей перебування в кожному стані. Отриманий

розподіл було експортовано в електронні таблиці Excel і побудовано функції аварійності $Q1(t)$, $Q2(t)$, які представлено на Рис. 2.12.

Також побудовано залежність ймовірності виникнення аварійної ситуації від часу як суму ймовірностей перебування в усіх непрацездатних станах:

$$Q(t) = P8(t) + P16(t) + \sum_{i=24}^{32} Pi(t)$$

та як суму функцій аварійності $Q1(t)+Q2(t)$:

$$Q(t) = Q1(t) + Q2(t) = 1 - (1 - Q1(t)) \cdot (1 - Q2(t))$$

Як видно з Рис. 2.12 залежності обох варіантів розрахунку ймовірності аварійної ситуації співпали.

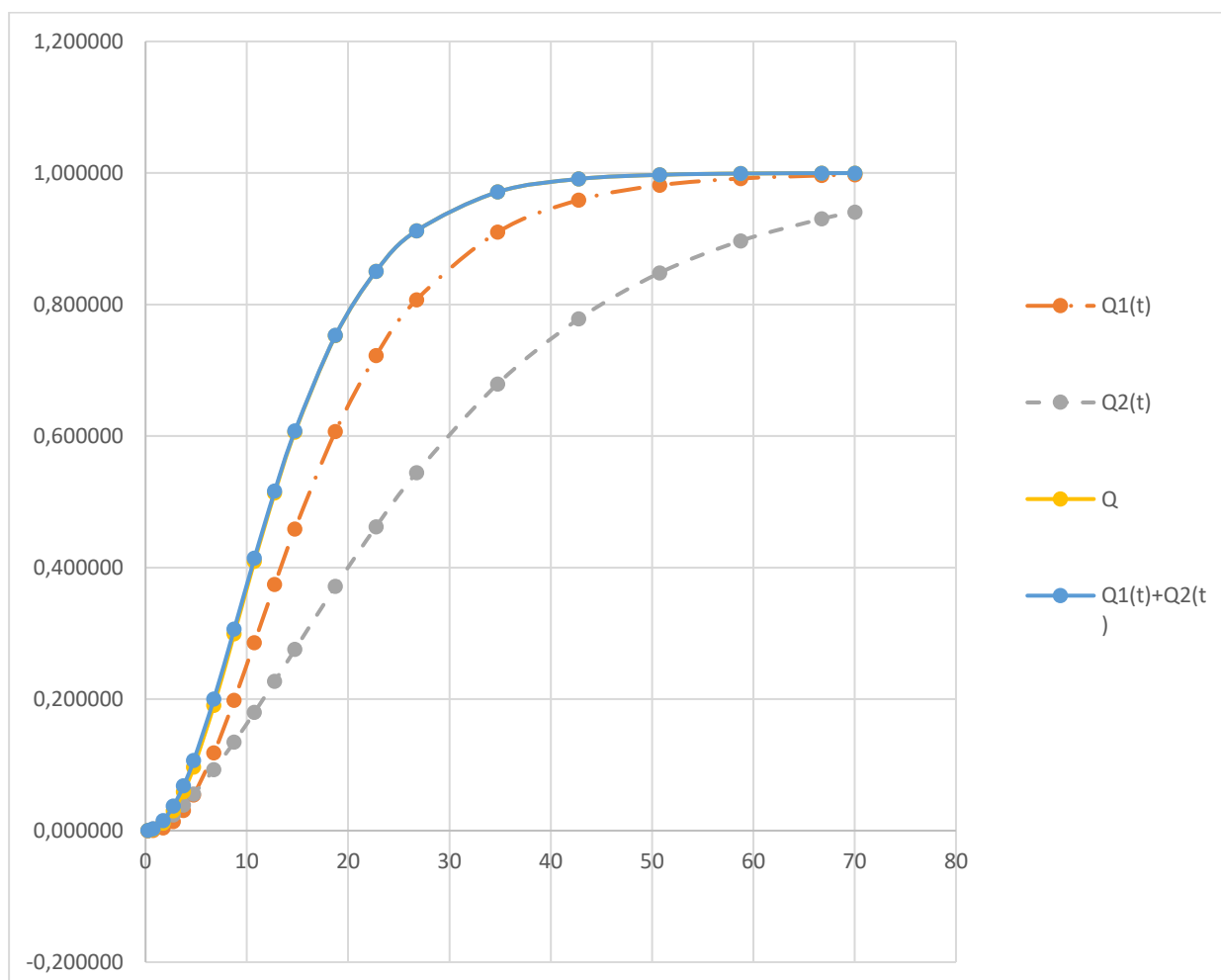


Рис. 2.12. Функції аварійності $Q1(t)$, $Q2(t)$ та ймовірність виникнення аварійної ситуації $Q(t)$ – {крива $Q1(t)+Q2(t)$ накрила криву $Q(t)$ }

За допомогою графічного редактора програми ReliaSoft BlockSim була побудована

структурна схема надійності аналогічна Рис. 2.7 і представлена на Рис. 2.13.

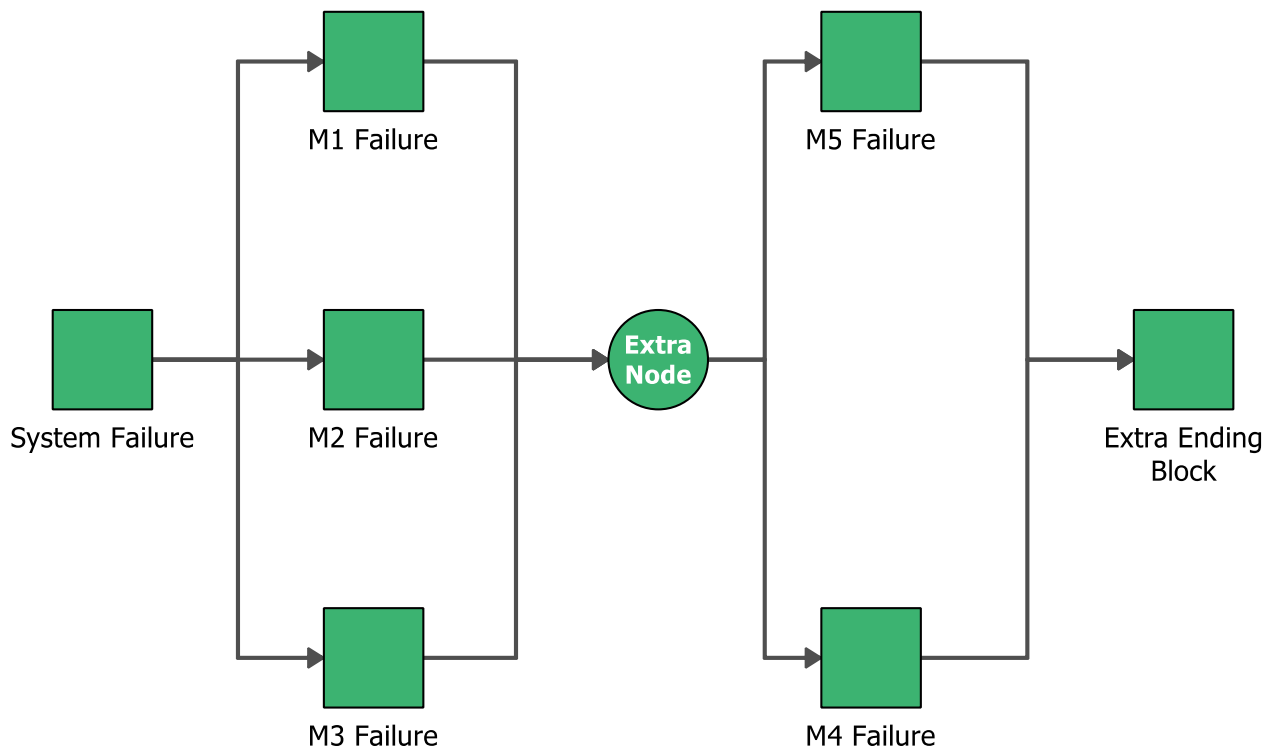


Рис. 2.13. Структурна схема надійності, отримана в ReliaSoft BlockSim

Наступним етапом валідації було перетворення структурної схеми надійності засобами ReliaSoft BlockSim в дерево відмов, яке представлено на Рис. 2.14.

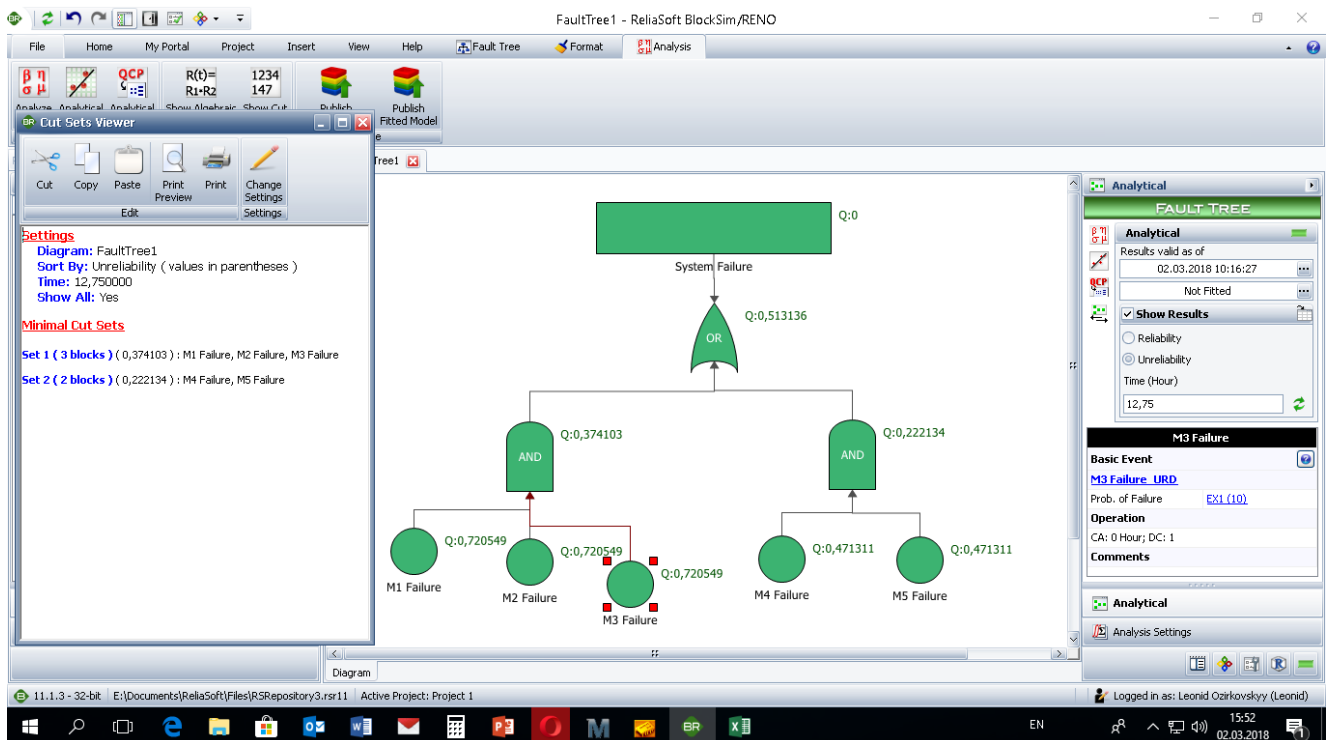


Рис. 2.14. Дерево відмов

Для даного ДВ засобами ReliaSoft BlockSim було знайдено мінімальні січення,

обчислено ймовірності їх виникнення в ті ж самі моменти часу, що й функції аварійності і здійснено порівняння результатів. Як видно з Рис. 2.15 значення функції аварійності $Q1(t)$ та значення мінімальних січень $MCS1fta$ повністю співпали. Аналогічно співпали значення функції аварійності $Q2(t)$ та значення мінімальних січень $MCS2fta$.

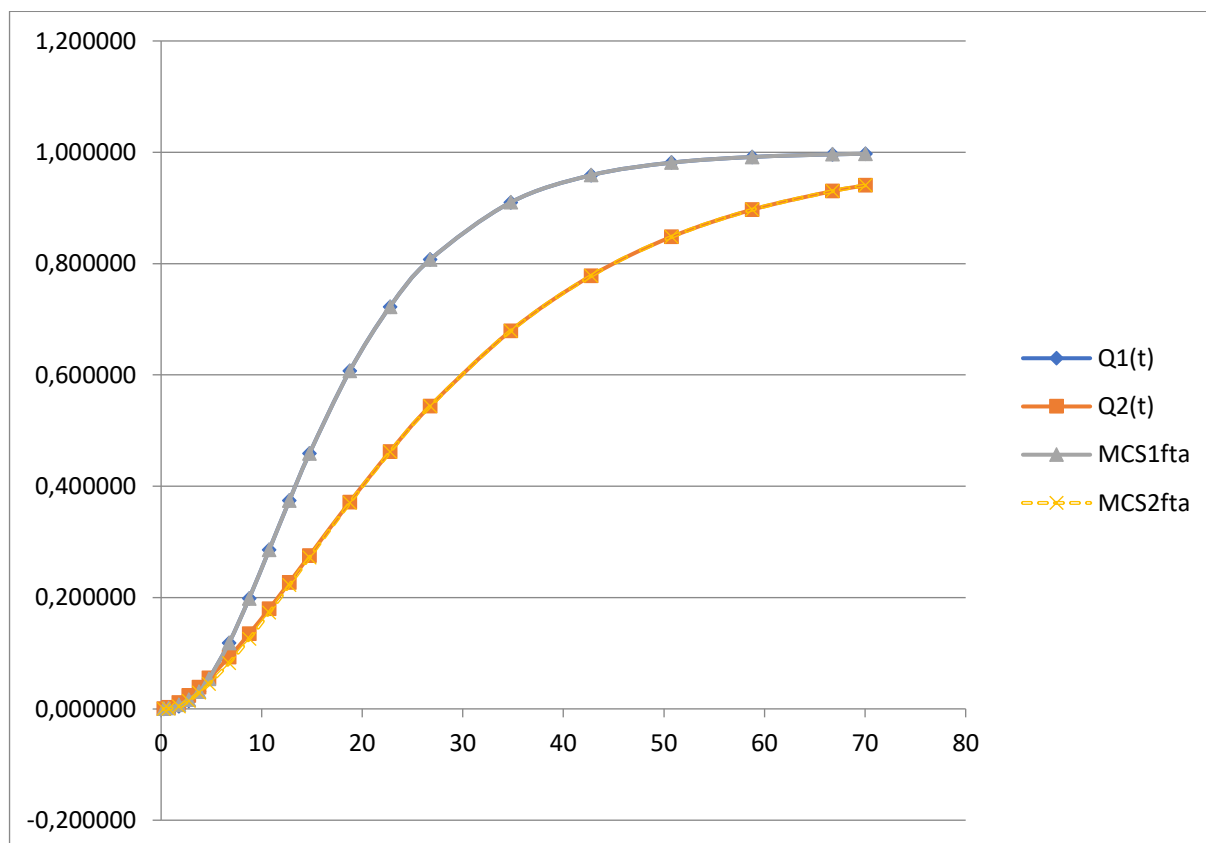


Рис. 2.15. Значення функції аварійності $Q1(t)$ та $Q2(t)$ та значення мінімальних січень $MCS1fta$ та $MCS2fta$.

На основі проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

- 1) розроблені методи і методики дають достовірні результати;
- 2) показники безпеки об'єкта дослідження (проектування), які досі отримують на основі розробленого дерева відмов, можна отримувати за допомогою моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів і переходів.

Висновки до розділу 2

1. Для подолання протиріччя між введенням засобів забезпечення безпечності і зниженням надійності РЕСВП розроблено принципи побудови комплексної моделі у вигляді графа станів і переходів, з якої можна отримати як показники надійності так і показники безпечності. Для цього введено нову класифікацію непрацездатних станів, що дало змогу отримати з графу станів і переходів мінімальні січення без побудови дерева відмов. Також з цього ж графу станів і переходів можна отримати і показники надійності.
2. Для практичної побудови комплексної моделі РЕСВП у вигляді графа станів і переходів розроблено новий метод визначення непрацездатних безпечних станів, критичних та катастрофічних станів. В основі методу лежить узагальнена структура вектора з бінарним описом надійності кожного модуля РЕСВП та додатковим описом його особливостей: технічного обслуговування; надійнісної поведінки; роботи засобів контролю, діагностики та комутації.
3. Для кількісного оцінювання впливу надійності на безпечність і навпаки введено поняття функції аварійності. Значення функції аварійності в кожен конкретний момент часу співпадають із значеннями ймовірності мінімального січення, отриманого для того ж самого моменту часу. Таким чином з комплексної моделі у вигляді графа станів і переходів можна отримати залежність ймовірності існування мінімальних січень від часу або ймовірність існування мінімального січення для визначеного моменту часу без побудови дерева відмов. Для вибору непрацездатних станів, які формують вираз функції аварійності введено поняття маски аварійності.
4. Модернізація бінарної структурно-автоматної моделі дало змогу за допомогою програмного забезпечення ASNA автоматизовано отримати функції аварійності з підпростору непрацездатних станів. Це дає змогу здійснювати багатоваріантний аналіз безпечності РЕСВП без надмірних затрат часу, що є визначальним для системотехнічного етапу проектування. При порівнянні з традиційними методиками аналізу безпечності затрати часу на отримання показників функціональної безпечності для одного варіанту системи є

співмірними. Однак, якщо необхідно модернізувати хоча б один з таких компонентів РЕСВП таких як структура, алгоритм поведінки чи стратегія технічного обслуговування, то розроблені методи дають вигоду у від 1,8 разів по затратах часу на кожен новий на варіант аналізу.

5. На основі розроблених методів та моделей створено методику синтезу структури РЕСВП із заданим рівнем безпечності, яка дає змогу: провести аналіз відмов та можливих наслідків складових РЕСВП; побудувати бінарну структурно-автоматну модель для автоматизованого визначення ймовірностей виникнення мінімальних січень РЕСВП; визначити рівень ризику експлуатації та значення коефіцієнта ризику експлуатації РЕСВП. Особливістю методики є те, що повторне оцінювання ризику експлуатації РЕСВП для кількісного підтвердження рекомендацій із зменшення рівня ризику займає на 80-90% менше часу ніж в існуючих методиках.
6. Для візуалізації результатів аналізу безпечності розроблено метод отримання оптимізованого дерева відмов на основі функцій аварійності, що дозволяє, на відміну від звичайного дерева відмов та динамічного дерева відмов врахувати вплив засобів контролю діагностики та комутації, особливості обмеженої кількості відновлень РЕСВП, реконфігурацію відмовостійкої структури тощо. Не врахування цих особливостей призводить до зниження ймовірності появи аварійної ситуації у 8 – 10 разів.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, ЗАБЕЗПЕЧУЄ ЗАДАНИЙ РІВЕНЬ БЕЗПЕЧНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

На етапі експлуатації РЕСВП основним способом підтримування необхідного рівня безпеки є проведення технічного обслуговування системи. Технічне обслуговування (ТО) полягає, з одного боку, у проведенні відновлювальних робіт з усунення аварійних ситуацій, що виникли, а з іншого боку у проведенні заходів з метою попередження виникнення аварійних ситуацій. Послідовність та правила здійснення відновлювальних робіт формують стратегію ТО [108, 111]. Правильний вибір стратегії ТО дозволить досягнути заданого рівня безпеки і заданого рівня надійності РЕСВП.

Особливістю процесу експлуатації РЕСВП є те, що частина її підсистем та модулів, найбільш критичних з точки зору безпеки, постійно контролюються засобами моніторингу під час виконання системою завдання. У випадку появи відмов у таких підсистемах, під час застосування РЕСВП (виконання місії), вони усуваються засобами забезпечення відмовостійкості (резервним ресурсом). При відсутності чи вичерпанні резерву повне відновлення працездатності РЕСВП здійснюється після завершення застосування відповідними ремонтними службами. І наступного застосування можна вважати, що у РЕСВП всі явні відмови виявлені і усунуті, а ймовірність аварійної ситуації, спричиненої явною відмовою, на початок наступного застосування рівна нулю.

Інша частина підсистем і модулів РЕСВП, зокрема резервних, діагностуються один раз на декілька десятків, а в окремих випадках і сотень застосувань РЕСВП і порушення працездатності виявляються тільки ремонтними службами після закінчення заданої кількості застосувань на етапі проведення планового технічного обслуговування [69].

Отже, під час експлуатації РЕСВП в її підсистемах та модулях, з точки зору діагностування, можуть виникати два види відмов: явні (діагностовані) та приховані (недіагностовані). Явні відмови призводять до виникнення аварійної

ситуації і відповідно до катастрофічних наслідків, а приховані - знижують ефективність засобів відмовостійкості і зменшують запас безпечності системи. Приховані відмови до аварійної ситуації не призводять [69].

Таким чином, ТО радіоелектронних систем відповідального призначення передбачає проведення двох видів відновлювальних робіт[108, 111]:

1. Аварійно-відновлювальні роботи (АВР) – проводяться ремонтною бригадою відразу після застосування РЕСВП з метою усунення аварійних ситуацій, які спричинені явними відмовами в її підсистемах.
2. Планово-профілактичне обслуговування (ППО) – проводиться ремонтною бригадою згідно регламенту ТО з метою усунення прихованих відмов для зниження ймовірності виникнення аварійної ситуації РЕСВП під час виконання РЕСВП задачі.

Хоча, на сьогодні, існує ряд методик та моделей для інтегральної оцінки впливу прихованих та явних відмов на окремі показники функціональної безпечності, вони не дають змоги врахувати вплив на безпечність РЕСВП стратегії ТО в цілому. Відсутність таких методів та моделей не дає змоги порівняти окремі стратегії ТО між собою для синтезу кращої з точки зору безпечності, а також вибрати доцільні параметри конкретної стратегії (наприклад, періоди ТО) для її оптимізації за критерієм мінімального значення частоти потрапляння в аварійну ситуацію. Крім цього існуючі методи не дають змоги отримати достовірні значення ймовірностей появи мінімальних січень при наявності прихованих відмов, а це, в свою чергу, не дасть достовірно виявити слабкі місця в процедурах ТО радіоелектронної системи відповідального призначення.

3.1. Взаємодія ремонтної бригади з сервісним центром при проведенні аварійно-відновлювальних робіт

Аварійно відновлювальні роботи – вид робіт, які виконуються ремонтною бригадою з метою оперативного усунення аварійної ситуації в РЕСВП, що виникла внаслідок появи явної відмови. Усунення аварійної ситуації проводиться згідно чітко встановленого регламенту (правил), який представлено у вигляді схеми на

рисунку 3.1.

Підсистеми та модулі РЕСВП, які виконують цільову функцію перебувають під постійним контролем засобів моніторингу. Тому при появі відмови, яка призводить до втрати системою працездатності, відразу надходить інформація про виникнення на підконтрольній РЕСВП аварійної ситуації. За наявності невикористаного справного резерву він підключається замість основного модуля чи підсистеми і РЕСВП закінчує виконання місії. Після закінчення РЕСВП своєї місії вона потрапляє в сервісний центр, де здійснюється АВР.

При надходженні до ремонтної служби повідомлення, від системи моніторингу про виникнення аварійної ситуації в підсистемі РЕСВП ремонтна служба зобов'язана провести аналіз отриманої інформації про аварійну ситуацію. На основі аналізу інформації ремонтна бригада повинна визначити перелік та кількість необхідного обладнання і запчастин для проведення ремонту. На наступному кроці ремонтна бригада детально вивчає аварійну ситуацію, а саме, визначає причини її виникнення та створює повідомлення з висновками аналізу аварійної ситуації. Наступним кроком є усунення аварійної ситуації та її наслідків. Провівши всі необхідні відновлювальні роботи ремонтна бригада готує звіт про результати усунення аварійної ситуації.

В підсистемах РЕСВП, особливо резервних, можлива поява прихованих відмов. До прихованих відмов відносяться поступові відмови (дрейф параметрів елементів, старіння обладнання, розрегулювання режимів) та параметричні відмови. Ці відмови не приводять до аварійної ситуації, але при їх наявності ймовірність виникнення аварійної ситуації в системі зростає. Приховані відмови можливо виявити лише під час планово-профілактичного обслуговування РЕСВП або безпосередньо в сервісному центрі. Для виявлення та усунення прихованих відмов в підсистемах РЕСВП передбачено стратегія ТО проведення планово-профілактичного обслуговування.

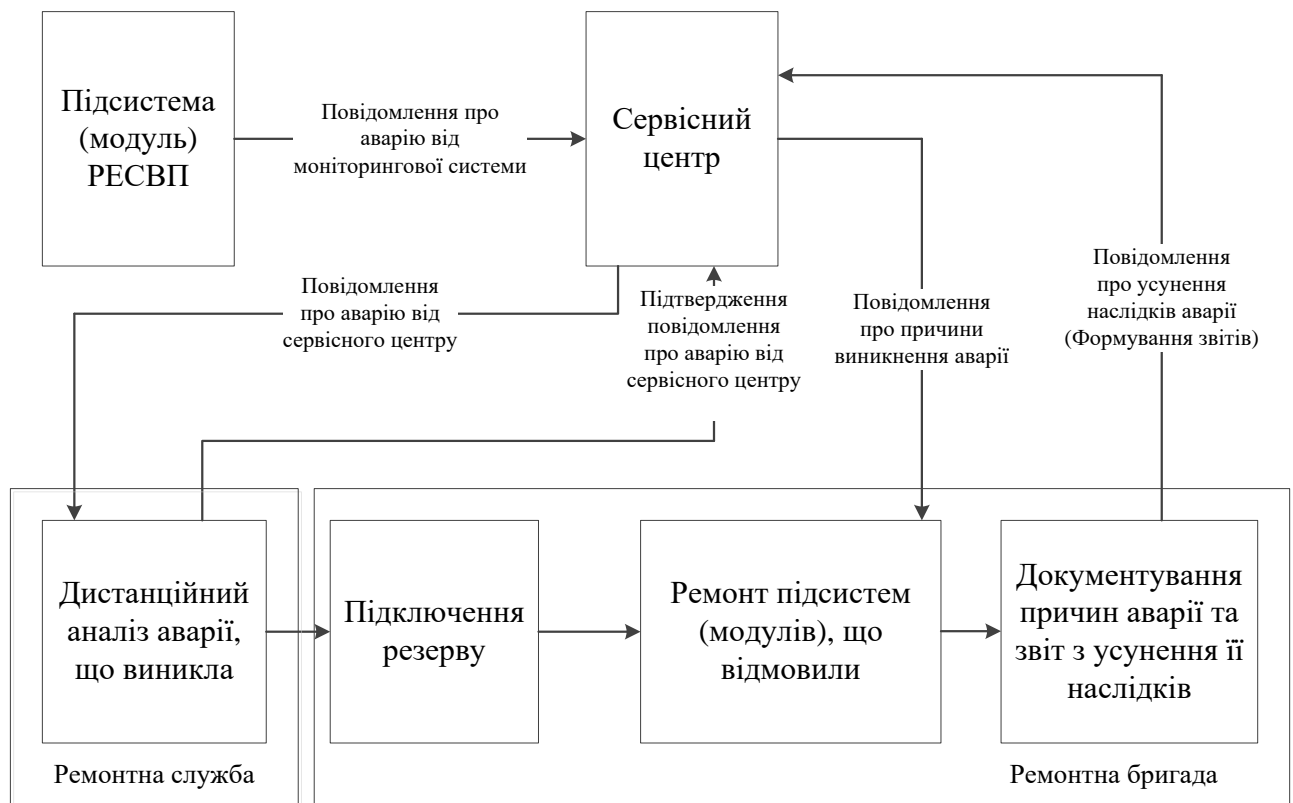


Рис. 3.1. Схеме взаємодії підрозділів ремонтної служби при виникненні аварійної ситуації, причиною якої є втрата працездатності РЕСВП

3.2. Взаємодія ремонтної бригади з сервісним центром при проведенні планово-профілактичного обслуговування планово-профілактичного обслуговування

Планово-профілактичне обслуговування (ППО) – вид робіт, які виконуються ремонтною службою з визначеною періодичністю з метою виявлення прихованих відмов та попередження виникнення потенційних несправностей систем (їх складових частин) та забезпечення безперервної працездатності та справного стану підсистем РЕСВП [111].

Планово–профілактичне обслуговування підсистем та модулів РЕСВП відбувається згідно графіку, який визначається технічними умовами та регламентами експлуатації обладнання. Початок проведення ППО визначається сервісним центром, керуючись відповідними регламентами на ППО.

В зазначений календарний термін ремонтна служба за заданий термін повинна провести ППО, яке включає в себе моніторинг прихованих відмов та проведення

ремонту підсистем РЕСВП.

На відміну від процедури проведення АВР при проведенні ППО відсутній неперервний моніторинг резервних підсистем і якщо основні системи не відмовляють, то наявність прихованих відмов виявляється тільки на етапі ППО.

При проведенні планово-профілактичного обслуговування РЕСВП, ремонтна бригада, у відповідності до встановлених нормами експлуатації термінів, проводить профілактичні роботи та перевірки. Після закінчення ППО однієї РЕСВП ремонтна бригада приступає до ППО наступної РЕСВП. Послідовність дій ремонтної служби при виникненні аварійної ситуації представлено у вигляді схеми 2.

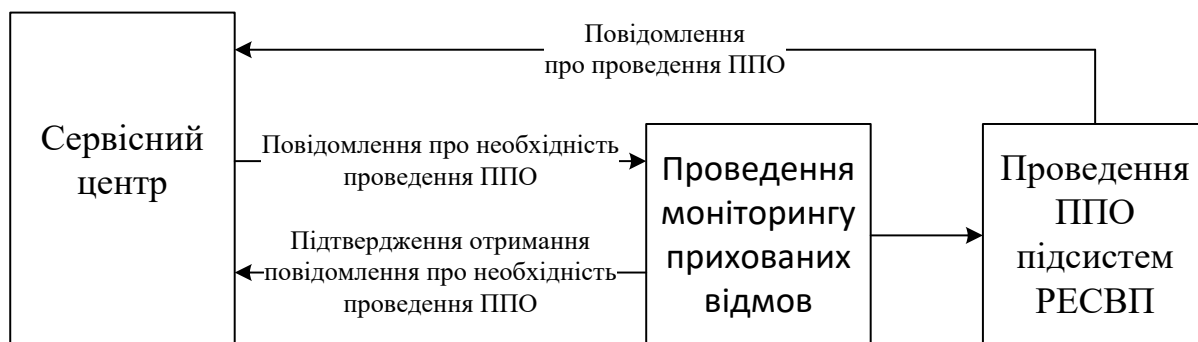


Рис. 3.2. Схема взаємодії ремонтної бригади з сервісним центром при проведенні планово-профілактичного обслуговування РЕСВП

3.3. Показники функціональної безпечності обслуговуваних радіоелектронної системи відповідального призначення

Для кількісної оцінки функціональної безпечності РЕСВП, в яких присутні явні та приховані відмови використовують наступні показники:

- Ймовірність виникнення аварійної ситуації – максимальне значення ймовірності настання аварії – Q_{max} [18].
- Середнє значення ймовірностей виникнення аварійної ситуації системи за одне застосування або за годину застосування - $Q_{сер}$ [69, 113].

Традиційно ці ймовірності визначають на основі дерев відмов. Для конкретної аварійної ситуації будують дерево відмов. На його основі записують функцію залежності ймовірності виникнення аварійної ситуації від базових подій нижнього рівня. Якщо безпосередньо з цієї функції знайти ймовірність виникнення аварійної

ситуації, то отримаємо її значення для найгіршого випадку - Q_{\max} [16, 113].

Середнє значення ймовірностей виникнення аварійної ситуації визначають виходячи з наступних міркувань. Поява явних відмов контролюються постійно і після закінчення чергового циклу застосування РЕСВП вони усуваються під час АВР. Тобто в момент закінчення інтервалу часу моніторингу явних відмов - $t_{\text{МЯ}}$. Цей інтервал часу, як правило дорівнює інтервалу часу застосування (місії) РЕСВП, бо після його закінчення ремонтна бригада приступає до АВР по усуненню причин явних відмов.

Перевірка на наявність прихованих відмов та їх усунення проводиться один раз раз в декілька десятків чи сотень застосувань - в момент закінчення інтервалу часу до моніторингу прихованих відмов - $t_{\text{МП}}$. По закінченні даного інтервалу часу ремонтна бригада приступає до ППО, під час якого мають бути виявлені та усунути всі приховані відмови.

При такій організації ТО кількість прихованих відмов, що виникають під час багатьох циклів застосувань РЕСВП, як правило, на порядок і більше ніжча ніж явних після такої ж кількості застосувань РЕСВП. Зауважимо, що ймовірність появи прихованої відмови на перших циклах застосування РЕСВП практично рівна нулю [113], а під кінець періоду моніторингу приховані відмови зростають і суттєво перевищують явні відмови (рис. 3.3) за рахунок того, що $t_{\text{МП}} \gg t_{\text{МЯ}}$.

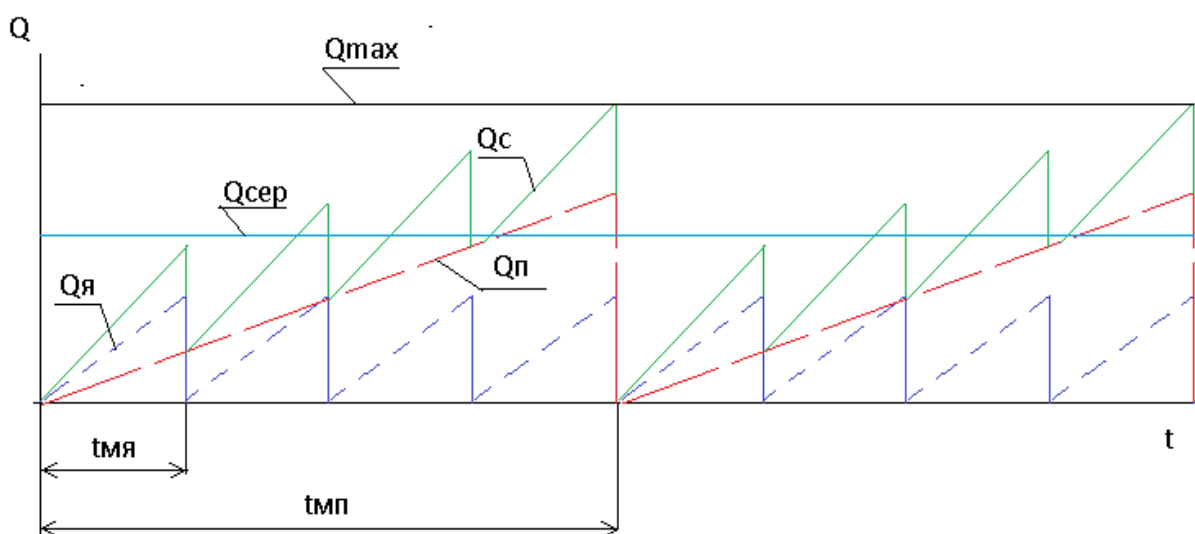


Рис.3.3. Визначення середнього значення ймовірності відмови РЕСВП у випадку появи явних і прихованих відмов

В останнє застосування РЕСВП на інтервалі, ймовірність появи прихованої відмови максимальна і відповідно ймовірність виникнення аварійної ситуації системи (Q_{\max}) є максимальними.

Однак, на весь період $t_{\text{мп}}$ середня ймовірність аварійної ситуації ($Q_{\text{сер}}$) суттєво нижча (від кількох разів до кількох порядків) максимальної. Різниця між Q_{\max} та $Q_{\text{сер}}$ зростає при зростанні інтервалу моніторингу прихованих відмов $t_{\text{мп}}$. Все вищесказане проілюстровано на рис. 3.3. Для визначення $Q_{\text{сер}}$ в [69, 113] запропоновано відповідну залежність:

$$Q_{\text{сер}}\{q_1, q_2, \dots, q_m\} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i\{q_1, q_2, \dots, q_m\}}{N}, \quad (3.1)$$

де Q_i – ймовірність відмови системи на i – му інтервалі моніторингу явної відмови,
 q_j – ймовірність відмови елемента базового (найнижчого) рівня,
 m – кількість елементів базового рівня,
 N – кількість інтервалів моніторингу явної відмови, які припадають на один інтервал моніторингу прихованої відмови.

3.4. Визначення середнього значення ймовірності виникнення аварійної ситуації через середні значення ймовірностей виникнення мінімальних січень

Для визначення середнього значення ймовірності аварійної ситуації існує залежність (3.1), однак мінімальні січення визначають за традиційними методиками [16, 18]. Справа в тому, що у випадку, коли мінімальне січення містить тільки приховані відмови, то його значення, за традиційними методиками, отримується завищеним. Для отримання значення наближеного до достовірного використовують коефіцієнти, які зменшують значення ймовірності виникнення мінімального січення. Однак гарантувати отримання достовірного значення у цьому випадку неможливо.

3.4.1. Метод визначення середнього значення ймовірності виникнення мінімального січення при наявності прихованих відмов

В даній роботі запропоновано визначати значення ймовірності виникнення мінімальних січень, виходячи з наступного твердження:

Середнє значення ймовірності виникнення аварії системи є сумою середніх значень ймовірностей існування мінімальних січень:

$$Q_{\text{сер}}\{q_1, q_2, \dots, q_m\} = \sum_{j=1}^K MCS_{\text{сер}j}\{q_1, q_2, \dots, q_f\}, \quad (3.2)$$

де K – кількість мінімальних січень,

f – кількість базових подій, що входять в j -те мінімальне січення

Справедливість такого твердження випливає з наступних міркувань:

- (I) ймовірність виникнення аварійної ситуації системи $Q\{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ знаходиться за логічною функцією (3.3), отриманою з дерева відмов. Аргументами цієї функції є ймовірності появи відмов елементів базового рівня q_i .

$$Q(x) = \bigwedge_{j=1}^L (V_{i=P_j} q_i), \quad (3.3)$$

де $x = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ – сукупність базових подій нижнього рівня;

P_j – кількість елементів АБО базового рівня, під'єднаних до j -го логічного елемента;

L – кількість елементів I ;

- (II) Мінімальні січення – це комбінації елементів базового рівня (диз'юнкції ймовірностей відмов), відмова яких є необхідною і достатньою умовою настання аварійної ситуації:

$$Q(x) = (x_1 \dots x_d) V(x_f \dots x_h) V \dots V(x_n \dots x_s), \quad (3.4)$$

Зауважимо, що мінімальні січення (3.4) отримуються шляхом мінімізації логічної функції дерева відмов (3.3) методами Булевої алгебри. З цього робимо висновок про те, що вираз (3.4) представляє дерево відмов, яке є еквівалентним початковому (3.3). Це еквівалентне дерево відмов, виходячи з визначення мінімального січення та виразу (3.4) містить всього два рівні (рис. 3.4): після події найвищого рівня (аварійної ситуації) знаходиться елемент АБО і до його входів

під'єднано елементи I або безпосередньо елементи базового (найнижчого) рівня. До входів елементів I під'єднано виключно елементи базового рівня. Елементи базового рівня, які під'єднані до j – го елемента I формують j – те мінімальне січення.

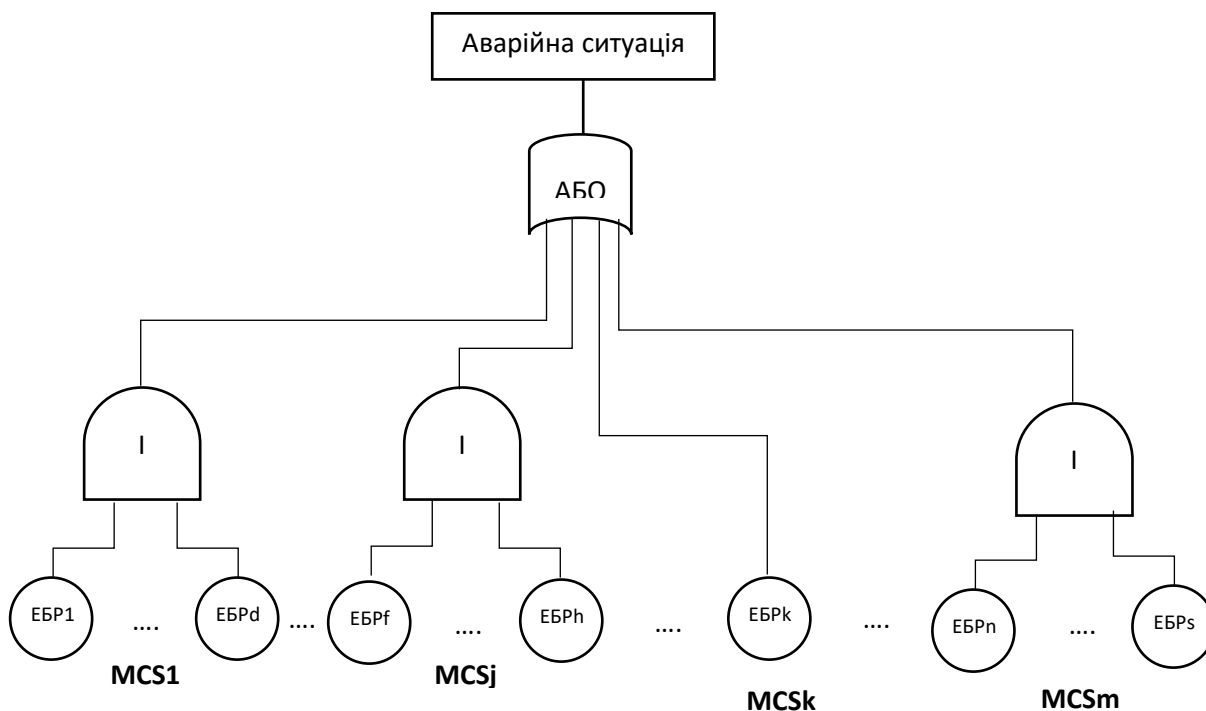


Рис.3.4. Еквівалентне дерево відмов

Таким чином з виразу (3.4) та з дерева відмов (рис. 3.4.) видно, що ймовірність аварійної ситуації знаходиться як сума значень ймовірностей виникнення мінімальних січень. Відповідно середнє значення ймовірності виникнення аварійної ситуації також буде дорівнювати сумі середніх значень ймовірностей виникнення мінімальних січень:

$$Q_{сер}(x) = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i(x)}{N} = \sum_{j=1}^K MCS_{серj}\{y\}, \quad (3.5)$$

де $y = \{q_1, q_2, \dots, q_f\}$ – елементи базового рівня, які входять в j-те мінімальне січення, f – кількість елементів, що входить в j-те мінімальне січення

$MCS_{серj}(y)$ – середнє значення ймовірності виникнення мінімального січення,

яке визначається за формулою:

$$MCS_{сер}(y) = \frac{\sum_{i=1}^N ((Le_1 \cdot t_{мя}) \cdot \dots \cdot (Le_k \cdot t_{мя}) \cdot (Ll_1 \cdot t_{мп_i}) \cdot \dots \cdot (Llr \cdot t_{мп_i}))}{N}, \quad (3.6)$$

де Le_k - інтенсивність появи явної k -ї відмови;

Ll_r - інтенсивність r -ї прихованої відмови;

$t_{мя}$ - інтервал часу від початку чергового застосування РЕСВП до моменту появи явної відмови явної відмови (час застосування РЕСВП);

$t_{мп}$ - інтервал часу від попереднього планового ТО до моменту наступного чергового ТО згідно плану прихованої відмови;

i - i -те застосування (місія) РЕСВП;

$N = T_{ин} / t_m$ - кількість застосувань РЕСВП, що припадає на один інтервал моніторингу прихованої відмови;

$Le \cdot t_{мя}$ - ймовірність настання i -ї явної відмови;

$Ll \cdot t_{мп}$, - ймовірність настання i -ї прихованої відмови.

Після підстановки виразу (3.6) у вираз (3.5) остаточний вираз для визначення середнього значення ймовірності настання мінімального січення буде мати вигляд:

$$Q_{сер}(x) = \sum_{j=1}^Q \frac{\sum_{i=1}^N ((Le_1 \cdot t_{мя}) \cdot \dots \cdot (Le_k \cdot t_{мя}) \cdot (Ll_1 \cdot t_{мп_i}) \cdot \dots \cdot (Llr \cdot t_{мп_i}))_j}{N} \quad (3.7)$$

3.4.2. Валідація методу

Валідацію удосконаленого методу здійснено на прикладі оцінювання показника безпечності – середнього значення ймовірності виникнення аварійної ситуації при експлуатації безпілотного літального апарату (БПЛА) з резервованим каналом командної радіолінії. Зауважимо, що канал командної радіолінії відноситься до радіоелектронних систем відповідального призначення (РЕСВП). Тому для нього передбачено резервний канал, який перебуває в гарячому стані. В склад командної радіолінії входять прийомач робочої конфігурації та резервний прийомач. Приймач робочої конфігурації контролюється перед кожним польотом. Якщо цей прийомач вийшов з ладу, в польоті замість основного каналу командної

радіолінії підключається резервний канал. Після підключення резервного радіоканалу, в основному каналі радіолінії відбудеться перемикання з несправного приймача на резервний приймач. Тобто на борту БпЛА. Резервний канал командної радіолінії, якщо він не підключався, перевіряється один раз на 1000 польотів під час ППО. Після закінчення польоту, тривалість якого складає 1 година здійснюється АВР. під час якої здійснюється повна заміна усіх несправних модулів.

Дерево відмов для резервованої командної радіолінії зображено на рис. 3.5. Оцінювання середнього значення ймовірності виникнення аварійної ситуації виконано в MathCAD ймовірності виникнення (3.2), (3.5) – (3.7). Результати представлено далі.

Розрахунки було здійснено при наступних вхідних даних:

$L_e = 0,0001 \text{ год}^{-1}$ – інтенсивність явних відмов основного приймача в каналі 1 та в каналі 2.

$L_l = 0,00001 \text{ год}^{-1}$ – інтенсивність прихованих відмов основного приймача в каналах 1 та 2

$N = 1000$ – кількість застосувань БпЛА на інтервалі моніторингу прихованих відмов - $T_{\text{ППО}}$

$i := 1..N$ Номер поточного польоту. Тривалість польоту t становить 1 год.

Ймовірності появи явної та прихованої відмови в даному випадку розраховуються за формулою $P_{\text{відмови}}(t) = L * t$. Згідно [70] дана формула справедлива для випадку, якщо інтенсивність відмови не перевищує 10^{-4} год^{-1} . Якщо інтенсивності відмов перевищують 10^{-3} год^{-1} , то використовують формулу $P_{\text{відмови}}(t) = 1 - e^{-L * t}$

$P_{e_i} = L_e * t = L_e * 1$ – ймовірність появи явної відмови основного приймача під час i -го польоту БпЛА.

$P_{l_i} = L_l * i$ – ймовірність появи прихованої відмови під час i -го польоту

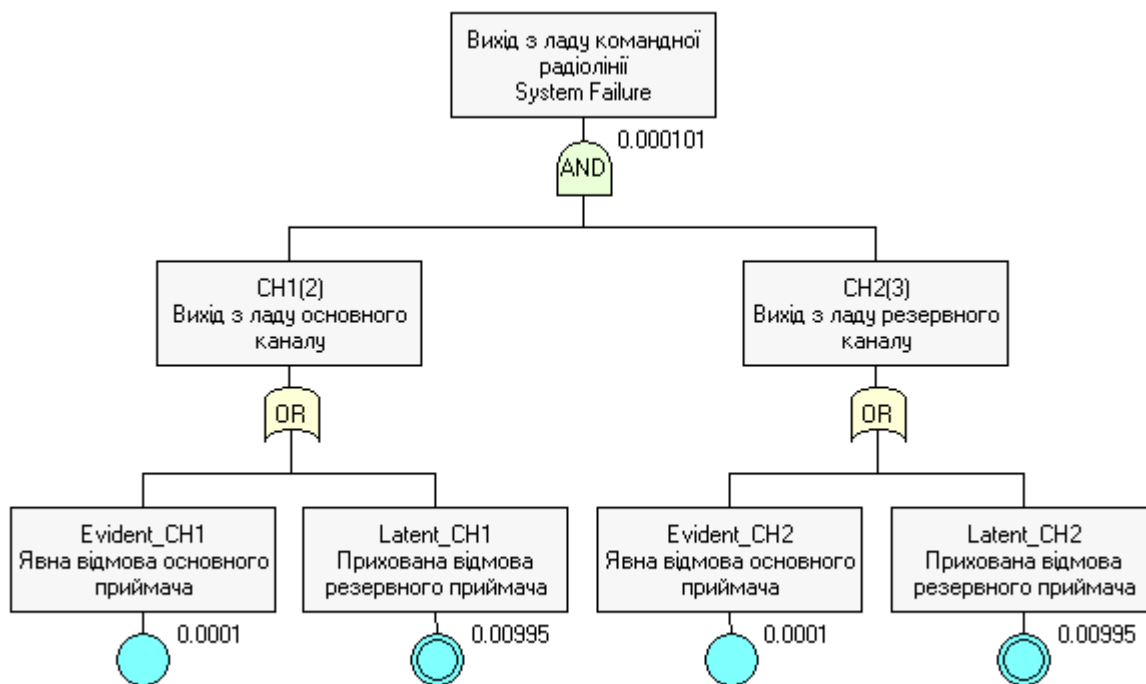


Рис.3.5. Дерево відмов резервованої командної радіолінії безпілотної літального апарату

Вирази, згідно [16, 18], для розрахунку мінімальних січень для і-го польоту БПЛА, представлено нижче:

$$MCS1_i := (Le-1) \cdot (Le-1) \quad MCS2_i := (Le-1) \cdot \frac{(Lfi)}{2} \quad MCS3_i := (Lfi) \cdot \frac{(Le-1)}{2} \quad MCS4_i := \frac{(Lfi)}{2} \cdot \frac{(Lfi)}{2}$$

Мінімальне січення MCS1 містить тільки явні відмови, мінімальні січення – MCS2 та MCS3 містять по одній явній та по одній прихованій відмові, а мінімальне січення MCS4 містить дві приховані відмови. Кількісні значення ймовірностей виникнення цих мінімальних січень, розраховано в RAM Commander і наведено на рис.3.6.

N	Q(mean)	%	Order	Event 1	Event 2
1	9.90058e-005	98.0	2	Latent_CH1	Latent_CH2
2	9.94967e-007	1.0	2	Evident_CH1	Latent_CH2
3	9.94967e-007	1.0	2	Evident_CH2	Latent_CH1
4	9.999e-009	0.0	2	Evident_CH1	Evident_CH2

Рис. 3.6. Мінімальні січення розраховані за допомогою RAM Commander

Згідно (3.6) розраховано середні значення ймовірностей виникнення мінімальних січень:

$$MCS1 := \frac{\sum_{i=1}^N MCS1_i}{N} = 10 \times 10^{-9}$$

$$MCS2 := \frac{\sum_{i=1}^N MCS2_i}{N} = 2.503 \times 10^{-7}$$

$$MCS3 := \frac{\sum_{i=1}^N MCS3_i}{N} = 2.503 \times 10^{-7}$$

$$MCS4 := \frac{\sum_{i=1}^N MCS4_i}{N} = 8.346 \times 10^{-6}$$

За результатами розрахунку видно, що середні значення ймовірності виникнення мінімального січення, яке містить дві явні відмови, розрахованого в RAM Commander (рядок 4 рис.3.6) та середні значення ймовірності виникнення мінімального січення MCS1 порахованого за формулою (3.6) співпадають. Середні значення ймовірностей виникнення мінімальних січень, які містять одну явну та одну приховану відмову розраховані в RAM Commander (рядки 2, 3 табл. 1) та середні значення ймовірностей виникнення мінімальних січень MCS2, MCS3 порахованих за формулою (3.6) відрізняються в 3,9 рази, причому RAM Commander дає завищені значення цих ймовірностей. Середні значення ймовірностей виникнення мінімальних січень, які містять дві приховані відмови розраховані в RAM Commander (рядок 1 рис.3.6) та середні значення ймовірності виникнення мінімального січення MCS4 розрахованого за формулою (3.6) відрізняються на два порядки (в 107,9 рази), причому RAM Commander дає суттєво завищене значення ймовірності виникнення мінімального січення.

Середні значення ймовірності виникнення аварійної ситуації згідно (3.6), приведено нижче:

$$P_{average_MCS} := MCS1 + MCS2 + MCS3 + MCS4 = 8.856 \times 10^{-6}$$

Середні значення ймовірності появи аварійної ситуації розраховане згідно (3.1):

$$P_{\text{average}} := \frac{\sum_{i=1}^N P_{\text{top_event}_i}}{N} = 8.856 \times 10^{-6}$$

Порівняння середніх значень ймовірностей P_{average} та $P_{\text{average_MCS}}$ показує, що їх значення повністю збігаються. Отже твердження, що *середнє значення ймовірності появи аварії системи є сумою середніх значень ймовірностей існування мінімальних січень* та вираз (3.6) можна вважати правильними.

Середнє значення ймовірності мінімального січення, за умови наявності прихованих відмов, отримане за запропонованою методикою має вищу достовірність ніж отримане відомим методом, реалізованим в сучасному програмному забезпеченні: RAM Commander, ReliaSoft BlockSim тощо. Це пояснюється тим, що у відомому методі ймовірність появи аварійної ситуації та ймовірність виникнення мінімального січення рахується для найгіршого випадку. Найгірший випадок – це останнє застосування РЕСВП на момент закінчення інтервалу моніторингу прихованих відмов $T_{\text{ППО}}$, коли ймовірність появи аварійної ситуації є максимальною. Запропонована методика враховує те, що на перших застосуваннях РЕСВП, при $t < T_{\text{ППО}}$ ймовірність появи прихованої відмови близька до нуля, а у наступні застосування цієї ж РЕСВП зростає і досягає максимуму в останнє її застосування.

Середні значення ймовірності виникнення мінімальних січень, що містять тільки приховані відмови, відрізняються від ймовірностей, отриманих відомим методом [69, 113] від кількох разів до кількох порядків. І ця різниця буде зростати при збільшенні інтервалу ППО - $T_{\text{ППО}}$, та при зростанні різниці між $T_{\text{АВР}}$ і $T_{\text{ППО}}$.

Отримані результати також підтверджують гіпотезу про те, що за наявності явних та прихованих відмов, явні відмови вносять однаковий вклад у появу аварійних ситуацій при кожному застосуванні РЕСВП і на початку інтервалу $T_{\text{ППО}}$ суттєво перевищують приховані відмови. Приховані відмови на початкових застосуваннях РЕСВП практично рівні нулю, а коли $t > 0,5T_{\text{ППО}}$ вплив прихованих відмов зростає і під кінець інтервалу моніторингу він стає домінуючим.

3.5. Представлення процесу технічного обслуговування радіоелектронних систем відповідального призначення у вигляді моделі системи масового обслуговування

В попередньому параграфі запропоновано метод отримання достовірних значень ймовірності появи мінімальних січень та середнього значення ймовірності виникнення аварійної ситуації. Однак знання цих показників не дає змоги синтезувати стратегію ТО, яка б мінімізувала значення ймовірності виникнення аварії в залежності від тривалості періодичності ТО. Для цього необхідно мати залежності ймовірності появи мінімальних січень та середнього значення ймовірності виникнення аварійної ситуації від часу. А модель об'єкта відмов не призначена для отримання таких залежностей.

Необхідні залежності від часу можна отримати з функцій аварійності на основі розробленого графа оскільки значення функції аварійності для інтервалу часу що розглядається, дорівнює значенню ймовірності появи мінімального січення для цього ж інтервалу. Разом з цим модель у вигляді графа станів і переходів, в якій адекватно відображено процес ТО, дає змогу отримати значення ймовірності відмови РЕСВП і це значення буде близьке до середнього значення ймовірності виникнення аварійної ситуації за одне застосування системи, отримане з моделі у вигляді дерева відмов. Однак на відміну від результату, отриманого з моделі - у вигляді дерева відмов результат отриманий з моделі у вигляді графу станів і переходів буде більш достовірним. Це твердження базується на тому, що в моделі у вигляді графа станів і переходів можна адекватно відобразити всі процедури ТО, чого не можна в принципі відобразити в моделі у вигляді дерева відмов. Це пояснюється тим, що модель дерева відмов, яка є основним інструментом кількісної оцінки безпечності, не передбачають врахування повелінки системи при проведенні АВР та ППО, а лише оцінюють ймовірність виникнення аварійної ситуації на момент закінчення відповідного інтервалу часу. Це може бути або на момент закінчення інтервалу часу до чергового виявлення прихованих відмов, або на момент закінчення чергового застосування РЕСВП за наявності явної відмови.

Можливість оцінювати (отримувати) залежність показників безпеки від часу (тривалості експлуатації) всередині цих інтервалів з використанням моделей у вигляді дерев відмов, дерев подій, динамічних дерев відмов та схеми бінарних рішень відсутня. Крім цього вищезазначені моделі передбачають ручну їх побудову, що для РЕСВП вимагає великих затрат часу з одного боку та призводить до помилок з іншого боку. Причому такі помилки практично неможливо виправити.

Тому, для адекватного представлення в моделі процесу ТО на етапі експлуатації та впливу типу стратегії ТО на показники безпеки та готовності РЕСВП, в даній роботі запропоновано використати метод простору станів з бінарним описом простору станів та метод розділення станів, які показані в Розділі 2. Для того щоб з необхідним ступенем адекватності відобразити процес ТО підсистем та модулів РЕСВП у вигляді графа станів і переходів, спочатку потрібно розробити модель у вигляді системи масового обслуговування.

Розроблена модель процесу ТО радіоелектронної системи відповідального призначення, який включає АВР та ППО, у вигляді системи масового обслуговування (СМО), представлено на рис. 3.7. Дана модель у вигляді СМО повністю відображає послідовність дій ремонтної бригади при виконанні АВР та ППО, які представлені на рис. 3.1 та на рис. 3.2. В запропонованій моделі на відміну від існуючих, враховано те, що АВР та ППО відображено без будь-яких спрощень, детально відображені всі етапи виконання відновлювальних робіт ремонтною бригадою, та враховано наявність прихованих відмов як під час застосування РЕСВП так і до застосування, коли приховані відмови виникають на етапі зберігання РЕСВП.

Розроблена СМО складається з трьох черг заявок та каналу обслуговування (КО). В першій черзі – заявки на проведення ППО. В другій черзі – заявки на усунення прихованих відмов. В третій черзі заявки на проведення АВР, тобто усунення явних відмов. Канал обслуговування є спільним для всіх трьох черг заявок.

Черга заявок на проведення ППО відображає підсистеми та модулі РЕСВП, на яких необхідно провести обслуговування. Максимальна довжина черги

визначається кількістю РЕСВП, які перебувають на обслуговуванні однієї ремонтної бригади.

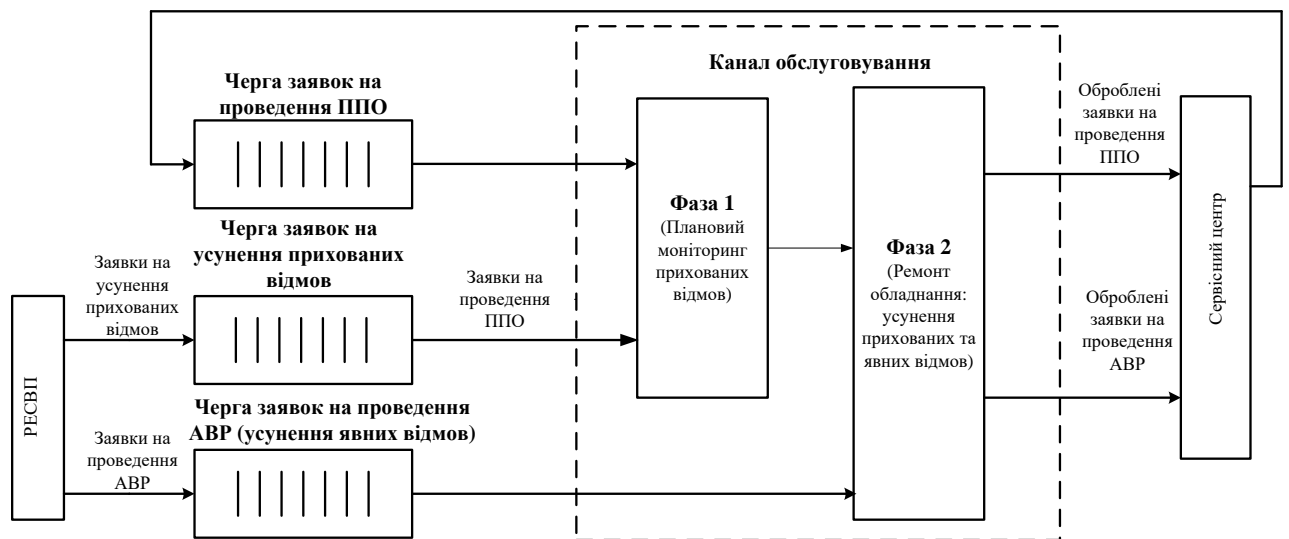


Рис. 3.7. Модель процесу технічного обслуговування сукупності РЕСВП, які функціонують одночасно, у вигляді системи масового обслуговування з трьома чергами та одноканальним багатозафазним обслуговуванням

Довжина черги заявок на усунення прихованих відмов дорівнює поточній кількості РЕСВП, в яких виникли приховані відмови.

Довжина черги заявок на проведення АВР дорівнює поточній кількості аварійних ситуацій, які виникли в РЕСВП.

Процес проведення ППО і АВР, в запропонованій моделі, представлено КО з багатозафазним обслуговуванням, кожна фаза якого відображає відповідний етап проведення відновлювальних робіт:

Обслуговування заявки на проведення ППО. В початковий момент часу черга заявок на проведення АВР є порожньою, а черга заявок на проведення ППО є заповненою. Якщо в усіх РЕСВП, які перебувають на обслуговуванні однієї ремонтної бригади, відсутні аварійні ситуації, перша заявка з черги заявок на ППО надходить в КО на обслуговування. Після завершення обслуговування першої заявки може початися обслуговування наступної. Одночасне обслуговування декількох заявок є неможливим.

Заявки на проведення АВР мають вищий пріоритет ніж заявки на ППО. Тому, якщо під час обслуговування заявки на ППО надходить заявка на АВР, то обслуговування заявки на ППО припиняється і починається обслуговування заявки на АВР. Після завершення обслуговування заявки на АВР канал обслуговування починає обслуговувати ту заявку на ППО, обслуговування, якої було перервано заявкою на ППО.

Обслуговування заявки на проведення АВР. Як вже було сказано вище, в початковий момент часу $t=0$ черга заявок на АВР є порожньою. З моменту $t>0$ починають надходити заявки на АВР. Інтенсивність надходження цих заявок λ дорівнює інтенсивності виникнення аварійних ситуацій в РЕСВП. Оскільки КО є спільним для всіх трьох черг заявок і якщо він вільний, то починається обслуговування заявки на АВР. Якщо в момент приходу заявки на АВР канал обслуговування здійснював обслуговування заявки на ППО, то обслуговування переривається і починається обслуговування заявки на АВР. Якщо під час обслуговування заявки на АВР приходить ще одна заявка на АВР, то вона стає в чергу заявок на проведення АВР.

Обслуговування заявок на усунення прихованих відмов. В початковий момент часу $t=0$ черга заявок на усунення прихованих відмов є порожньою. Заявки в чергу на усунення прихованих відмов приходять з інтенсивністю $\lambda_{пр}$. Виявлення та усунення прихованої відмови можливе лише у випадку обслуговування заявок на проведення ППО. При проведенні ППО прихованих відмов може не бути (це справедливо для випадку коли період ППО є меншим ніж величина $1/\lambda_{пр}$). З огляду на це тривалість обслуговування заявки на усунення прихованих відмов буде рівна нулю. Якщо період проведення ППО є більшим ніж величина $1/\lambda_{пр}$, то тривалість обслуговування заявки на усунення прихованих відмов буде рівна сумі тривалості виявлення такої відмови та тривалості проведення ремонту.

Процедура обслуговування заявок в каналі обслуговування. Канал обслуговування здійснює обслуговування заявок з трьох черг: на проведення АВР; на проведення ППО та на проведення усунення прихованих відмов. Обслуговування заявок на проведення ППО та усунення прихованих відмов

здійснюється в дві фази, заявки на АВР обслуговуються за одну фазу.

Перша фаза обслуговування заявок ППО в КО відображає процес планового моніторингу з виявлення прихованих відмов. Тривалість перебування заявки на цій фазі обслуговування визначається середнім часом, що витрачає ремонтна бригада для того щоб здійснити процедури планового моніторингу: контролю, діагностування та виявлення прихованих відмов – Тм.

Друга фаза обслуговування заявок ППО в КО відображає процес проведення відновлювальних (ремонтних) робіт в модулях та підсистемах РЕСВП. Тривалість перебування заявки на другій фазі визначається середнім часом проведення відновлювальних робіт підсистеми РЕСВП - Тппо.

Фаза АВР відображає процес усунення явних відмов. Оскільки явні відмови, що призвели до аварійної ситуації вже виявлені засобами контролю та діагностики і ремонтна бригада приступає безпосередньо до ремонтних робіт з усунення аварійної ситуації, тому проведення АВР здійснюється за одну фазу. Середня тривалість перебування у цій фазі визначається середнім часом проведення відновлювальних робіт підсистеми РЕСВП - Тавр.

Підчас розроблення математичної моделі процесу ТО підсистем та модулів РЕСВП було прийнято ряд припущень:

Вважається, що тривалості всіх процесів, які протікають в запропонованій СМО є випадковими величинами з експоненційним законом розподілу. Така умова виникає в зв'язку з використанням математичного апарату теорії марковських випадкових процесів і обґрунтовується ДСТУ 2862-94 Надійність техніки. Методи розрахунків показників надійності. Загальні вимоги.

Вважається, що всі підсистеми і модулі РЕСВП мають однаковий пріоритет на ремонт. Таке допущення дає можливість здійснювати розрахунок показників надійності РЕСВП, в склад якої входить велика кількість підсистем, та показників ефективності стратегії ТО на основі моделювання процесу ТО групи РЕСВП, які знаходяться на обслуговуванні одної ремонтної бригади.

3.6. Методика синтезу моделі стратегії технічного обслуговування групи РЕСВП у вигляді системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена

В розглянутих в Розділі 1 роботах, присвячених побудові моделей СМО, не виявлено аналітичних моделей, які б відповідали розробленій СМО (рис. 3.7) з трьома чергами та багатофазним каналом обслуговування. Тому для запропонованої СМО (рис. 3.7) необхідно здійснити побудову математичної моделі та здійснити компонування формул для визначення показників безпечності та готовності РЕСВП. Розроблення математичної моделі стратегії ТО, представленої СМО, здійснено як дискретно-неперервна стохастична система [102]. Математичним представленням такої моделі є система диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена. Розв'язання цієї системи рівнянь дає розподіл ймовірностей перебування РЕСВП у кожному з станів. Ймовірності перебування РЕСВП у відповідних станах покладені в основу формул для визначення значень показників її безпечності та готовності. Для отримання системи диференційних рівнянь необхідно здійснити розроблення графа станів та переходів, який відображає всі можливі варіанти існування об'єкта дослідження.

Основною проблемою, яка виникає під час розроблення графа станів та переходів, є значне зростання простору станів при врахуванні всіх особливостей структури досліджуваної системи, її поведінки після появи відмови та детальному розгляді процесів ТО, які протікають в цій системі. Велика розмірність простору станів значно ускладнює його процес аналізу, а ручна побудова може привести до внесення помилок. В багатьох роботах [124 – 129] та [131, 226 – 229] при побудові та аналізі графа станів та переходів здійснюють укрупнення станів, що дозволяє спростити його процес аналізу, проте таке укрупнення знижує адекватність моделі та призводить до зменшення достовірності отриманих результатів.

В роботі [102] запропоновано технологію побудови моделей поведінки дискретно-неперервних стохастичних систем (ДНСС), яка в поєднанні з програмним модулем ASNA [103, 231, 232] дає змогу здійснювати автоматизовану побудову графа станів та переходів для різних варіантів технічних рішень для

об'єкта дослідження. Використання технології [102] передбачає виконання наступних етапів: формування вербальної моделі, розробка структурно-автоматної моделі, формування необхідних показників ефективності на основі значень ймовірностей перебування системи в кожному стані. Кожний з цих етапів є окремою технічною задачею.

3.6.1. Розроблення структурно-автоматної моделі стратегії технічного обслуговування радіоелектронної системи відповідального призначення з врахуванням виникнення аварійних ситуацій, спричинених явними та прихованими відмовами

Розробка вербальної моделі системи. Формування вербальної моделі передбачає складання переліку подій, які можуть відбуватися в даній системі масового обслуговування (рис.3.7), визначення для структурно-автоматної моделі базових подій, а також встановлення відповідних для кожної базової події відповідних умов та обставин.

На основі аналізу поданих в табл. 3.1. пар подій, які фіксують початок та закінчення часового інтервалу перебування об'єкта дослідження у відповідному стані згідно [102] базовими подіями є:

Подія 1. «Завершення першої фази обслуговування заявки на проведення ППО»

Подія 2. «Завершення другої фази обслуговування заявки на проведення ППО»

Подія 3. «Переривання обслуговування заявки на проведення АВР»

Подія 4. «Прийняття заявки на проведення АВР в чергу»

Подія 5. «Завершення фази обслуговування заявки на проведення АВР»

Подія 6. «Прихід заявки на усунення прихованої відмови»

Подія 7. «Початок нового циклу ППО»

Розроблення структурно-автоматної моделі. Розроблення структурно-автоматної моделі здійснюється на основі вербальної моделі, сформованої в п. 3.6.1.1, яка задає вхідні дані у вигляді переліку базових подій та умов і обставин, при яких ці події відбуваються. При розробці структурно-автоматної моделі необхідно вирішити наступні задачі: сформувати вектор станів; визначити

множину формальних параметрів моделі; описати поведінку системи у вигляді базових подій, які відбуваються у системі, а також умов і обставин при яких відбуваються ці події; визначити формули розрахунку інтенсивностей переходів із стану в стан; визначити формули розрахунку ймовірностей альтернативних переходів; встановити правила модифікації компонент вектора станів.

Таблиця 3.1 – Представлення пар подій, які фіксують початок і закінчення часового інтервалу перебування досліджуваної СМО в певному стані

Пор. № пари подій	Подія, яка фіксує початок часового інтервалу перебування об'єкта дослідження у певному стані	Подія, яка фіксує закінчення часового інтервалу перебування об'єкта дослідження у певному стані
1	«Початок першої фази обслуговування заявки на проведення ППО»	«Завершення першої фази обслуговування заявки на проведення ППО»
2	«Початок другої фази обслуговування заявки на проведення ППО»	«Завершення другої фази обслуговування заявки на проведення ППО»
3	«Прихід заявки на проведення АВР»	«Переривання обслуговування заявки на проведення ППО»
4	«Прихід заявки на проведення АВР»	«Прийняття заявки на проведення АВР в чергу»
5	«Початок фази обслуговування заявки на проведення АВР»	«Завершення фази обслуговування заявки на проведення АВР»
6	«Прихід заявки на усунення прихованої відмови»	«Прийняття заявки на усунення прихованої відмови в чергу»
7	«Закінчення циклу ППО»	«Початок нового циклу ППО»

Формування множини формальних параметрів

Множину формальних параметрів моделі складають константи, які

визначаються для конкретного об'єкту дослідження. Вибрану СМО представлено відповідними параметрами, а саме [108]:

N – кількість РЕСВП, які обслуговуються однією ремонтною бригадою;

λ – інтенсивність надходження заявок на проведення АВР (інтенсивність появи явних відмов, в результаті чого РЕСВП потрапляє в аварійну ситуацію);

λ_{np} – інтенсивність надходження заявок на усунення прихованих відмов (інтенсивність появи прихованих відмов в РЕСВП);

T_m – середнє значення тривалості проведення першої фази обслуговування заявки на проведення ППО (час затрачений на плановий моніторинг – контроль і діагностика прихованих відмов);

$T_{ППО}$ – середнє значення тривалості проведення другої фази обслуговування заявки на проведення ППО (час затрачений на проведення ремонтних робіт з усунення прихованих відмов в підсистемах РЕСВП);

T_{ABP} – середнє значення тривалості проведення фази обслуговування заявки на проведення АВР (час затрачений на усунення явних відмов у підсистемах та модулях РЕСВП);

T – періодичність проведення ППО;

k – коефіцієнт збільшення інтенсивності появи аварійних ситуацій при наявності в системі прихованої відмови.

Формування компонент вектора станів

Вектор станів складається із компонент, які однозначно визначають стан системи в кожен момент часу. Кількість компонент в описі поточного стану повинна відповідати кількості параметрів, зміна яких визначає поведінку системи.

Стани СМО (рис.3.7) представлено наступними компонентами вектора стану:

V_1 – відображає поточний стан каналу обслуговування (початкове значення компоненти $V_1=0$). Дана компонента може приймати наступні значення:

✓ $V_1=0$ – КО зайнятий першою фазою обслуговування заявки на проведення ППО;

✓ $V_1=1$ – КО зайнятий другою фазою обслуговування заявки на

проведення ППО або фазою проведення АВР;

V_2 – відображає поточну кількість заявок на проведення ППО, які знаходяться в черзі (початкове значення компоненти рівне кількості РЕСВП, які перебувають на обслуговуванні однієї ремонтної бригади $V_2=N$).

V_3 – відображає поточну кількість заявок на проведення АВР, які знаходяться в черзі (початкове значення компоненти $V_3=0$; максимальне значення компоненти рівне кількості систем РЕСВП, які перебувають на обслуговуванні однієї ремонтної бригади $V_3=N$).

V_4 – відображає поточну кількість заявок на усунення прихованих відмов, які знаходяться в фіктивній черзі (початкове значення компоненти $V_4=0$; максимальне значення компоненти рівне кількості систем РЕСВП, які перебувають на обслуговуванні однієї ремонтної бригади $V_4=N$).

Побудова дерева правил модифікацій компонент вектора станів

Для побудови дерева правил модифікації компонент вектора станів необхідно: здійснити формалізований опис ситуацій в яких відбуваються базові події через представлення умов та обставин; розробити формули розрахунку інтенсивностей базових подій (ФРІБП) та правил модифікації компонент вектора станів (ПМКВС) [102, 108].

Подія 1. «Завершення першої фази обслуговування заявки на проведення ППО». Дана подія може відбуватися за умови наявності в черзі заявок на проведення ППО ($V_2>0$), відсутності в черзі заявок на проведення АВР ($V_3=0$) та перебуванні заявки на проведення ППО на першій фазі обслуговування ($V_1=0$).

Правило модифікації компонент вектора станів для даної ситуації має вигляд: $V_1:=1$.

Інтенсивність **Події 1** визначається тривалістю першої фази обробки заявки на проведення ППО – моніторинг прихованих відмов, а ФРІБП має вигляд: $1/T_m$.

Подія 2. «Завершення другої фази обслуговування заявки на проведення ППО». Подія 2 відбувається за умови перебування заявки на проведення ППО на другій фазі обслуговування ($V_1=1$) та відсутності в черзі заявок на проведення АВР ($V_3=0$). Для цієї події необхідно розглянути дві обстави:

Обставина 1. Черга заявок на усунення прихованих відмов є пустою ($V4=0$). Здійснюється завершення обслуговування заявки на проведення ППО і кількість заявок в черзі на проведення ППО зменшується на одиницю ($V2:=V2-1$), а заявка яка обслуговувалась залишає КО ($V1:=0$).

Для такої ситуації правило модифікації компонент вектора станів матиме вигляд: $V2:=V2-1$; $V1:=0$;

Інтенсивність події 2 визначається через тривалість проведення ППО системи РЕСВП: $1/T_{ппо}$.

Обставина 2. В черзі заявок на усунення прихованих відмов є заявки ($V4>0$). В розглянутій моделі відсутня інформація, яка б вказувала в якій системі РЕСВП виникла прихована відмова. Тому, при виникненні обставини 2 розглядається наступна ситуація:

В системі, для якої проводиться ППО, існує прихована відмова. В такому випадку здійснюється завершення обслуговування заявки на проведення ППО і кількість заявок в черзі на проведення ППО зменшується на одиницю ($V2:=V2-1$), а заявка яка обслуговувалась покидає КО ($V1:=0$). Також проводиться усунення прихованої відмови, кількість заявок в фіктивній черзі заявок на усунення прихованих відмов зменшується на одиницю ($V4:=V4-1$).

Для такої ситуації ПМКВС матиме вигляд: $V2:=V2-1$; $V4:=V4-1$; $V1:=0$;

Для даної обставини інтенсивність визначається тривалістю проведення ППО та тривалістю усунення прихованої відмови РЕСВП: $1/(T_{ппо}+T_{пв})$.

Подія 3. «Переривання обслуговування заявки на проведення ППО» Дана подія відбувається за умови перебування заявки на проведення ППО в каналі обслуговування ($V1=1$) та приходу заявки на проведення АВР ($V3>0$).

Після цієї події ремонтна бригада перериває роботи по проведенню ППО: ($V1:=0$) і готова приступати до усунення аварії на РЕСВП.

Для такої ситуації ПМКВС матиме вигляд: $V1:=0$;

Для даної обставини інтенсивність визначається через тривалість переходу від ППО до АВР (підготовка відповідного обладнання, замовлення запчастин тощо): $1/T_{пр}$.

Подія 4. «Прихід заявки на проведення АВР» Дана подія може виникати за умови наявності хоча б одної справної РЕСВП ($V3 < N$) та при наступних обставинах:

Обставина 1. В момент приходу заявки фіктивна черга заявок на усунення прихованих відмов є пустою ($V4=0$). За цієї обставини кількість заявок в черзі заявок на проведення АВР збільшується на одиницю тобто ПМКВС матиме вигляд: ($V3:=V3+1$).

Інтенсивність надходження заявки на проведення АВР, для даної обставини рівна $\lambda \cdot (N-V3)$.

Обставина 2. В момент приходу заявки в фіктивній черзі заявок на усунення прихованих відмов є заявки ($V4 > 0$). За цієї обставини є дві альтернативні ситуації при яких може надходити заявка на проведення АВР.

Альтернатива №1. Аварійна ситуація відбулася в системі в якій є прихована відмова. Ймовірність такої ситуації рівна ($V4/N$). В цьому випадку інтенсивність надходження заявки на проведення АВР рівна $k \cdot \lambda \cdot (N-V3)$.

Альтернатива №2. Аварійна ситуація відбулася в системі в якій відсутня прихована відмова. Ймовірність такої ситуації рівна ($1-(V4/N)$). В цьому випадку інтенсивність надходження заявки на проведення АВР рівна $\lambda \cdot (N-V3)$.

За цієї обставини кількість заявок в черзі заявок на проведення АВР збільшується на одиницю, а ПМКВС матиме вигляд: ($V3:=V3+1$).

Сумарна інтенсивність надходження заявки на проведення АВР з врахуванням альтернативних ситуацій, для даної обставини рівна:

$$k \cdot \lambda \cdot (V4/N) \cdot (N-V3) + \lambda \cdot (1-(V4/N)) \cdot (N-V3).$$

Подія 5. «Завершення обслуговування заявки на проведення АВР» Дана подія виникає за умови наявності заявки на проведення АВР в черзі ($V3 > 0$) та вільному КО ($V1=0$). Виникнення даної події приводить до переходу заявки на проведення АВР.

Інтенсивність даної події визначається тривалістю перебування заявки на виконанні АВР - $1/T_{ABP}$.

Правило модифікації компонент вектора станів для цієї події матиме вигляд:

$V1:=0; V3:=V3-1.$

Подія 6. «Прихід заявки на усунення прихованої відмови». Дана подія відбувається за умови наявності хоча б одної РЕСВП в якій відсутні приховані відмови ($V4 < N$). Виникнення цієї події призводить до збільшення кількості заявок в фіктивній черзі на усунення прихованих відмов ($V4:=V4+1$).

Інтенсивність надходження заявки на усунення прихованої відмови рівна: λ_{np} . Для такої ситуації ПМКВС матиме вигляд: $V4:=V4+1$.

Подія 7. «Початок нового циклу ППО». Дана подія відбувається за умови завершення ППО всіх систем РЕСВП, які перебувають на обслуговуванні вибраної ремонтної бригади ($V2=0$). Після виникнення даної події кількість заявок в черзі на проведення ППО приймає початкове значення ($V2:=N$).

Інтенсивність виникнення даної події визначається періодичністю проведення ППО і є рівною: $1/T_{ППО}$.

Для такої ситуації ПМКВС матиме вигляд: $V2:=N$.

З представленого опису виникнення базових подій формується дерево правил модифікацій компонент вектора стану (табл. 3.2), яке є вхідними даними для програмного модуля ASNA.

Таблиця 3.2 – Дерево правил модифікації компонент вектора стану

Назва базової події	Умови та обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
«Завершення першої фази обслуговування заявки на проведення ППО»	$(V1=0) \text{ AND } (V2>0) \text{ AND } (V3=0)$	$1/T_M$	1	$V1:=1$
«Завершення другої фази обслуговування заявки на	$(V1=1) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V3=0)$	$1/T_{ППО}$	1	$V2:=V2-1;$ $V1:=0;$
	$(V1=1) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V3=0)$	$1/(T_{ППО}+T_{ПВ})$	1	$V2:=V2-1;$

Назва базової події	Умови та обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
проведення ППО»	$(V4 > 0) \text{ AND } (V3 = 0)$			$V4 := V4 - 1;$ $V1 := 0; V5 := 1;$
«Переривання обслуговування заявки на проведення ППО»	$(V1 = 1) \text{ AND } (V3 > 0)$	$1/T_{ABP}$	1	$V1 := 0; V5 := 1$
«Прихід заявки на проведення АВР»	$(V3 < N) \text{ AND } (V4 = 0)$	$\lambda \cdot (N - V3)$	1	$V3 := V3 + 1$
	$(V3 < N) \text{ AND } (V4 > 0)$	$k \cdot \lambda \cdot (N - V3)$ $\lambda \cdot (N - V3)$	$V4/N$ $1 - (V4/N)$	$V3 := V3 + 1$
«Завершення обслуговування заявки на проведення АВР»	$(V1 = 0) \text{ AND } (V3 > 0)$	$1/T_{ABP}$	1	$V3 := V3 - 1$
«Прихід заявки на усунення прихованої відмови»	$(V4 < N)$	$\lambda_{np} \cdot (N - V4)$	1	$V4 := V4 + 1;$
«Початок нового циклу ППО»	$(V2 = 0)$	$1/T_{ППО}$	1	$V2 := N$

Автоматизоване генерування моделі стратегії ТО у вигляді графа станів і переходів. На основі розробленої структурно-автоматної моделі та програмного модуля ASNA здійснюється автоматизоване розроблення графа станів та переходів та відбувається формування математичної моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена [102]. Так для випадку коли на обслуговуванні однієї ремонтної бригади перебуває одна РЕСВП граф станів і переходів має вигляд рис. 3.7:

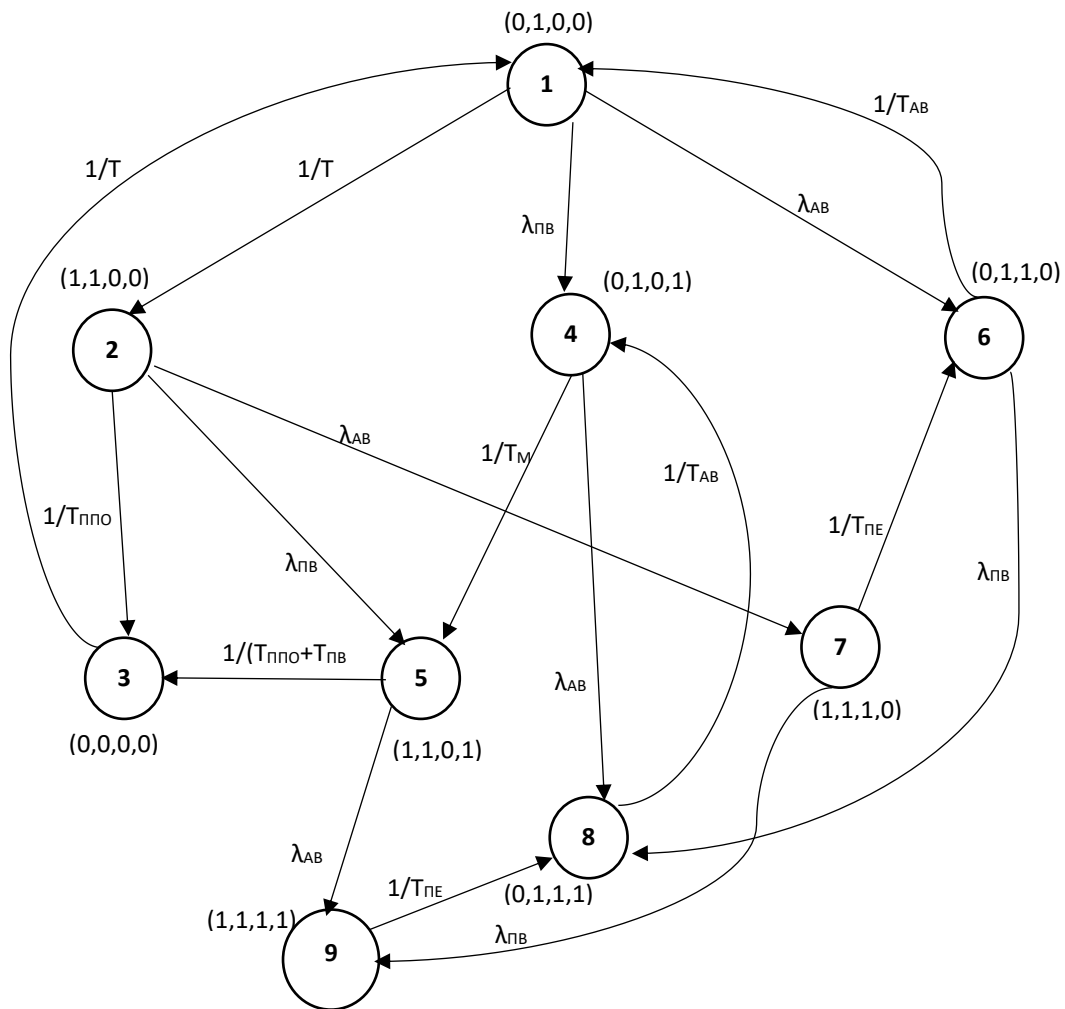


Рис.3. 7. Модель стратегії ТО у вигляді графа станів і переходів, в якій представлено проведення ППО та АВР для усунення прихованих та явних

Аналітична модель система для стратегії ТО для випадку, коли на обслуговуванні ремонтної бригади є одна РЕСВП. Аналітична модель система для стратегії ТО у вигляді системи диференціальних рівнянь має вигляд (3.7).

Ця модель дає змогу синтезувати стратегію ТО, яка забезпечить задані показники безпеки та готовності РЕПС з врахуванням таких параметрів:

- Періодичності фази моніторингу прихованих відмов.
- Середньої тривалості фази проведення ППО.
- Періодичності фази проведення ППО.
- Середньої тривалості фази проведення АВР.
- Швидкості переходу ремонтної бригади від ППО до АВР.
- Показники надійності обладнання.
- Кількості РЕСВП, які можуть бути на обслуговуванні однієї ремонтної бригади.

$$\begin{aligned}
\frac{dP_1(t)}{dt} &= -\left(\frac{1}{T_M} + \lambda_{ABP} + \lambda_{ПВ}\right) \cdot P_1(t) + \frac{1}{T} \cdot P_3(t) + \frac{1}{T_{ABP}} \cdot P_6(t) \\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= \frac{1}{T_M} \cdot P_1(t) - \left(\frac{1}{T_{ППО}} + \lambda_{ABP} + \lambda_{ПВ}\right) \cdot P_2(t) \\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= \frac{1}{T_{ППО}} \cdot P_2(t) - \frac{1}{T} \cdot P_3(t) + \frac{1}{T_{ППО}} \cdot P_5(t) \\
\frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{ПВ} \cdot P_1(t) - \left(\frac{1}{T_M} + \lambda_{ABP}\right) \cdot P_4(t) + \frac{1}{T_{ABP}} \cdot P_8(t) \\
\frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{ПВ} \cdot P_2(t) + \frac{1}{T_M} \cdot P_4(t) - \left(\frac{1}{T_{ППО}} + \lambda_{ABP}\right) \cdot P_5(t) \\
\frac{dP_6(t)}{dt} &= \lambda_{ABP} \cdot P_1(t) - \left(\frac{1}{T_{ABP}} + \lambda_{ПР}\right) \cdot P_6(t) + \frac{1}{T_{ПЕР}} \cdot P_7(t) \\
\frac{dP_7(t)}{dt} &= \lambda_{ABP} \cdot P_2(t) - \left(\frac{1}{T_{ПЕР}} + \lambda_{ПР}\right) \cdot P_7(t) \\
\frac{dP_8(t)}{dt} &= \lambda_{ABP} \cdot P_4(t) + \lambda_{ПВ} \cdot P_6(t) - \frac{1}{T_{ABP}} \cdot P_8(t) + \frac{1}{T_{ПЕР}} \cdot P_9(t) \\
\frac{dP_9(t)}{dt} &= \lambda_{ABP} \cdot P_5(t) + \lambda_{ПВ} \cdot P_7(t) - \frac{1}{T_{ПЕР}} \cdot P_9(t)
\end{aligned} \tag{3.7}$$

3.7. Визначення функції готовності радіоелектронної системи відповідадльного призначення з врахуванням ймовірності виникнення аварійних ситуацій

Кінцевим результатом моделювання є отримані на основі розв'язання систем диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена ймовірності перебування системи у всіх станах. На основі цих ймовірностей здійснюється розрахунок необхідних показників безпечності РЕСВП та ефективності стратегії ТО в цілому. З точки зору

ефективності РЕСВП актуальним є розрахунок таких показників, як стаціонарний та нестаціонарний коефіцієнт готовності. Також важливим є показник – ймовірність появи аварійної ситуації та функції аварійності. Ці два показники характеризують рівень безпечності, який може забезпечити стратегія ТО на етапі експлуатації РЕСВП.

Для розрахунку нестаціонарного коефіцієнта необхідно вибрати всі стани в яких РЕСВП є працездатним і просумувати ймовірності перебування в цих станах. В кінцевому результаті отримується функція готовності сукупності РЕСВП, які перебувають на обслуговуванні однієї ремонтної бригади $K_z(t)$.

Стаціонарний коефіцієнт готовності визначається через функцію готовності, за умови що час дослідження прямує до безмежності ($T \rightarrow \infty$).

На основі розробленої моделі та заданих граничних значень коефіцієнта готовності РЕСВП можна вирішувати наступні задачі:

- порівняння та вибір відповідної стратегії ТО в залежності від закладених вхідних даних;
- визначення ефективної періодичності проведення планово-профілактичних робіт;
- визначення максимальної кількості систем РЕСВП, які можуть перебувати на обслуговуванні однієї ремонтної бригади із збереженням заданого рівня надійності;
- які перебувають на обслуговуванні однієї ремонтної бригади;
- визначення максимальних допустимих термінів проведення різного роду відновлювальних робіт в системах РЕСВП (вибір кваліфікації ремонтної бригади);

3.7.1 Метод визначення функції готовності з врахуванням ймовірності виникнення аварійної ситуації

Функція готовності $K_z(t)$ – ймовірність того, що об'єкт дослідження буде працездатний в заданий момент часу від початку роботи об'єкта. Функція

готовності визначається, як сума ймовірностей перебування об'єкта дослідження в працездатних станах. Однак існуючі методи знаходження функції готовності не враховують потрапляння РЕСВП в аварійну ситуацію, після чого система може довгий час залишатися в стані простою. Це призводить до того, що значення функції готовності буде суттєво завищеним.

Для розрахунку функції готовності РЕСВП з врахуванням потрапляння системи в аварійні ситуації необхідно розробити метод, який дозволить формалізувати цей процес та частково автоматизувати деякі його етапи. Розроблений метод базується на основі отриманого за допомогою програмного модуля ASNA графа станів та переходів, подальшого оброблення отриманих результатів за допомогою табличного процесора (MS Excel чи LibreOffice Calc) та обчислення функції готовності з врахуванням станів аварійних ситуацій у програмному забезпеченні MatLab. Метод отримання функції готовності РЕСВП з врахуванням потрапляння в аварійну ситуацію можна представити за допомогою схеми рис. 3.8.

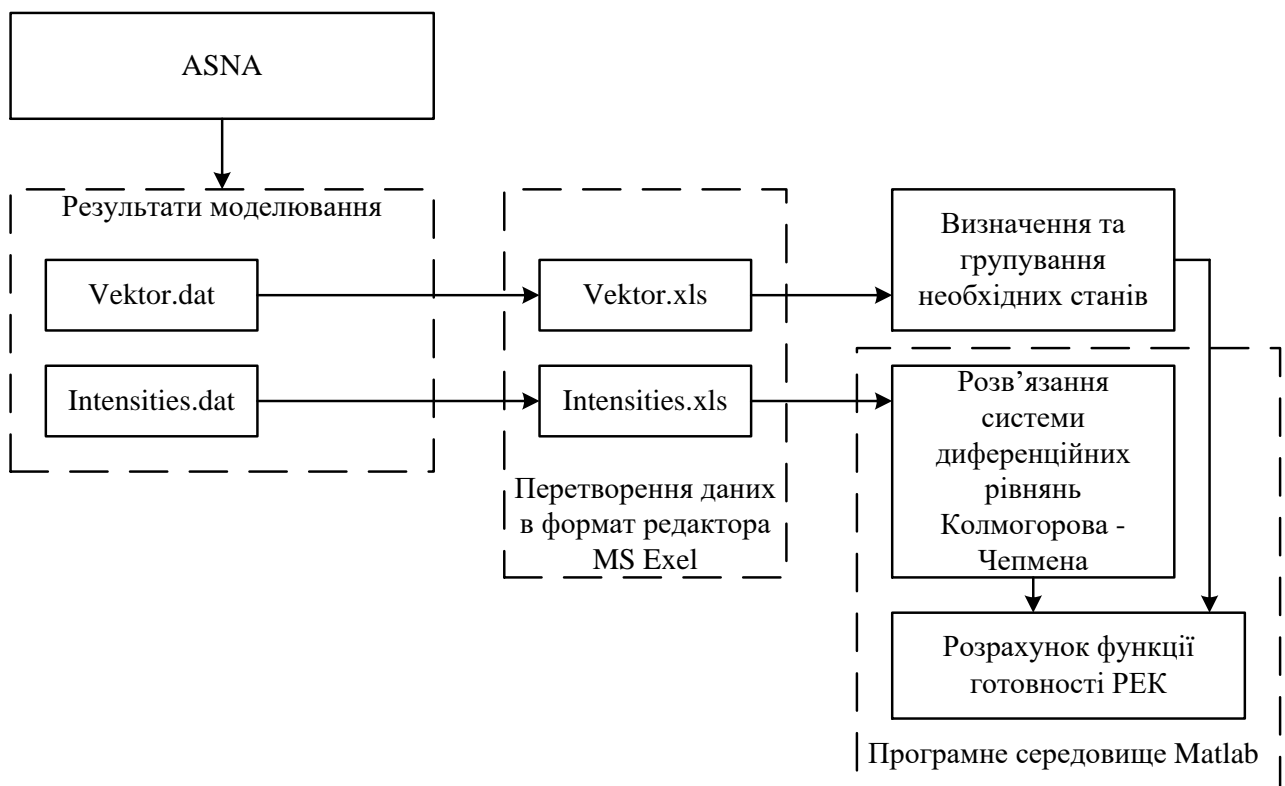


Рис.3.8. Схема методу розрахунку функції готовності РЕСВП з врахуванням ймовірності виникнення аварійної ситуації

Отримання множини вектора станів та матриці інтенсивностей переходів за допомогою програмного забезпечення ASNA передбачає виконання таких процедур:

Опис об'єкта дослідження. Структуру об'єкта дослідження та його поведінку необхідно представити у певній математичній формі, яка служить вхідними даними для програмного модуля ASNA. Опис об'єкта дослідження слід здійснювати згідно удосконаленої технології моделювання ДНСС [102]. Для цього необхідно розробити вербальну (словесну) модель об'єкта дослідження та структурно-автоматну модель, яка передбачає формування множини формальних параметрів, вибір компонент вектора стану та розробку дерева правил модифікацій компонент вектора стану.

Автоматизована генерація графа станів та переходів. На основі розробленої структурно-автоматної моделі та з використанням програмного модуля ASNA здійснюється автоматизована побудова графа станів та переходів досліджуваного об'єкта. Розроблений програмним модулем ASNA граф станів та переходів відображається за допомогою двох файлів даних:

- файл вектора станів (Vektor). Цей файл представляє собою масив значень, який відображає усі стани, в яких перебуває система та значення компонент вектора станів в кожному стані;
- файл інтенсивностей переходів (Intensities). Це масив числових значень, який несе інформацію про те з якого стану в який здійснюється перехід, та яке числове значення інтенсивності цього переходу;

Підготовка даних за допомогою табличного процесора (MS Excel чи LibreOffice Calc).

Перетворення отриманих даних з формату ASNA у формат електронних таблиць. Отримані в результаті моделювання файли “Vektor.dat” та “Intensities.dat” необхідно перетворити у файли програмного середовища MS Excel “Vektor.xls” та “Intensities.xls” для подальшого оброблення за допомогою стандартних засобів MS Excel.

Вибір та групування станів. На основі даних, які знаходяться в файлі

“Vektor.xls” і представляють стани досліджуваного об’єкта, розділяємо їх на стани, в яких система є працездатною та стани, в яких система є непрацездатною.

3.7.1.3. Розрахунок функції готовності за допомогою програмного забезпечення MatLab. Використовуючи дані “Intensities.xls”, які представляють граф станів та переходів системи за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Matlab проводиться формування та розв’язування системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена аналітичним методом матричної експоненти. На основі розрахованих значень ймовірностей перебування системи в кожному стані проводиться розрахунок функції готовності. Розрахунок здійснюється шляхом сумування ймовірностей перебування системи у працездатних станах, які встановлено на попередньому етапі.

Вхідними даними для розрахунку функції готовності за допомогою програмного забезпечення Matlab є файли сформовані програмним модулем ASNA, в яких міститься інформація про стани системи та інтенсивності переходів між цими станами “Intensities.xls”.

Процедуру розрахунку функції готовності в програмному забезпеченні MatLab представлено покроково у вигляді алгоритму. Алгоритм розрахунку функції готовності РЕСВП передбачає виконання наступних кроків:

Крок 1. Зчитування даних про інтенсивності переходів із стану в стан із сформованого програмним модулем ASNA файлу “Intensities.xls” (Блок 1 рис.3.9). На основі зчитаних даних формується матриця **Intens**, яка складається з чотирьох стовпців та **KP** рядків, де **KP** це кількість переходів в графі станів та переходів. В стовпцях матриці **Intens** міститься наступна інформація: стовпець №1 – початкові значення ймовірності перебування системи в кожному стані; стовпець №2 – номер стану системи в який здійснюється перехід; стовпець №3 – номер стану системи з якого здійснюється перехід; стовпець №4 – значення інтенсивності переходів між станами.

Крок 2. Формування системи лінійних диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена із сталими коефіцієнтами.

$$\frac{dP(t)}{dt} = \Lambda \cdot P(t) \quad (3.8)$$

де $P(t)$ – матриця ймовірностей перебування у станах;
 Λ – матриця інтенсивностей переходів між станами (**Lambda**).

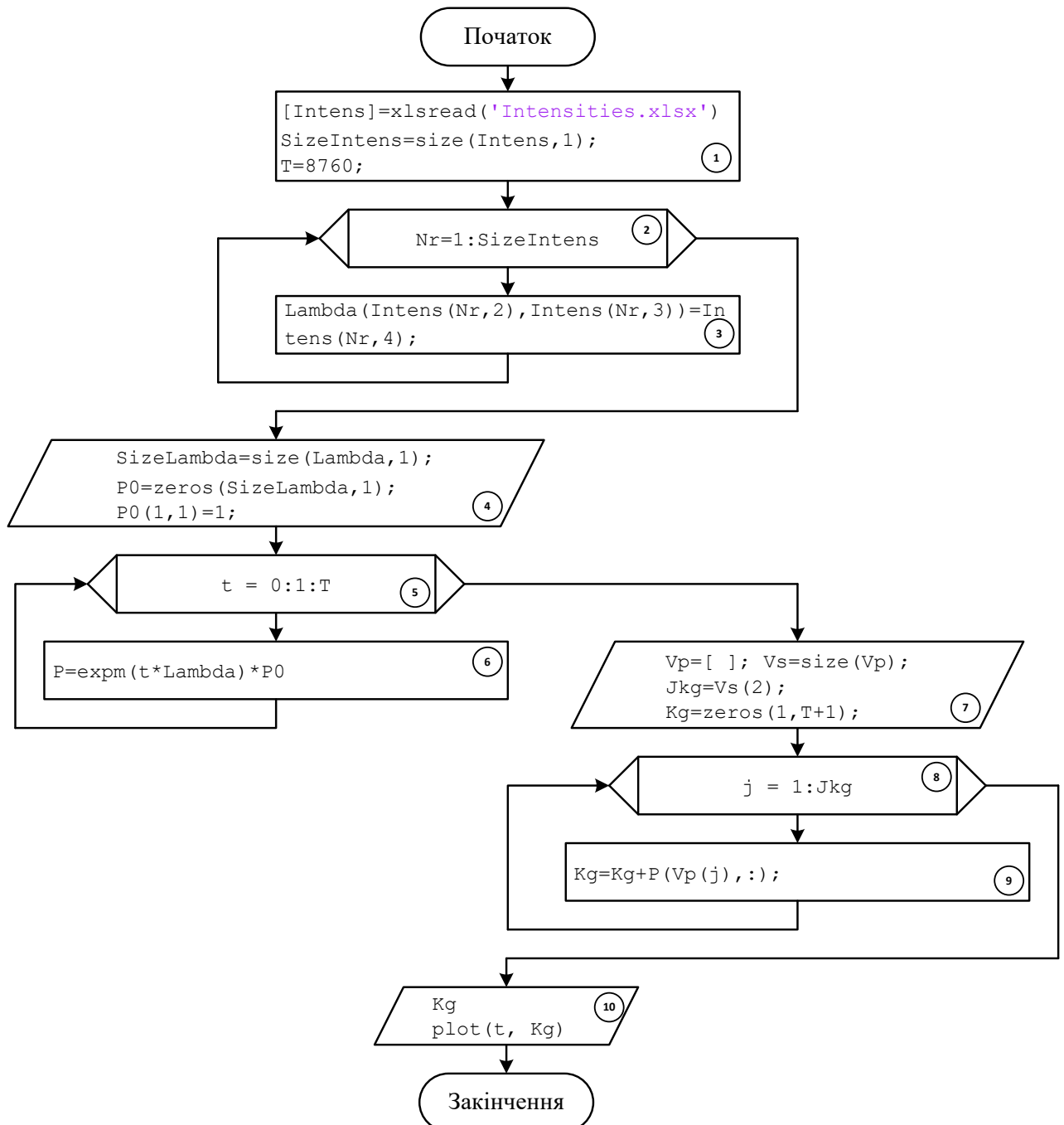


Рис.3.9. Блок-схема алгоритму розрахунку функції готовності РЕСВПза
 допомогою програмного забезпечення MatLab

На основі матриці **Intens**, яка містить інформацію про стани між якими

здійснюються переходи та значення інтенсивностей цих переходів, здійснюється запис системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена (3.8) в відповідній матричній формі, а саме проводиться формування квадратної матриці інтенсивності **Lambda**.

Константі **SizeIntens** присвоюється значення, яке відповідає кількості рядків матриці **Intens**. Змінній **Nr** по чергово присвоюються значення від **1** до **SizeIntens**. З **Nr**-го рядка 2-го стовпця матриці **Intens** вибирається номер стану в який здійснюється перехід, а з **Nr**-го рядка 3-го стовпця номер стану з якого здійснюється перехід. Номер стану в який здійснюється перехід є номером відповідного рядка, а номер стану, з якого здійснюється перехід номером відповідного стовпця матриці інтенсивностей **Lambda**. Значення інтенсивності переходу між цими станами записується з **Nr**-го рядка 4-го стовпця матриці **Intens**.

$$\mathbf{Lambda}(\mathbf{Intens}(\mathbf{Nr},2),\mathbf{Intens}(\mathbf{Nr},3))=\mathbf{Intens}(\mathbf{Nr},4) \quad (3.9)$$

Крок 3. Розв’язання системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Система диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена є системою лінійних диференціальних рівнянь з сталими коефіцієнтами, для якої існує велика кількість методів знаходження розв’язків, серед яких аналітичний метод матричної експоненти, аналітичний метод прямого та зворотного перетворення Лапласа, та різного роду чисельні методи (метод Рунге–Кута, метод Гіра, метод Розенброка), які вибираються в залежності від жорсткості системи диференціальних рівнянь. В даній роботі розв’язання системи диференціальних рівнянь здійснюється за допомогою аналітичного методу матричної експоненти, який закладено в програмне середовище Matlab у вигляді функції **expm()**. Згідно з використанням методу матричної експоненти ймовірності перебування системи у станах знаходяться за формулою:

$$P(t) = P(0) \cdot e^{t \cdot \mathbf{Lambda}} \quad (3.10)$$

Вектор початкових значень $P(0)$ має розмірність матриці (3.9). В початковий момент часу всі системи досліджуваного РЕСВП є працездатними, тому перше значення вектора $P(0)$ рівне одиниці, а всі інші нулю.

Крок 4. На основі аналізу вектора стану формується вектор працездатних станів V_p в який записуються номери усіх працездатних станів. Після цього на підставі вектора працездатних станів V_p та розв'язків системи рівнянь (3.3) проводиться розрахунок функції готовності РЕСВП.

Розроблений алгоритм реалізовано з використанням програмного забезпечення Matlab (Додаток Б.1.), що дало змогу автоматизувати процес розрахунку функції готовності РЕСВП.

Розрахунок ймовірності виникнення аварійної ситуації та функцій аварійності. Розрахунок ймовірності аварійної ситуації містить аналогічні до методики розрахунку функції готовності перші чотири етапи (див. п.3.7.1.). Різниця полягає у Етапі 5, який приведено нижче:

Етап 5. Розрахунок ймовірності аварійної ситуації. Розрахунок здійснюється шляхом сумування ймовірностей перебування системи у непрацездатних станах, які встановлено на етапі 4. Таким чином отримується ймовірність аварійної ситуації.

Етап 6. Формування функцій аварійності.

Для формування виразу ФА необхідно встановити сукупність непрацездатних станів, які призводять до аварійної ситуації. Оскільки одні й ті ж стани можуть входити в склад різних ФА, то необхідно отримати маску аварійної ситуації, яка сформована з компонент ВС, перехід в непрацездатний стан яких є необхідною і достатньою умовою для виникнення аварійної ситуації. Маска аварійної ситуації отримується з умови аварії РЕСВП шляхом її мінімізації за правилами алгебри логіки.

Формування ФА складається з двох етапів. На першому за допомогою маски аварійної ситуації визначаються групи станів, що відповідають конкретній ФА. На другому – з вибраних станів формують вирази для обчислення кількісних значень ФА:

- Вибираються усі стани, у яких компоненти ВС, що відповідають масці аварійної ситуації, дорівнюють нулю.
- Якщо маска аварійної ситуації має декілька складових об'єднаних логічним

оператором OR, то відповідно буде стільки ж ФА, для кожної з яких буде існувати своя група станів.

Вхідними даними для алгоритму є сукупність непрацездатних станів, які отримуються за допомогою бінарної САМ.

Таким чином вираз функції аварійності дорівнює сумі ймовірностей перебування у тих станах, що відповідають масці аварійної ситуації. Група непрацездатних станів в найпростішому випадку може включати усі непрацездатні стани. Для РЕСВП таких груп станів може бути декілька.

Оцінка безпечності у випадках, коли приховані відмови настають до початку застосування системи. Така задача є актуальною тоді, коли

- період моніторингу прихованих відмов перевищує період застосування і приховані відмови можуть мати місце на початок використання РЕСВП.
- РЕСВП знаходиться на тривалому зберіганні і в певний момент часу повинна бути готовою до застосування.

Для цього необхідно змінювати початкові умови розв'язання системи диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена за наступними правилами:

1. Якщо в момент часу $t=0$ явні і приховані відмови відсутні, то
 $P_1=1, P_j=0 \quad j=2, \dots, N$
2. Якщо в системі до початку роботи може бути прихована відмова, однак в цьому стані РЕСВП є працездатною і номер стану h , то
 $P_h=1, P_j=0 \quad j=1, \dots, h-1$, де $h=1, \dots, N$
3. Якщо в системі може бути декілька працездатних станів, у яких до початку роботи можуть статись приховані відмови, то в момент часу $t=0$ ймовірність перебування у цих станах буде >0 , а сума цих ймовірностей буде рівна 1. Співвідношення між цими ймовірностями визначає проєктант на базі свого досвіду.

3.7.2. Методика дослідження функції готовності, ймовірності виникнення аварійної ситуації та функцій аварійності радіоелектронної системи відповідального призначення з використанням розробленого методу

На основі запропонованого методу та з використанням розробленого в програмному забезпеченні m-файла (Додаток Б.1) проведемо розрахунок нестационарного коефіцієнта готовності регіонального РЕСВП для стратегії ТО з абсолютним пріоритетом обслуговування.

Етап 1. Опис об'єкта дослідження. Моделювання проводиться при наступних вхідних даних:

- кількість РЕСВП, які перебувають на обслуговуванні ремонтної бригади $N=7$;
- інтенсивність надходження заявок на проведення АВР в СМО (інтенсивність виникнення аварійних ситуацій в системах РЕСВП) $\lambda_{\text{АВР}}=1 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$;
- інтенсивність надходження заявок на усунення прихованих відмов в СМО (інтенсивність виникнення прихованих відмов в системах РЕСВП) $\lambda_{\text{ПР}}=1 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$;
- час затрачений на проведення моніторингу для виявлення прихованих відмов $T_{\text{М}}=0,5 \text{ год}$;
- час затрачений на виконання ППО при відсутності прихованих відмов $T_{\text{ППО}}=10 \text{ год}$;
- час затрачений додатково на усунення виявлених прихованих відмов при проведенні робіт ППО $T_{\text{ППО}}=5 \text{ год}$;
- середнє значення тривалості проведення фази обслуговування заявки на проведення АВР (час затрачений на проведення АВР системи РЕСВП) $T_{\text{АВР}}=5 \text{ год}$;
- середнє значення тривалості переходу від фази ППО до фази АВР (час затрачений на завершення робіт з ППО, приготування до виконання АВР при приході заявки на проведення АВР РЕСВП) $T_{\text{АВР}}=5 \text{ год}$;
- періодичність проведення ППО систем РЕСВП $T=100 \text{ год}$.

Етап 2. Розробка графа станів та переходів. За допомогою програмного модуля ASNA здійснено побудову графа станів та переходів, який записаний у текстових файлах “Vektor.dat” та “Intensities.dat” (Додаток А.1.). Отриманий граф станів і переходів містить 903 станів та 3374 переходів.

Етап 3. Підготовка даних. Отримані, в результаті використання програмного модуля ASNA, текстові файли перетворюємо у файли електронних таблиць MS Excel.

Етап 4. Вибір та групування станів. На основі інформації про всі можливі стани системи та притаманні їм значення компонент вектора стану, які представлені в файлі “Vektor” визначаємо стани в яких РЕСВП є працездатним. Радіоелектрона система відповідального призначення вважається працездатною, коли в її підсистемах відсутні аварійні ситуації. Тобто згідно опису компонент вектора стану (п.3.6.1.) працездатними вважаються стани для яких виконується умова $V_3=0$. Проаналізувавши отриманий граф станів (Додаток А.1.) можна побачити, що ця умова виконується лише для множини станів з номерами {1...24}, {193...208}, {321...336}, {449...464}, {577...592}, {705...720} та станів {833...847}. На основі цієї інформації в розробленому m-файлі (Додаток Б.1.), програмного середовища Matlab, формуємо вектор працездатних станів $V_p=[1:24, 193:208, 321:336, 449:464, 577:592, 705:720, 833:847]$.

Етап 5. Розрахунок функції готовності. Розрахунок функції готовності сукупності РЕСВП здійснюється автоматизовано на основі алгоритму (рис. 3.9 п.3.7.2), який реалізований у вигляді m-файла (Додаток Б.1.) середовища Matlab. Результати розрахунку функції готовності регіонального РЕСВП при використанні стратегії ТО при відсутності прихованих відмов, при наявності прихованих відмов в одній з РЕСВП та при наявності прихованих відмов в усіх РЕСВП представлено на рис 3.10.

Формула для визначення функції готовності РЕСВП буде мати вигляд:

$$K(t) = \sum_{i=1}^{24} P_i(t) + \sum_{i=193}^{208} P_i(t) + \sum_{i=321}^{336} P_i(t) + \sum_{i=449}^{464} P_i(t) + \sum_{i=577}^{592} P_i(t) + \sum_{i=705}^{720} P_i(t) + \sum_{i=833}^{847} P_i(t)$$

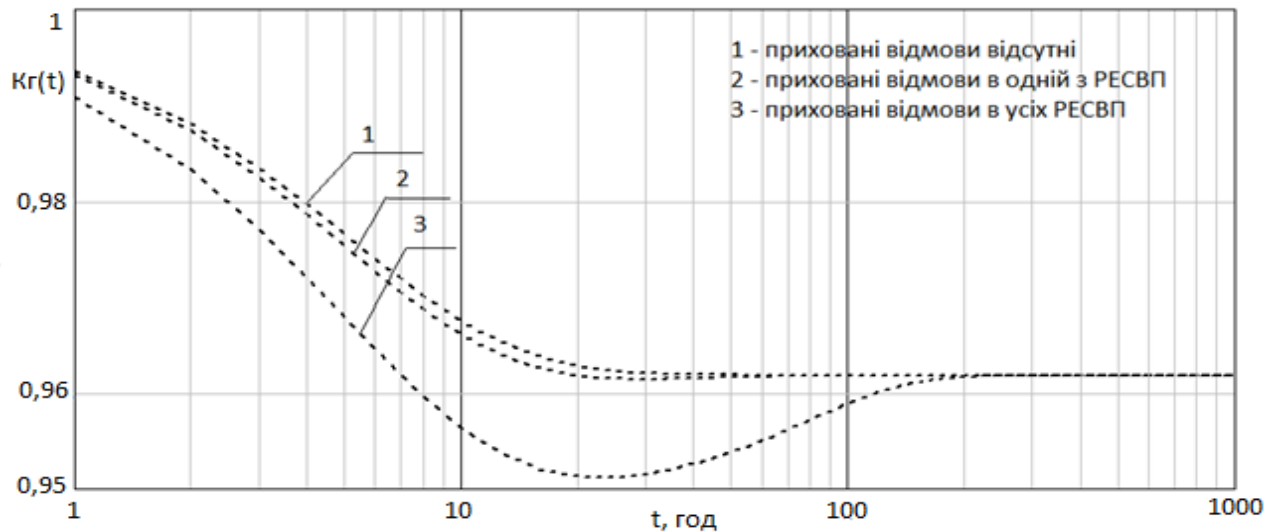


Рис.3.10. Залежності функції готовності сукупності з 5-ти РЕСВП від тривалості їх експлуатації для трьох варіантів наявності прихованих відмов

3.8. Розроблення методу синтезу параметрів стратегії технічного обслуговування за заданим значенням показника функціональної безпеки

Синтез параметрів стратегії ТО через багатоваріантний аналіз полягає у зміні наборів вхідних значень цих параметрів та визначенні показники ефективності ТО для кожного набору вхідних даних до тих пір, поки черговий обраний набір параметрів не буде забезпечувати задане (потрібне) значення показника ефективності ТО.

При проведенні технічного обслуговування трапляються ситуації, коли РЕСВП повністю зупиняються, що призводить до зупинки складної технічної системи, в склад якої входить РЕСВП. Така зупика є необхідною з точки зору проведення ТО, і фактично вводить складну технічну систему в аварійний стан. Якщо не розрізняти простої, коли здійснюється ТО РЕСВП без зупинки складної системи і простої із зупинкою складної системи, то вплив простою бкде відобразатись тільки на показниках готовності РЕСВП. Якщо ж враховувати аварійні простої і трактувати їх як непрацездатні стани - аварійні ситуації, то можна показати взаємозв'язок між параметрами ТО і показниками безпеки РЕСВП, зокрема ймовірністю появи аварійної ситуації

Для формалізації та автоматизації процесу синтезу параметрів стратегії ТО розроблено метод, який базується на використанні бінарної структурно-автоматної моделі, яка забезпечує розділення станів простою РЕСВП при проведенні ТО на безпечні та критичні. Це дає змогу за допомогою програмного модуля ASNA отримати граф станів та переходів з розщепленим станом простою, який, в одних випадках тільки знижує готовність РЕСВП, а в інших, призводить до ситуацій, аналогічних аварійним.

Запропонований метод представлено схемою на рис. 3.12. Він включає в себе 7 етапів, завдання яких і послідовність виконання подано нижче.

Етап 1. Опис об'єкта дослідження. Структуру об'єкта дослідження та його поведінку необхідно представити у формі бінарної САМ, яка є вхідними даними для програмного модуля ASNA. Опис об'єкта дослідження слід здійснювати згідно удосконаленої технології моделювання ДНСС [102]. Для цього необхідно сформулювати вербальну модель об'єкта дослідження та структурно-автоматну модель, яка передбачає формування множини формальних параметрів, вибір компонент вектора стану та розроблення дерева правил модифікацій компонент вектора стану.

Етап 2. Маркування параметра “X”. На етапі розробки бінарної структурно-автоматної моделі, а саме при формуванні вхідних даних необхідно здійснити маркування параметра “X” відносно якого буде здійснюватись дослідження показників ефективності ТО. Параметром “X” є параметри, які задають значення інтенсивностей переходів між станами в графі станів та переходів. До таких параметрів відносяться інтенсивність прихованих відмов, інтенсивність аварійних ситуацій, тривалість різних етапів проведення відновлювальних робіт, ймовірність спрацювання засобів контролю та діагностики, кількість РЕСВП, які є на обслуговуванні однієї бригади тощо.

Маркування відбувається наступним чином. Параметру “X” присвоюється непритаманне для досліджуваної системи значення, яке повинно бути на три – чотири порядки більше від найбільшого значення інших параметрів, які притаманні даній системі. Таким чином даний параметр можна буде легко виділити в матриці

інтенсивностей.



Рис. 3.12. Схема методу синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування РЕСВП для заданого значення показника ефективності стратегії технічного обслуговування

Етап 3. Розробка математичної моделі у вигляді графа станів та переходів.

Згідно технології моделювання ДНСС [102] на основі вербальної та бінарної структурно-автоматної моделі з використанням програмного модуля ASNA здійснюється розробка графа станів та переходів з розщепленим станом відмови, в результаті чого автоматизовано отримують наступні файли: файл вектора станів (**Vektor. dat**), файл інтенсивностей переходів (**Intensities. dat**).

Етап 4. Підготовка вхідних даних. Отримані в результаті моделювання файли "Vektor. dat" та "Intensities. dat" необхідно конвертувати у файли програмного середовища MS Excel для подальшої обробки.

Етап 5. Виділення та групування станів. На основі даних, які знаходяться в файлі "Vektor. xls" і представляють кожний стан досліджуваного об'єкта визначаємо стани, які відповідають відповідному етапу проведення відновлювальних робіт та стани в яких регіональний РЕСВП є працездатним.

Об'єднуємо ці стани у відповідні групи станів, які відображають необхідний нам процес.

Етап 6. Формування та розв'язок системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена. На основі сформованого на етапі 2 графа станів та переходів та підготовлених на етапі 3 файлів з використанням програмного середовища Matlab здійснюється формування системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена. При формуванні системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена з виразів інтенсивності переходів необхідно виділити всі числові значення параметра “X” і присвоїти їм відповідне значення з сформованого масиву значень для яких проводиться дослідження. Кінцевим результатом розв'язання сформованої системи диференційних рівнянь є розподіл ймовірностей перебування системи в кожному стані.

Етап 7. Визначення коефіцієнтів K_i . Коефіцієнти K_i визначають долю часу перебування системи в станах, які вважаємо аварійними простоями РЕСВП. Розрахунок цих коефіцієнтів здійснюється шляхом сумування виділених на етапі 4 станів, які відображають відповідні етапи ТО. Процес ТО - $x(t)$ характеризує стан системи у момент часу t . Вважається, що $x(t) = \{e_0, e_i\}$ де e_0 – стан коли система в момент часу t працездатна; e_i – стани, коли в системі в момент часу t проводяться відновлювальні роботи з номером i система є повністю відключена, в складна технічна система є в стані аварійної ситуації i ($i = 1, 2, \dots, s$).

Коефіцієнт K_i ($i = 1, 2, \dots, s$) визначається як доля часу, протягом якої система перебуває у станах аварійного простою e_i ($x(t) = e_i$) у разі тривалої експлуатації, тобто

$$K_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{X^i(T)}{T} \quad (3.11)$$

де $X^i(T)$ – випадковий сумарний час, упродовж якого система перебувала у стані аварійного простою e_i за інтервал часу $(0 \dots T)$. Оскільки

$$\sum_{i=0}^s X^{(i)}(T) = T \quad (3.12)$$

то

$$\sum_{i=0}^s K_i = 1 \quad (3.13)$$

де $K_0 = K_{TB}$ – коефіцієнт технічного використання.

Після розв’язання системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена отримано ймовірності перебування системи у всіх станах у довільний момент часу тому після їх сумування отримуємо змінні в часі $K_i(t)$, а необхідні коефіцієнти K_i , отримуються в точці $K_i(T)$ коли функція переходить в стаціонарний режим ($T \rightarrow \infty$).

Після визначення необхідних показників необхідно повернутися на етап 6 та з масиву заданих значень вибрати нове значення параметра “X”.

Приклад залежності функції готовності від ймовірності настання аварійної ситуації в результаті повної зупинки сукупності РЕСВП при проведенні ТО показано на рис.3.11.

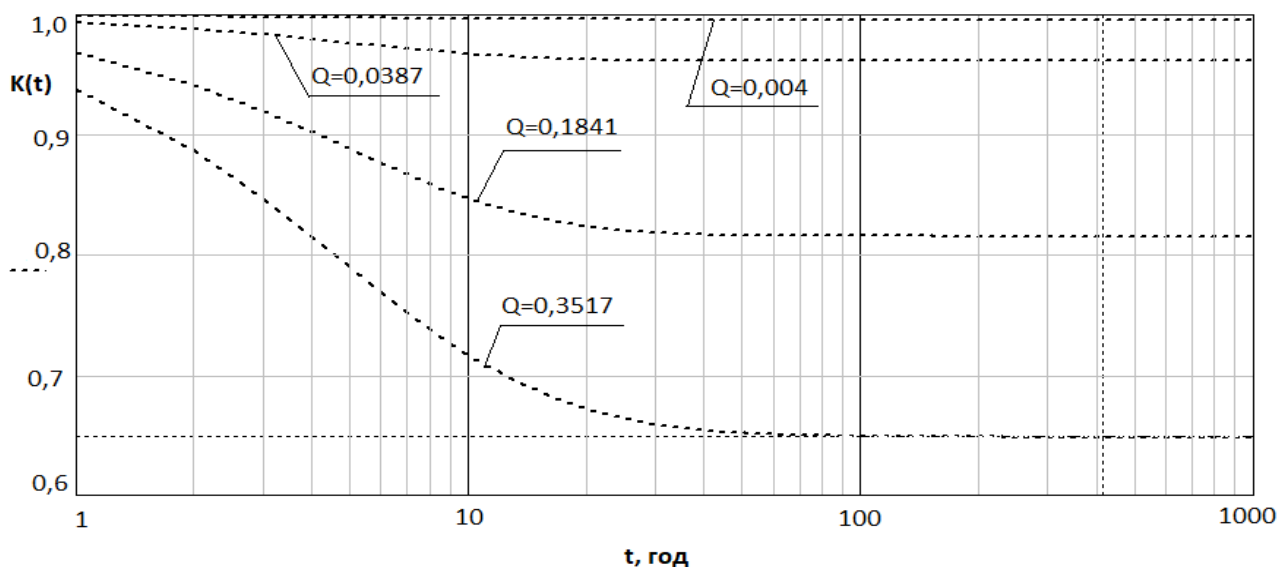


Рис.3.11. Залежності функції готовності сукупності з 5-ти РЕСВП від тривалості їх експлуатації для чотирьох значень ймовірності появи аварійної ситуації

3.9. Автоматизація синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування та ремонту радіоелектронної системи відповідального призначення

В попередньому пункті розроблено метод, який представляє собою послідовність етапів проведення синтезу показників ефективності ТО з використанням програмного середовища Matlab.

Оскільки синтез стратегії ТО здійснюється через багатоваріантний аналіз, то процедури аналізу багатократно повторюються. Тому для практичного застосування даної методики на етапі системотехнічного проектування РЕСВП її необхідно автоматизувати. Етап розробки графа станів та переходів є вже автоматизованим за рахунок використання програмного модуля ASNA, а етапи з 5 по 7 необхідно автоматизувати. Для автоматизації цих етапів в роботі розроблено відповідний алгоритм представлений в Додатку В. Засоби автоматизації згідно цього алгоритму реалізовано за допомогою середовища Matlab. Запропонована методика багатоваріантного аналізу показників ефективності полягає у багаторазовому використанні методики розрахунку показників ефективності системи. Тому розрахунок показників ефективності системи (функція готовності, функції аварійності, ймовірність аварійної ситуації, ймовірність простою) буде здійснюватись за таким самим принципом, що і в методиці п.3.7.

Висновки до розділу 3.

1. Для врахування впливу прихованих відмов на міжремонтному інтервалі експлуатації РЕСВП розроблено метод визначення середнього значення ймовірності існування мінімального січення. Це дало змогу підвищити достовірність значень ймовірностей виникнення мінімальних січень, які складаються з комбінації прихованих і явних відмов або виключно з прихованих відмов. Якщо мінімальне січення містить тільки одну приховану відмову, то існуючі методи завищують ймовірність існування мінімального січення в 3,9 разів на початкових інтервалах планово – профілактичного обслуговування. При наявності в мінімальному січненні виключно прихованих

відмов існуючі методи взагалі не дають достовірного результату ймовірності існування мінімального січення.

2. Для синтезу стратегії технічного обслуговування РЕСВП з врахуванням впливу аварійних ситуацій на функціюготовності розроблено представлення процесу технічного обслуговування у вигляді системи масового обслуговування. Це дало змогу розробити математичну модель стратегії технічного обслуговування групи РЕСВП однією ремонтною бригадою з врахуванням: періодичності фази моніторингу прихованих відмов; середньої тривалості фази проведення планово – профілактичного обслуговування; періодичності фази проведення планово – профілактичного обслуговування; середньої тривалості фази проведення аварійно – відновлювальних робіт; швидкості переходу ремонтної бригади від планово – профілактичного обслуговування до аварійно – відновлювальних робіт; показники надійності обладнання. Врахування цих чинників дає змогу уникнути завищення значення коефіцієнта готовності до 30%.
3. Для синтезу стратегій технічного обслуговування із заданим рівнем безпечності розроблено ряд методик та алгоритмів, а саме
 - a. методика синтезу моделі стратегії технічного обслуговування групи РЕСВП у вигляді системи диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена;
 - b. методика дослідження функції готовності, ймовірності виникнення аварійної ситуації та функцій аварійності радіоелектронної системи відповідального призначення;
 - c. алгоритм розрахунку функції готовності РЕСВП за допомогою програмного забезпечення MatLab;
 - d. алгоритм автоматизації синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування та ремонту радіоелектронної системи відповідального призначення
4. Сукупність розроблених засобів (методик методів та методик) дасть змогу створити програмне забезпечення для автоматизованого синтезу стратегій технічного обслуговування, яка забезпечить заданий рівень заданий рівень готовності РЕСВП при мінімальному значенні ймовірності аварійної ситуації.

РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ БЕЗПЕЧНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА БАЗІ МАЖОРИТАРНОЇ СТРУКТУРИ

Для ефективного керування складними технічними системами (в зв'язку, атомній енергетиці, авіації, космічній галузі, наземному транспорті тощо) застосовують спеціалізовані інформаційно-керуючі системи. Така інформаційно-керуюча система належить до радіоелектронних систем відповідального призначення (РЕСВП). Особливість такої РЕСВП полягає в тому, що від її працездатності залежить безпечність експлуатації складної технічної системи, на якій вона встановлена. [150, 234].

Безпечність та надійність інформаційно-керуючих РЕСВП традиційно забезпечують використанням мажоритарних структур [150]. Це обґрунтовано тим, що даний різновид відмовостійких систем, крім високої надійності забезпечує високий рівень безпечності завдяки апаратному захисту від збоїв; відсутності перерв у роботі при відмові окремих модулів; простоті процедури контролю та діагностики для виявлення несправних модулів. Однак, втрата працездатності відмовостійкої РЕСВП з мажоритарною структурою призводить до втрати працездатності складної технічної системи, в склад якої входить РЕСВП, що тягне за собою тяжкі наслідки, пов'язані із значними матеріальними втратами, загибеллю людей, екологічними катастрофами тощо. Тому задача надійнісного синтезу відмовостійких РЕСВП з мажоритарною структурою, які входять в склад складних технічних систем, з високим ступенем функціональної безпечності залишається актуальною.

В переважній більшості сучасних РЕСВП, які виконують роль інформаційно-керуючих систем, використовується мажоритарна структура (МС) з фіксованим правилом прийняття рішення. Однак, в сучасних умовах, функціональну безпечність, яку вони забезпечують, є недостатньою. Введення додаткових засобів для підвищення функціональної безпечності знижує рівень надійності РЕСВП, і відповідно тривалість її безвідмовної експлуатації. Тому для подолання протиріччя між надійністю і безпечністю одним з найбільш перспективних методів

підвищення рівня функціональної безпечності складних технічних систем є підвищення надійності відмовостійкої РЕСВП з МС. Підвищення надійності відмовостійкої РЕСВП з МС, можна здійснювати трьома шляхами:

- Введенням реконфігурації мажоритарної структури (зміна правила голосування в МС). Це дає змогу здійснювати реконфігурацію МС при досягненні передаварійного стану і таким чином забезпечити довготривале функціонування з іншим правилом голосування мажоритарного елемента.
- Використанням в РЕСВП дворівневих мажоритарних структур. Це дозволяє підвищити рівень безпечності з одночасним підвищенням рівня надійності без зміни правила голосування мажоритарного елемента.
- Введенням структурного резервування у відмовостійку РЕСВП з МС та використання технічного обслуговування та ремонту, що дозволяє збільшити безвідмовність, термін експлуатації РЕСВП та не допускати простій складної технічної системи.

Однак, кількісно визначити на скільки кожен із вищезазначених способів підвищує надійність та безпечність відмовостійкої РЕСВП з МС за допомогою існуючих в практиці проектування моделей немає змоги, оскільки існуючі моделі враховують тільки одне певне фіксоване правило прийняття рішення мажоритарним елементом (наприклад 2 із 3-х, 4 із 7-ми, 5 із 9-ти тощо) [235]. Розв'язання таких завдань експериментальним шляхом не можливе в принципі, оскільки втрати (матеріальні, людські) при виникненні аварійної ситуації є, як правило, дуже суттєвими.

Тому для вирішення проблеми забезпечення заданого рівня функціональної безпечності РЕСВП з МС необхідно вирішити науково-прикладну задачу отримання аналітичних надійнісних моделей відмовостійких РЕСВП на основі мажоритарної структури, які дають змогу враховувати:

- поведінку відмовостійкої РЕСВП при втраченні працездатності її модулів;
- реконфігурацію мажоритарної структури, яка дозволяє враховувати зміну правила голосування;

- частоту попадання в аварійну ситуацію;
- стратегію аварійного відновлення;
- параметри засобів контролю, діагностики та комутації; ненадійність мажоритарного елемента;
- дворівневі мажоритарні структури (використання мажоритарних структур вкладених в мажоритарну структуру).

Крім цього необхідно ввести показники ефективності, які дадуть змогу оцінити функціональну безпечність РЕСВП з дворівневою МС і дадуть змогу вибрати найбільш доцільне співвідношення між засобами забезпечення безпечності і надійності. Справа в тому, що надмірне підвищення надійності складових системи призводить до суттєвого, в декілька разів, зростання вартості РЕСВП, а введення структурної надлишковості - збільшує масо-габаритні показники системи, що у багатьох випадках може бути критичним, а в деяких випадках (бортові системи, безпілотні літальні апарати тощо) і недопустимим.

Показники безпечності РЕСВП з МС. В якості показників безпечності для РЕСВП з МС пропонується використати два нових показники:

- ймовірність потрапляння РЕСВП в передаварійну ситуацію – $P_{pas}(t)$;
- частоту потраплянь в аварійну ситуацію – $W_{as}(t)$.

Ймовірність потрапляння в передаварійну ситуацію $P_{PAS}(t)$ – це сума ймовірностей перебування в передаварійних станах і наступна відмова хоча б одного елемента МС призведе до аварії РЕСВП і відповідно до аварії складної технічної системи в цілому. Даний показник необхідний для того, щоб оцінити потребу в реконфігурації або врахувати підчас формування стратегії технічного обслуговування.

$$P_{pas}(t) = \sum_{i=1}^x \{P_i(t)\}, \quad (4.1)$$

де x – кількість передаварійних станів

$P_i(t)$ – ймовірність перебування в i -му передаварійному стані.

Частота потраплянь в аварійну ситуацію $W_{as}(t)$ – це густина розподілу ймовірності для випадкових інтервалів часу, коли відмовостійка РЕСВП з МС і

відповідно складна технічна система потрапляє в аварійну ситуацію.

$$W_{as}(t) = \sum_{i=1}^x \{P_i(t) \cdot L_{i,F}\}, \quad (4.2)$$

де $P_i(t)$ – ймовірність перебування в i -му передаварійному стані.

$L_{i,F}$ – інтенсивності переходів з передаварійного стану i в аварійний стан F .

Для визначення ймовірності потрапляння РЕСВП в передаварійну ситуацію та частоти потрапляння в аварійну ситуацію із надійнісної моделі відмовостійкої системи з МС у вигляді графа станів та переходів вибираються лише ті працездатні стани, після яких відмовостійка РЕСВП з МС переходить в стан критичної відмови (аварійна ситуація на об'єкті).

Наприклад, на рис. 4.1 представлено граф станів і переходів відмовостійкої РЕСВП з МС. Стан F – стан катастрофічної відмови – аварійна ситуація. Передаварійними станами є працездатні стани $3, g, m, r, x$.

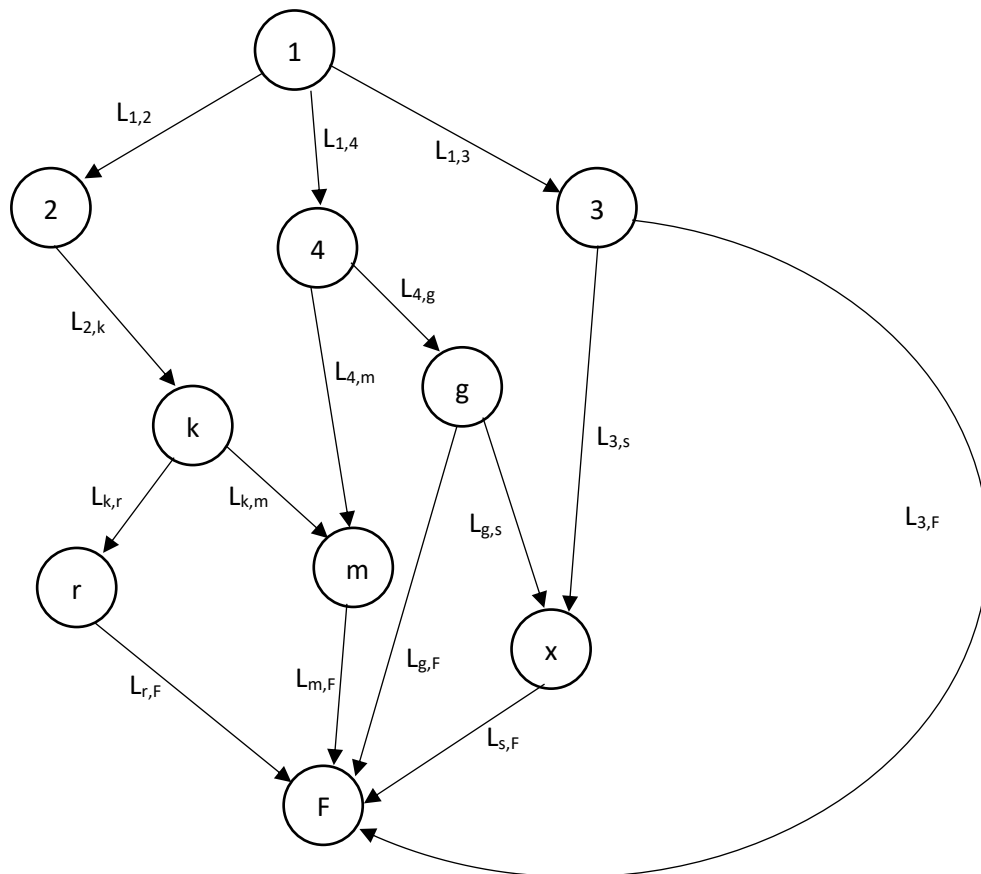


Рис.4.1. Стохастична модель РЕСВП у вигляді графа станів і переходів

Формула для визначення ймовірності потрапляння в передаварійну ситуацію буде мати наступний вигляд:

$$P_{pas}(t) = P_3(t) + P_g(t) + P_m(t) + P_r(t) + P_x(t) \quad (4.3)$$

Частота потрапляння у аварійну ситуацію визначається за такою формулою:

$$W_{as}(t) = P_3(t) \cdot L_{3,F} + P_g(t) \cdot L_{g,F} + P_m(t) \cdot L_{m,F} + P_r(t) \cdot L_{r,F} + P_x(t) \cdot L_{x,F}, \quad (4.4)$$

де $L_{j,F}$ – інтенсивність переходу із станів j ($j \in 3, g, m, r, x$) в стан відмови F .

Для РЕСВП з МС та правилом 2 із 3-х було проведено дослідження залежності частоти потрапляння в аварійну ситуацію від надійності елементів МС і надійності мажоритарного елемента. Інтенсивність відмов мажоритарного елемента (FR2) прийнята в 2 рази меншою від інтенсивностей відмов модулів (FR1) МС. Результати досліджень показано на рис. 4.2 в логарифмічному масштабі.

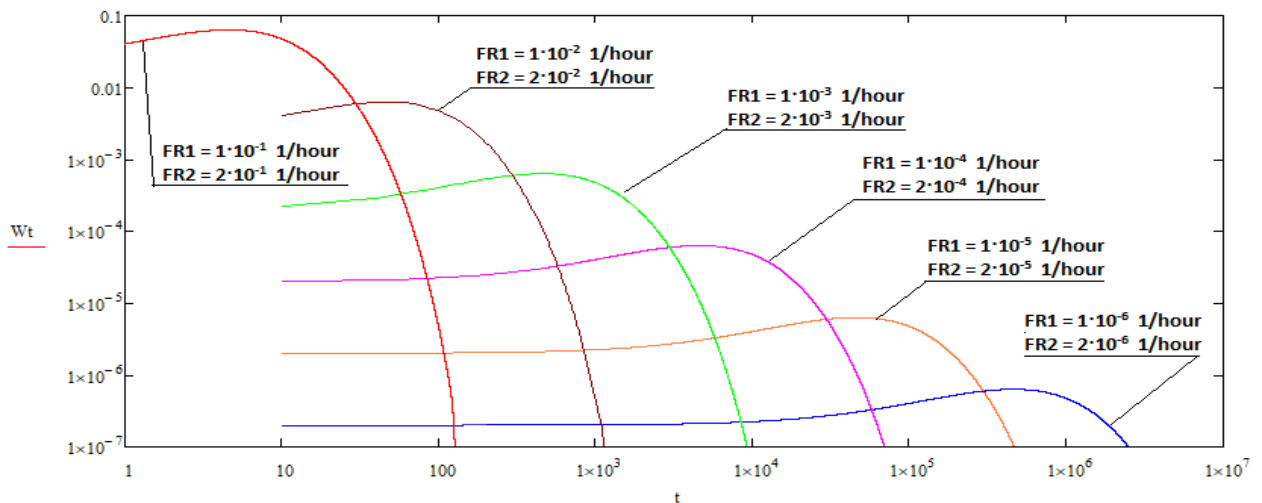


Рис.4.2. Залежності частоти потраплянь у аварійну ситуацію від тривалості експлуатації РЕСВП для шести значень інтенсивності відмов (FR) модулів МС

З рис. 4.2 видно, що збільшення надійності елементів РЕСВП з МС забезпечує зростання функціональної безпечності. Наприклад, на інтервалі часу експлуатації до 100 год, при зменшенні інтенсивності елементів, що входять в склад РЕСВП частота $W_{as}(t)$ зменшується з 10^{-2} до $3 \cdot 10^{-7}$.

Для забезпечення заданого рівня функціональної безпечності необхідно задатись граничним значенням частоти потраплянь в аварійну ситуацію на заданому проміжку експлуатації РЕСВП і визначити необхідний рівень надійності складових системи.

Збільшення надійності РЕСВП на базі МС без застосування структурного резервування, а відповідно зменшення $W_{as}(t)$ можна досягти здійснюючи

реконфігурацію мажоритарної структури або використовуючи дворівневі мажоритарні структури або/і вводячи технічне обслуговування і ремонт складових системи. Ознакою для здійснення реконфігурації буде перебування відмовостійкої РЕСВП з МС в передаварійному стані.

4.1. Синтез безпечних необслуговуваних радіоелектронних систем відповідального призначення на базі відмовостійкої системи з мажоритарною структурою і реконфігурацією

Для необслуговуваних РЕСВП функціональну безпечність забезпечують використанням відмовостійкої РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення і ковзним резервуванням модулів ядра [92, 152, 236 - 239].

В роботах [152, 240, 241] довготривала експлуатація відмовостійкої РЕСВП забезпечується описаними нижче процедурами реконфігурації МС. Відмовостійка РЕСВП із структурою типу «2 із 3» після відмови двох модулів ядра реконфігурує, після чого продовжує роботу останній працездатний модуль. Відмовостійка РЕСВП із структурою типу «3 із 5» після відмови трьох модулів ядра продовжує роботу, як відмовостійка РЕСВП з одним резервним модулем. При такій реалізації процедури реконфігурації, РЕСВП з МС втрачає позитивні якості мажоритарного принципу, а саме: захист від збоїв, що суттєво знижує рівень безпечності. При розроблені цих моделей прийнято допущення, що мажоритарний елемент є абсолютно надійним. Це, в свою чергу, робить надійність процедури реконфігурації також абсолютною, що знижує ступінь адекватності запропонованих моделей. До того ж в запропонованих моделях не враховується можливість використання ковзного резерву та зниження рівня безпечності системи через втрату апаратного захисту від збоїв в результаті реконфігурації.

Практичний інтерес має процедура реконфігурації МС, яка забезпечує збереження мажоритарного принципу при зменшенні кількості працездатних систем в ядрі. Однак у відомих публікаціях про відмовостійкі РЕСВП з МС відсутня модель для оцінювання ефективності такої процедури реконфігурації.

4.1.1. Відмовостійка радіоелектронна система відповідального призначення з реконфігурацією мажоритарної структури

До складу відмовостійкої РЕСВП на основі МС, структура якої представлена на рис. 4.3, входять: ядро МС, яке складають модулі робочої конфігурації (M_1, \dots, M_n); резервні модулі (M_1, \dots, M_k), які можуть перебувати в холодному чи гарячому резерві; адаптивний мажоритарний елемент (АМЕ); засіб контролю та діагностики у вигляді детектора розузгодження (ДР); комутаційний пристрій (КП). Початкова кількість модулів в ядрі МС може бути довільною але непарною з відповідним правилом прийняття рішення.

Адаптивний мажоритарний елемент порівнює сигнали від кожного модуля і подає на вихід згідно правила прийняття рішення. Для однозначного виявлення правильного сигналу кількість модулів в ядрі повинна бути непарною. Якщо кількість модулів в ядрі стає парною (внаслідок чергової відмови модуля в ядрі) КП по команді від ДР, відключає один модуль з ядра і переводить його в ковзний резерв. Після цього ДР подає команду в АМЕ про зміну правила прийняття рішення (голосування).

Виявлення порушення працездатності відмовостійкої РЕСВП з МС та локалізація несправного модуля в ядрі виконується за допомогою ДР. Детектор розузгодження здійснює порівняння на кожному такті видачі сигналу з виходу АМЕ із сигналом на виході кожного модуля. У випадку їх не співпадіння ДР видає сигнал про втрату працездатності модуля в ядрі. Після цього здійснюється відключення виявленої несправного модуля з ядра та підключення модуля з резерву (при його наявності). Серед модулів, які перебувають в резерві, перший до підключення перебуває в гарячому резерві, а всі інші – в холодному.

Переведення модуля в гарячий резерв в програмно-апаратних системах означає подачу напруги електроживлення і завантаження програмного забезпечення. Для резервних модулів передбачено контроль та діагностику. Надійність засобу контролю та діагностики (детектора розузгодження) в таких системах має бути значно вищою від надійності модулів, з яких формується відмовостійка РЕСВП.

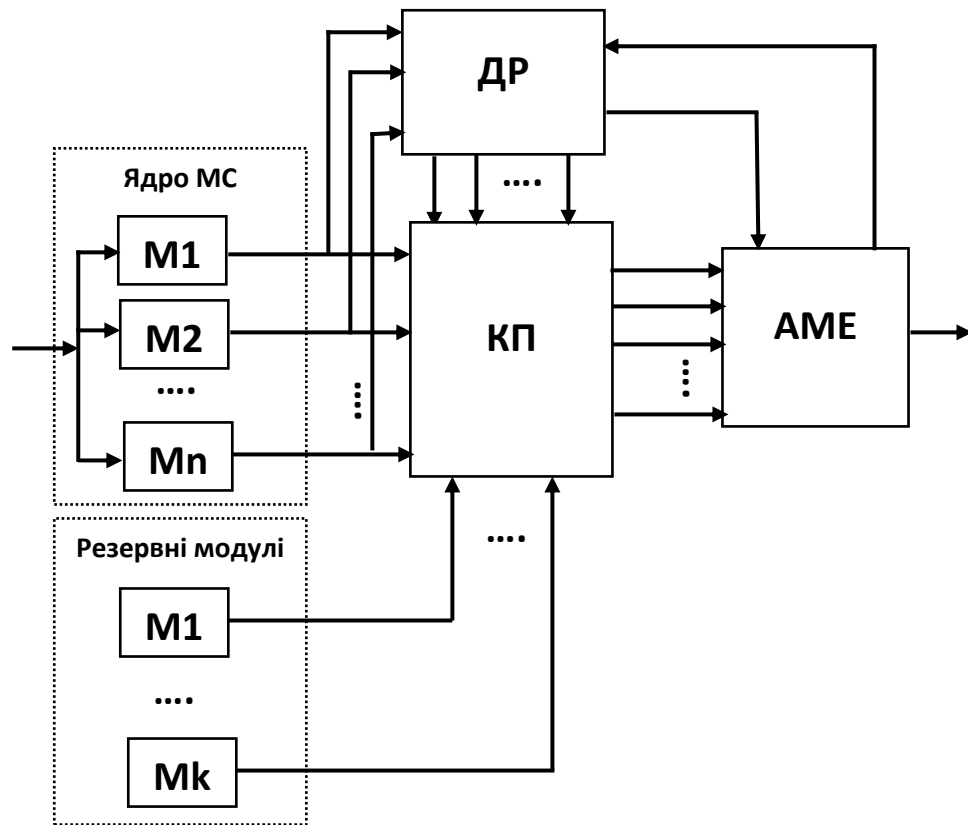


Рис. 4.3. Структурна схема відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури

4.1.2. Перелік процедур, що формують поведінку відмовостійкої РЕСВП, після відмови системи в ядрі мажоритарної структури

Процедура 1. Виявлення несправного модуля в ядрі МС та його відключення.

Процедура 2. Підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС. В цьому випадку виникає альтернатива підключення або не підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС. Така альтернатива виникає при врахуванні збою в роботі комутаційного пристрою. При не підключенні модуля в ядро кількість модулів резерву не змінюється. При наступній потребі заміни модуля в ядрі, він може бути підключений.

Процедура 3. Переведення модуля із холодного резерву в гарячий резерв. Тривалістю даної процедури визначається затратами часу на завантаження програмного забезпечення. В залежності від наявності збоїв дана процедура може бути успішною і неуспішною. Якщо процедура успішна, то модуль з холодного резерву переводиться в гарячий резерв. Якщо процедура неуспішна, то холодний

резерв зменшується на один модуль. В цьому випадку процедура 3 повторюється для переведення наступного резервного модуля в гарячий резерв

Процедура 4. Реконфігурація мажоритарної структури. Процедура здійснює зміну правила голосування в АМЕ і у відповідності до нового правила голосування (прийняття рішення) змінюється кількість модулів в ядрі МС.

В даному підрозділі розглядається реконфігурація МС, яка відбувається після першої відмови будь-якого модуля в ядрі, коли має місце не підключення модуля з резерву або вичерпано резерв. Детектор розузгодження, після виявлення порушення працездатності одного модуля в ядрі та визначення, що працездатність порушилась в результаті відмови, а не збою, подає сигнал в АМЕ про здійснення реконфігурації. Після цього один модуль переводиться в резерв, а в ядрі міняється правило прийняття рішення. Наприклад, якщо в ядрі 9 модулів і правило прийняття рішення було «5 із 9», то після реконфігурації в ядрі стає 7 модулів, а правило прийняття рішення змінюється на «4 із 7». Оскільки АМЕ не є абсолютно надійним, то виникає альтернатива проведення і не проведення реконфігурації МС. Якщо АМЕ виходить з ладу, то РЕСВП не може здійснити до реконфігурацію, однак залишається працездатною до того часу, поки в ядрі залишиться не менше ніж $((n-1)/2)$ модулів, де n – кількість модулів в ядрі і завжди непарне число.

4.1.3. Розроблення моделі відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури

Згідно поставленого завдання розроблено модель відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією МС. Розроблення моделі здійснена за технологією, поданою в [102], яка дає змогу автоматизувати розроблення графа станів та переходів, що важливо при розв'язанні задач багатоваріантного аналізу та параметричного синтезу. Практичне використання цієї технології забезпечує програмне забезпечення ASNA [103].

Дана технологія передбачає представлення об'єкта дослідження у вигляді структурно-автоматної моделі (САМ). Підчас розроблення САМ відмовостійкої РЕСВП здійснюється: визначення базових подій, що відбуваються у відмовостійкій

РЕСВП і обумовлені алгоритмом надійнісної поведінки; визначення компонент вектора станів; визначення умов та обставин, за яких відбуваються базові події; компонування формул розрахунку інтенсивностей переходів із стану в стан; формування правил модифікації компонент вектора стану відмовостійкої РЕСВП [102].

Визначення базових подій для структурно–автоматної моделі відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією ядра. З представлення поведінки відмовостійкої РЕСВП складається перелік подій, які можуть відбуватися в даній відмовостійкій системі. Події слід представляти парами, фіксуючи початок і закінчення відповідного часового інтервалу, який відповідає певному стану відмовостійкої РЕСВП. Події, що відбуваються у відмовостійкій РЕСВП, обумовлені її поведінкою, представлено в табл. 4.1. Аналіз поданих в таблиці подій дозволяє визначити базові події.

Таблиця 4.1 – Представлення пар подій, які фіксують початок і закінчення часового інтервалу перебування відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури в певному стані

Пор. № пари подій	Подія, яка фіксує початок часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Подія, яка фіксує закінчення часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Середнє значення часового інтервалу між подіями, [сек]
1	«Початок роботи системи»	«Відмова модуля в ядрі МС»	\bar{t}_1
2	«Початок роботи системи»	«Відмова резервного модуля (гарячий резерв)»	\bar{t}_2

Пор. № пари подій	Подія, яка фіксує початок часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Подія, яка фіксує закінчення часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Середнє значення часового інтервалу між подіями, [сек]
3	«Початок роботи системи»	«Відмова комутаційного пристрою»	\bar{t}_3
4	«Початок роботи системи»	«Відмова детектора розузгодження»	\bar{t}_4
5	«Початок роботи системи»	«Відмова адаптивного мажоритарного елемента»	\bar{t}_5
6	«Початок процедури виявлення несправного модуля в ядрі МС»	«Закінчення процедури виявлення несправного модуля в ядрі МС»	\bar{t}_6
7	«Початок процедури відключення несправного модуля з ядра»	«Закінчення процедури відключення несправного модуля з ядра»	\bar{t}_7
8	«Початок процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС»	«Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС»	\bar{t}_8
9	«Початок процедури переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв»	«Закінчення процедури переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв»	\bar{t}_9

Пор. № пари подій	Подія, яка фіксує початок часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Подія, яка фіксує закінчення часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Середнє значення часового інтервалу між подіями, [сек]
10	«Початок процедури реконфігурації МС»	«Закінчення процедури реконфігурації МС»	\bar{t}_{10}

Незалежними базовими подіями у відмовостійкій РЕСВП є: «Відмова модуля в ядрі МС», та «Відмова резервного модуля (гарячий резерв)». Іншими базовими подіями в моделі є події: «Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС»; «Закінчення процедури переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв»; «Закінчення процедури реконфігурації МС».

Отже підчас розроблення САМ в число базових мають бути включені наступні події:

- **Подія 1** «Відмова модуля в ядрі МС».
- **Подія 2** «Відмова резервного модуля (гарячий резерв)».
- **Подія 3** «Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС».
- **Подія 4** «Закінчення процедури переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв».
- **Подія 5** «Закінчення процедури реконфігурації МС».

Допущення прийняті в розробленій моделі відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури. Підчас розроблення моделі прийнято наступні допущення:

- Детектор розузгодження вважається безвідмовним. Це обґрунтовується тим, що тривалість його безвідмовної роботи є більшою ніж тривалість експлуатації РЕСВП. Крім цього надійність детектора розузгодження є

суттєво вищою від інших складових РЕСВП з МС.

- Інтенсивність збоїв програмного забезпечення модуля в моделях не враховується. Це обґрунтовується тим, що детектор розузгодження має вбудовані засоби тестування, які з ймовірністю 1 виявляють факт збою, а усунення його наслідків здійснюється шляхом перезавантаження програмного забезпечення.
- Інтенсивності збоїв та відмов є сталими в часі величинами. Це пояснюється тим, що тривалість всіх процесів, які відбуваються в РЕСВП мають експоненційний розподіл.

Параметри відмовостійкої РЕСВП, які відображені в моделі. При формуванні надійнішої моделі відмовостійкої РЕСВП її склад і окремі складові необхідно представити відповідними параметрами, а саме:

- n – початкова кількість модулів в ядрі МС;
- m – початкова кількість модулів холодного резерву;
- λ_n – інтенсивність відмов модуля в ядрі МС або в гарячому резерві;
- P_{res} – ймовірність успішного виконання процедури реконфігурації;
- P_h – ймовірність успішного підключення модуля з гарячого резерву в ядро;
- P_c – ймовірність успішного переведення модуля з холодного резерву в гарячий;
- T_h – середнє значення тривалості підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС;
- T_c – середнє значення тривалості переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв;
- T_{res} – середнє значення тривалості процедури реконфігурації МС.

Структура вектора стану відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури. Вектор стану відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією МС представлений наступними [225]:

V_1 – відображає поточну кількість працездатних модулів в ядрі (початкове значення компоненти V_1 дорівнює n);

V2 – відображає поточну кількість несправних модулів в ядрі (початкове значення компоненти V2 дорівнює нулю);

V3 – відображає наявність модуля в гарячому резерві: 1 – модуль наявний; 0 – модуль відсутній (початкове значення компоненти V3 встановлюється в 1 або 0 в залежності від досліджуваної структури);

V4 – відображає поточну кількість справних модулів в холодному резерві (початкове значення компоненти V4 дорівнює k);

V5 – відображає поточне значення мінімальної кількості модулів в ядрі, які необхідні для правильної роботи АМЕ (початкове значення компоненти V5 дорівнює $(n+1)/2$);

V6 – відображає поточне значення кількості модулів в ядрі, при якій відбувається процедура реконфігурації (початкове значення компоненти V6 дорівнює n-1);

V7 – ознака тимчасового стану. Ця компонента потрібна для того, щоб при визначенні станів не формувалися зайві стани. Значення V7 встановлюється в одиницю при події «Відмова модуля в ядрі» і скидається в нуль при події «Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС» (початкове значення компоненти V7 рівне нулю);

V8 – компонента, яка включає чи виключає процедуру реконфігурації: 1 – модель відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією МС; 0 – модель відмовостійкої РЕСВП без реконфігурації МС. Ця компонента забезпечує можливість формувати моделі відмовостійкої РЕСВП на основі МС без реконфігурації.

Визначення компонент дерева правил модифікації: умови і обставини та їх формалізоване представлення, формули розрахунку інтенсивності переходів, правила модифікації компонент вектора станів. Для побудови моделі базовими є визначені 5 подій. Наслідки, до яких призводить та чи інша подія, залежать від умов та обставин, при яких ця подія реалізується. Умова це складова опису ситуації, яка є обов'язковою для даної події. Обставина це складова опису ситуації, яка може супроводжувати, а може і не супроводжувати дану подію. Тому кожній базовій події ставлять у відповідність умови та обставини з множини умов та

обставин [225].

Базова подія 1 – «Відмова модуля в ядрі МС» може відбуватися *за умови*, що в ядрі є модулі ($V1 > 0$) та серед них немає модулів, які відмовили, але ще не були виявлені ДР ($V7 = 0$). Логічний вираз для такої ситуації має вигляд:

$(V1 > 0) \text{ AND } (V7 = 0)$.

Інтенсивність **події 1** для відповідних поточних станів визначається інтенсивністю відмови модуля λ_n і кількість працездатних модулів в поточному стані $V1$, а отже ФРІБП буде мати такий вигляд: $V1 \cdot \lambda_n$.

Наслідки при *базовій події 1.0* наступають без альтернативних переходів. Кількість працездатних модулів в ядрі зменшується $V1 := V1 - 1$, а кількість непрацездатних модулів в ядрі збільшується $V2 := V2 + 1$. При цьому за допомогою додаткової компоненти вектора стану забороняються всі події крім «Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС» $V7 := 1$. Отже, правило модифікації компонент вектора станів (ПМКВС) для даної ситуації записується наступним чином:

$V1 := V1 - 1; V2 := V2 + 1; V7 := 1$.

Базова подія 2 – «Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС» може відбутися *за умови*, що в ядрі є несправні модулі ($V2 > 0$). При цьому в ядрі є нелокалізований несправний модуль, за допомогою додаткової компоненти вектора стану забороняються всі події крім «Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС» ($V7 = 1$).

1-а обставина для базової події 2 – в гарячому резерві є модуль ($V3 = 1$). Логічний вираз для такої ситуації має наступний вигляд:

$(V2 > 0) \text{ AND } (V3 = 1) \text{ AND } (V7 = 1)$.

При цій обставині несправний модуль відключається, а його місце в ядрі поповнює модуль, що знаходиться в гарячому резерві. Інтенсивність **події 2** визначає інтервал часу, необхідний для підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС T_h . Отже, ФРІБП буде мати такий вигляд: $1/T_h$. Для цієї обставини існує альтернатива, яка залежить від того, підключився чи не підключився модуль в ядро з гарячого резерву. Ймовірність успішного підключення модуля з гарячого резерву в ядро P_h .

Наслідки *1-ої обставини події 2* визначають два альтернативні переходи:

- перший перехід відбувається з ймовірністю P_h і в результаті: кількість працездатних модулів в ядрі збільшується $V1:=V1+1$; кількість несправних модулів в ядрі зменшується $V2:=V2-1$; кількість працездатних модулів в гарячому резерві стає рівною нулю $V3:=0$; в ядрі немає модулів, що відмовили, але ще не були виявлені ДР $V7:=0$. Отже, ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V1:=V1+1; V2:=V2-1; V3:=0; V7:=0.$$

- другий перехід відбувається з ймовірністю $1-P_h$ і в результаті: кількість несправних модулів в ядрі зменшується $V2:=V2-1$; в ядрі немає модулів, що відмовили, але ще не були виявлені ДР $V7:=0$. Отже, ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V2:=V2-1; V7:=0.$$

2-а обставина для базової події 2 – в гарячому резерві немає модуля ($V3=0$).

Логічний вираз для такої ситуації має наступний вигляд:

$$(V2>0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V7=1).$$

Інтенсивність *події 2* визначає інтервалу часу, необхідний для підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС T_h . Отже, ФРІБП буде мати такий вигляд:

$$1/T_h.$$

Наслідки *базової події 2 при 2-ій обставині* наступають без альтернативних переходів. Кількість несправних модулів в ядрі зменшується $V2:=V2-1$ і в ядрі немає модулів, що відмовили, але ще не були виявлені ДР $V7:=0$.

Отже, ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V2:=V2-1; V7:=0.$$

Базова подія 3 – «Закінчення процедури переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв», може відбутися за умови, що в гарячому резерві немає модуля ($V3=0$), а в холодному резерві є модуль ($V4>0$), в ядрі немає модулів, які відмовили, але ще не були виявлені ДР ($V7=0$). Логічний вираз для такої ситуації має вигляд:

$$(V3=0) \text{ AND } (V4>0) \text{ AND } (V7=0).$$

Інтенсивність події 3.0 визначає інтервал часу, необхідний для переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв T_c . ФРІБП буде мати такий вигляд: $1/T_c$. Для цієї події існує альтернатива, яка залежить від того, підключився чи не підключився модуль в гарячий резерв з холодного резерву. Ймовірність успішного переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв P_c .

Наслідки для події 3.0 визначають два альтернативні переходи:

- перший перехід відбувається з ймовірністю P_c ; в результаті фіксується наявність модулів в гарячому резерві $V3:=1$; кількість модулів холодного резерву зменшується $V4:=V4-1$. ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V3:=1; V4:=V4-1.$$

- другий перехід відбувається з ймовірністю $1-P_c$ і в результаті: кількість модулів холодного резерву зменшується $V4:=V4-1$. ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V4:=V4-1.$$

Базова подія 4 – «Відмова резервного модуля (гарячий резерв)», може відбутися за умови, що в гарячому резерві є працездатні модулі ($V3=1$).

Інтенсивність події 4 для відповідних поточних станів визначає інтенсивність відмови модуля λ_n , а ФРІБП буде мати такий вигляд: λ_n .

Наслідки базової події 4 настають без альтернативних переходів. Фіксується відсутність модулів в гарячому резерві. ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V3:=0.$$

Базова подія 5 – «Закінчення процедури реконфігурації МС» може відбутися за умови, що в ядрі немає модулів, які відмовили але не були виявлені ($V2=0$); в ядрі стало $(n-1)$ модулів, тобто ($V1=V6$) і їх кількість є більше або рівне трьом ($V1 \geq 3$); при цьому компонента $V8=1$.

І-а обставина для базової події 5 – в гарячому резерві немає модуля ($V3=0$). Логічний вираз для такої ситуації має наступний вигляд:

$$(V1=V6) \text{ AND } (V1 \geq 3) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V8=1).$$

При цій обставині кількість модулів ядра зменшується, один модуль з ядра переводиться в гарячий резерв, а в АМЕ відбувається зміна прийняття рішення(голосування).

Інтенсивність події 5.0 визначається інтервалом часу необхідного для процедури реконфігурації T_{rec} . Отже, ФРІБП буде мати такий вигляд: $1/T_{rec}$. Для цієї обставини існує альтернатива, яка залежить від того, відбулась чи не відбулась процедура реконфігурації МС. Ймовірність успішного проведення процедури реконфігурації МС P_{rec} .

Наслідки 1-ої обставини події 5.0 визначають два альтернативні переходи:

- перший перехід відбувається з ймовірністю P_{rec} і в результаті: кількість працездатних модулів в ядрі зменшується $V1:=V1-1$; кількість модулів в гарячому резерві збільшується $V3:=1$; кількість модулів в ядрі, при якій відбудеться наступна процедура реконфігурації змінюється $V6:=V6-2$. ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V1:=V1-1; V3:=1; V6:=V6-2.$$

- другий перехід відбувається з ймовірністю $1-P_{rec}$ і в результаті: кількість працездатних модулів в ядрі зменшується $V1:=V1-1$; кількість несправних модулів в ядрі збільшується $V2:=V2+1$; при цьому за допомогою додаткової компоненти вектора стану забороняються всі події крім «Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС» $V7:=1$. ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V1:=V1-1; V2:=V2+1; V7:=1.$$

2-а обставина для базової події 5 – в гарячому резерві є модуль ($V3=1$). Логічний вираз для такої ситуації має наступний вигляд:

$$(V1=V6) \text{ AND } (V1 \geq 3) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=1) \text{ AND } (V8=1).$$

При цій обставині кількість модулів ядра зменшується, один модуль з ядра переводиться в холодний резерв, а в АМЕ відбувається зміна правила голосування.

Інтенсивність події 5.0 визначається інтервалом часу необхідного для процедури реконфігурації T_{rec} . Отже, ФРІБП буде мати такий вигляд: $1/T_{rec}$. Для цієї обставини існує альтернатива, яка залежить від того, відбулась чи не відбулась

процедура реконфігурації МС. Ймовірність успішного проведення процедури реконфігурації МС P_{rec} .

Наслідки *1-ої обставини події 5* визначають два альтернативні переходи:

- перший перехід відбувається з ймовірністю P_{rec} і в результаті: кількість працездатних модулів в ядрі зменшується $V1:=V1-1$; кількість модулів в холодному резерві збільшується $V4:= V4+1$; кількість модулів в ядрі, при якій відбудеться наступна процедура реконфігурації змінюється $V6:=V6-2$. ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V1:=V1-1; V4:= V4+1; V6:=V6-2.$$

- другий перехід відбувається з ймовірністю $1-P_{rec}$ і в результаті: кількість працездатних модулів в ядрі зменшується $V1:=V1-1$; кількість несправних модулів в ядрі збільшується $V2:=V2+1$; при цьому за допомогою додаткової компоненти вектора стану забороняються всі події крім «Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС» $V7:=1$. ПМКВС для даної ситуації записується наступним чином:

$$V1:=V1-1; V2:=V2+1; V7:=1.$$

Формування критерію аварійної ситуації (критичної відмови) у відмовостійкій РЕСВП. Критерієм виникнення аварійної ситуації є умова, коли кількість працездатних модулів в ядрі, є меншою від мінімальної кількості модулів в ядрі, які необхідні для правильної роботи АМЕ:

$$(V1 < V5).$$

Розроблена структурно-автоматна модель, як формалізоване представлення об'єкта дослідження представлена в табл. 1 Додатку А. Ця САМ є вхідними даними для програмного забезпечення ASNA, яке автоматизовано будує граф станів і переходів, на основі якого сформовано систему диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена. Після цього за допомогою програмного забезпечення MathCAD або MathLab чисельним методом визначено показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі експлуатації та середнє значення тривалості безвідмовної роботи) відмовостійкої РЕСВП.

Математична модель відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури. Математична модель відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури, з першим варіантом умови запуску процедури, представлена у вигляді системи лінійних однорідних диференціальних рівнянь першого порядку (4.5). Математична модель формується згідно графа станів і переходів, який має такі параметри: 29 станів та 79 переходів.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dP_1(t)}{dt} = -7\lambda \cdot P_1(t) \\
 \dots\dots\dots \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} = -6 \cdot \lambda \cdot P_4(t) + \frac{P_{rec}}{T_{rec}} \cdot P_3(t) \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} = -\frac{1}{T_h} \cdot P_5(t) + \frac{1-P_{rec}}{T_{rec}} \cdot P_3(t) \\
 \frac{dP_6(t)}{dt} = -\left(\frac{P_h}{T_h} + \frac{1-P_h}{T_h}\right) \cdot P_6(t) + 5\lambda \cdot P_4(t) \\
 \frac{dP_7(t)}{dt} = -5\lambda \cdot P_7(t) + \lambda \cdot P_4(t) + \frac{P_h}{T_h} \cdot P_6(t) \\
 \frac{dP_8(t)}{dt} = -\left(\lambda + \frac{P_{rec}}{T_{rec}} + \frac{1-P_{rec}}{T_{rec}}\right) \cdot P_8(t) + \frac{1-P_h}{T_h} \cdot P_6(t) \\
 \frac{dP_9(t)}{dt} = -5\lambda \cdot P_9(t) + \frac{1}{T_h} \cdot P_5(t) \\
 \frac{dP_{10}(t)}{dt} = -\left(\frac{P_{rec}}{T_{rec}} + \frac{1-P_{rec}}{T_{rec}}\right) \cdot P_{10}(t) + \lambda \cdot P_8(t) + \frac{P_h}{T_h} \cdot P_{14}(t) + \frac{1}{T_h} \cdot P_{15}(t) \\
 \dots\dots\dots \\
 \frac{dP_{29}(t)}{dt} = -\frac{1}{T_h} \cdot P_{29}(t) + 3\lambda \cdot P_{20}(t)
 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

4.1.4. Методика надійнісного синтезу відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури за допомогою розробленої моделі

Методика надійнісного синтезу відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури за допомогою розробленої моделі складається з п'яти послідовних кроків:

1. Визначення ефективності процедури реконфігурації МС.
2. Визначення граничних значень ймовірності успішного проведення процедури

реконфігурації для моделі відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією МС.

3. Визначення ефективності резервування відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією МС, при різних значеннях ймовірності успішного підключення модуля з гарячого резерву в ядро та ймовірності успішного переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв.
4. Порівняльний аналіз ймовірності виникнення передаварійної ситуації радіоелектронної системи відповідального призначення для різних варіантів реалізації відмовостійкої структури
5. Порівняльний аналіз середнього значення частоти попадання в аварійну ситуацію відмовостійкої системи, для різних варіантів реалізації відмовостійкої системи

Докладний опис кожного пункту методики з ілюстрацією її застосування на конкретному прикладі приведено нижче.

Визначення ефективності процедури реконфігурації МС. Для вибору правила реконфігурації необхідно провести дослідження ефективності реконфігурації. Такі дослідження виконано при наступних значеннях початкової кількості модулів в ядрі $n = (5, 7, 9)$. Результати дослідження представлено на рис. 4.4.

Дослідження показують на скільки застосування відмовостійкої РЕСВП з процедурою реконфігурації МС в порівнянні з відмовостійкою РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення покращує надійність представлену середнім значенням тривалості роботи до катастрофічної відмови: для відмовостійкої РЕСВП з правилом голосування «5 з 9» в 2,4 рази (або на 140%); для відмовостійкої РЕСВП з правилом голосування «4 із 7» в 2,1 рази (або на 110%); для відмовостійкої РЕСВП з правилом голосування «3і з 5» в 1,6 рази (або на 60%).

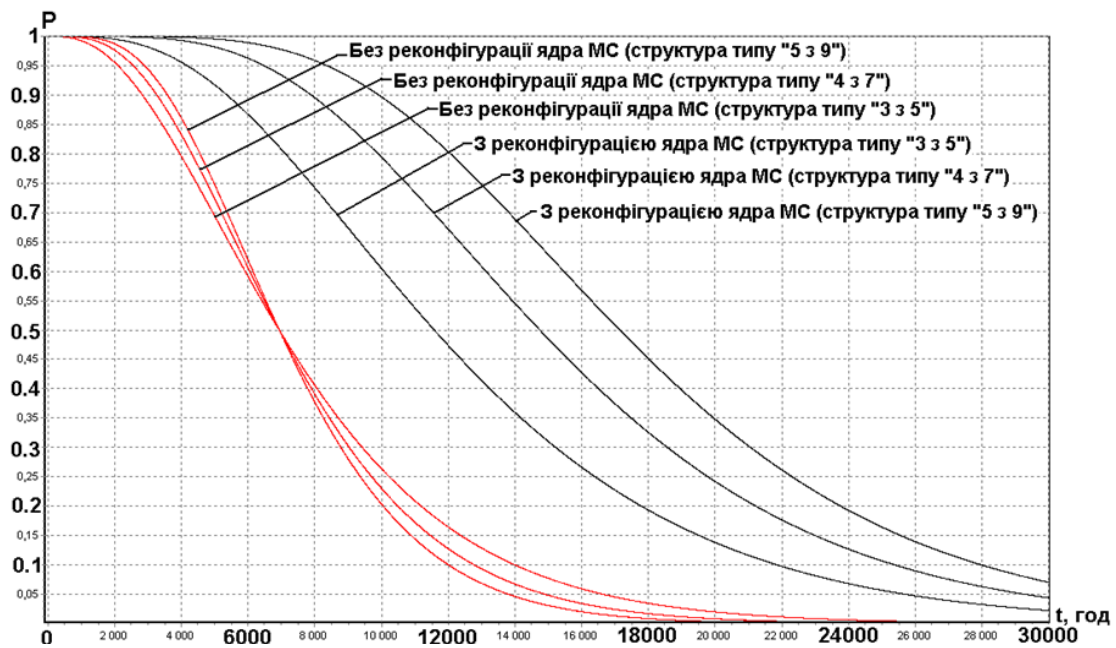


Рис. 4.4. Залежності ймовірності безвідмовної роботи РЕСВП від тривалості експлуатації з використанням МС без реконфігурації і з реконфігурацією

Визначення граничних значень ймовірності успішного проведення процедури реконфігурації для моделі відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією МС. Дослідження проводилися для відмовостійкої РЕСВП з початковою кількістю модулів в ядрі $n = 7$, ймовірність успішного виконання процедури реконфігурації МС P_{rec} змінювалася в межах від 0,5 до 0,999.

Проведені дослідження показали (рис. 4.5 і 4.6), що для забезпечення високої надійності необслуговуваних РЕСВП, ймовірність успішного виконання процедури реконфігурації МС повинна бути не нижче $P_{\text{rec}} = 0,99$. Використання більш надійного АМЕ для досліджуваної відмовостійкої РЕСВП не дає збільшення середнього значення тривалості безвідмовної роботи РЕСВП та ймовірності безвідмовної роботи.

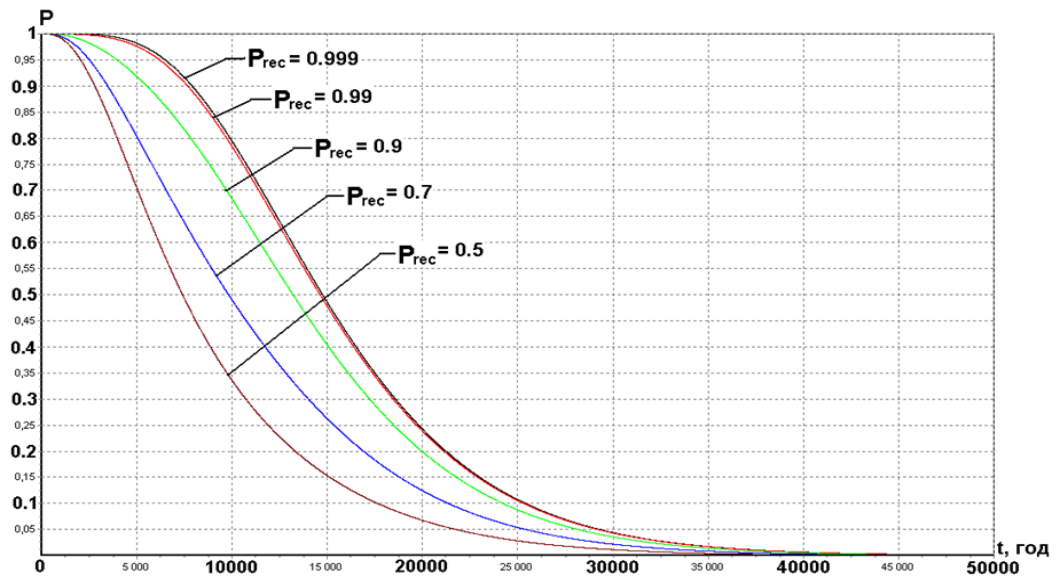


Рис. 4.5. Залежності ймовірності безвідмовної роботи РЕСВП від тривалості експлуатації та ймовірності успішної реконфігурації

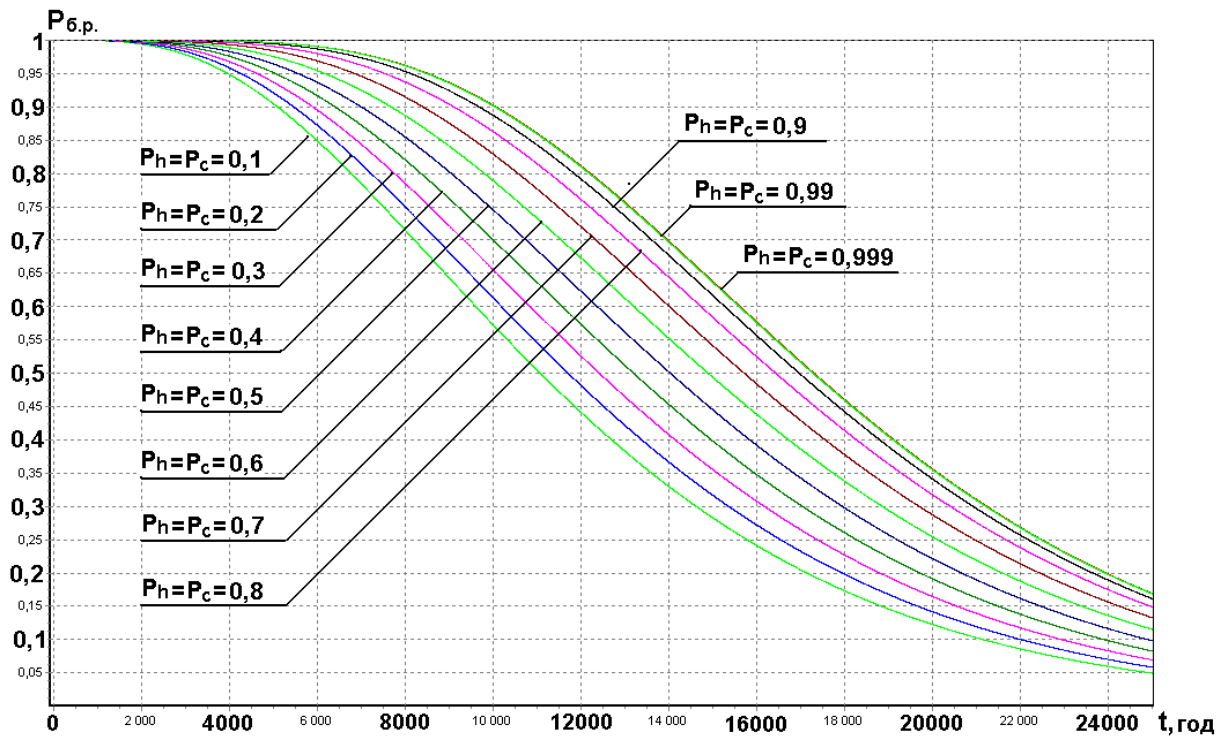


Рис. 4.6. Залежність ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією ядра МС при різних значеннях ймовірності успішного підключення модуля з гарячого резерву в ядро та ймовірності успішного переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв

Ефективність резервування відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією МС, при різних значеннях ймовірності успішного підключення модуля з гарячого резерву в ядро та ймовірності успішного переведення модуля з холодного резерву

в гарячий резерв. Проведені дослідження РЕСВП (з початковою кількістю модулів в ядрі $n = 7$, значенням ймовірностей успішного підключення модуля в ядро та успішного переведення модуля з холодного резерву в гарячий в межах від 0,1 до 0,999) показали (рис. 4.6 і табл. 4.2), що для забезпечення високої надійності необслуговуваної РЕСВП, значення ймовірностей успішного підключення модуля в ядро та успішного переведення модуля з холодного резерву в гарячий повинні бути не нижче 0,99. Подальше підвищенні вимог до комутуючого пристрою не дає суттєвого покращення показників надійності.

Таблиця 4.2 – Залежність середнього значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП від значення ймовірності успішного підключення модуля в ядро

$P_h=P_c$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,99	0,999
$T_c,$ год	12135	12939	13630	14387	15195	16026	16829	17533	18067	18376	18399

Порівняльний аналіз ймовірності виникнення передаварійної ситуації радіоелектронної системи відповідального призначення для різних варіантів реалізації мажоритарної структури. Безпечність РЕСВП залежить від вибору як від початкової конфігурації відмовостійкої системи з МС (до реконфігурації) так і від її кінцевої конфігурації (після процедури реконфігурації), коли змінено правило голосування і кількість модулів у МС зменшується. Хоча, після реконфігурації відмовостійка система не потрапляє в аварійну ситуацію, ймовірність потрапляння у передаварійну - $P_{pas}(t)$ зростає. Нижче проведено дослідження функціональної безпечності РЕСВП для різних варіантів конфігурації відмовостійкої системи. Це дасть змогу оцінити показники безпечності до і після реконфігурації МС.

Як було сказано на початку розділу для визначення частоти потрапляння РЕСВП в передаварійну ситуацію із генерованого графа станів та переходів вибираються лише ті стани, після яких відмовостійка РЕСВП з МС переходить в стан критичної відмови. Дана функція розраховується як сума ймовірностей

перебування відмовостійкої системи в передаварійних працездатних станах. На основі згенерованих графа станів та переходів для кожної з чотирьох конфігурації відмовостійкої системи, ймовірності виникнення передаварійної ситуації визначаються за наступними формулами:

Відмовостійка система з мажоритарною структурою «2 із 3»:

$$P_{pas}(t) = P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t)$$

Відмовостійка система з мажоритарною структурою «3 із 5»:

$$P_{pas}(t) = P_5(t) + P_6(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t)$$

Відмовостійка система з мажоритарною структурою «4 із 7»:

$$P_{pas}(t) = P_7(t) + P_8(t) + P_{15}(t) + P_{16}(t)$$

Відмовостійка система з мажоритарною структурою «5 із 9»:

$$P_{pas}(t) = P_9(t) + P_{10}(t) + P_{19}(t) + P_{20}(t)$$

Результати дослідження наведені на рис. 4.7.

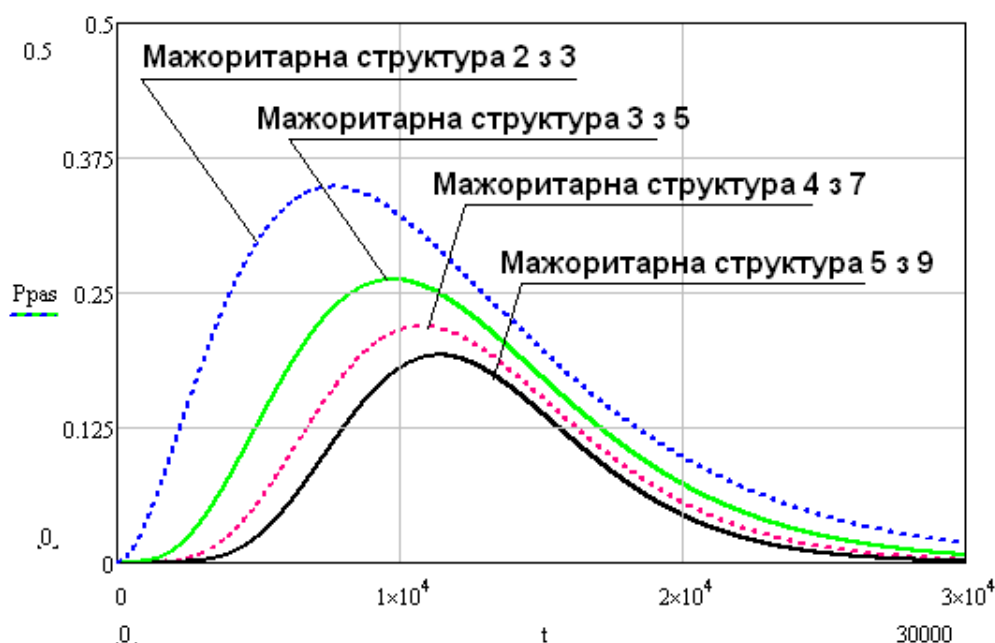


Рис. 4.7. Залежність ймовірності потрапляння в передаварійні стани та частоти попадання відмовостійкої РЕСВП в аварійну ситуацію

Як видно з рисунка із збільшенням кількості модулів у ядрі МС ймовірність потрапляння у передаварійну ситуацію зменшується, а відповідно функціональна безпека такої відмовостійкої РЕСВП зростає. При цьому також зростають її вартість та масо – габаритні показники.

Порівняльний аналіз середнього значення частоти попадання в аварійну ситуацію відмовостійкої системи, для різних варіантів реалізації відмовостійкої системи. Для визначення показника функціональної безпечності - середнього значення частоти попадання в аварійну ситуацію відмовостійкої РЕСВП із генерованого графа станів та переходів вибираються лише ті стани після яких відмовостійка система переходить в стан критичної відмови та інтенсивності переходів у цей стан.

На основі рішень систем диференціальних рівнянь з різними варіантами мажоритарної структури складено формули для розрахунку залежності середнього значення частоти попадання в аварійну ситуацію. Дана функція розраховується як сума добутків ймовірностей перебування відмовостійкої системи в передаварійних працездатних станах та інтенсивності переходу в аварійний стан. На основі згенерованих графів станів та переходів, середнє значення частоти попадання РЕСВП в аварійну ситуацію для 4-х реалізацій відмовостійкої системи визначаються за наступними формулами:

Відмовостійка система з мажоритарною структурою «2 із 3»:

$$W_{as}(t) = \lambda_3 \cdot P_3(t) + \lambda_4 \cdot P_4(t) + \lambda_5 \cdot P_5(t) + \lambda_6 \cdot P_6(t)$$

Відмовостійка система з мажоритарною структурою «3 із 5»:

$$W_{as}(t) = \lambda_5 \cdot P_5(t) + \lambda_6 \cdot P_6(t) + \lambda_{11} \cdot P_{11}(t) + \lambda_{12} \cdot P_{12}(t)$$

Відмовостійка система з мажоритарною структурою «4 із 7»:

$$W_{as}(t) = \lambda_7 \cdot P_7(t) + \lambda_8 \cdot P_8(t) + \lambda_{15} \cdot P_{15}(t) + \lambda_{16} \cdot P_{16}(t)$$

Відмовостійка система з мажоритарною структурою «5 із 9»:

$$W_{as}(t) = \lambda_9 \cdot P_9(t) + \lambda_{10} \cdot P_{10}(t) + \lambda_{19} \cdot P_{19}(t) + \lambda_{20} \cdot P_{20}(t)$$

Результати дослідження 4-х реалізацій відмовостійкої системи наведені на рис. 4.8. З рисунка видно, що при збільшенні кількості модулів в ядрі МС величина W_{as} зменшується при конкретному значенні тривалості експлуатації (наприклад, $t = 0,5 \cdot 10^4$ год на рис.4.8) і її максимум пересувається вправо. Це збільшує тривалість роботи РЕСВП до потрапляння в аварійний стан.

4.2. Синтез необслуговуваних відмовостійких радіоелектронних систем відповідального призначення на базі використання дворівневих мажоритарних структур

На сьогоднішній день питання безпеки сучасних складних технічних систем, які містять інформаційно-керуючі системи, що обслуговуються один раз на десятки чи сотні застосувань, стоїть дуже гостро. Такі інформаційно-керуючі системи, з точки зору надійності, можна віднести до необслуговуваних систем. Висока відповідальність виконуваних ними функцій, розширення умов експлуатації, їх ускладнення накладають підвищені вимоги до їх функціональної безпеки.

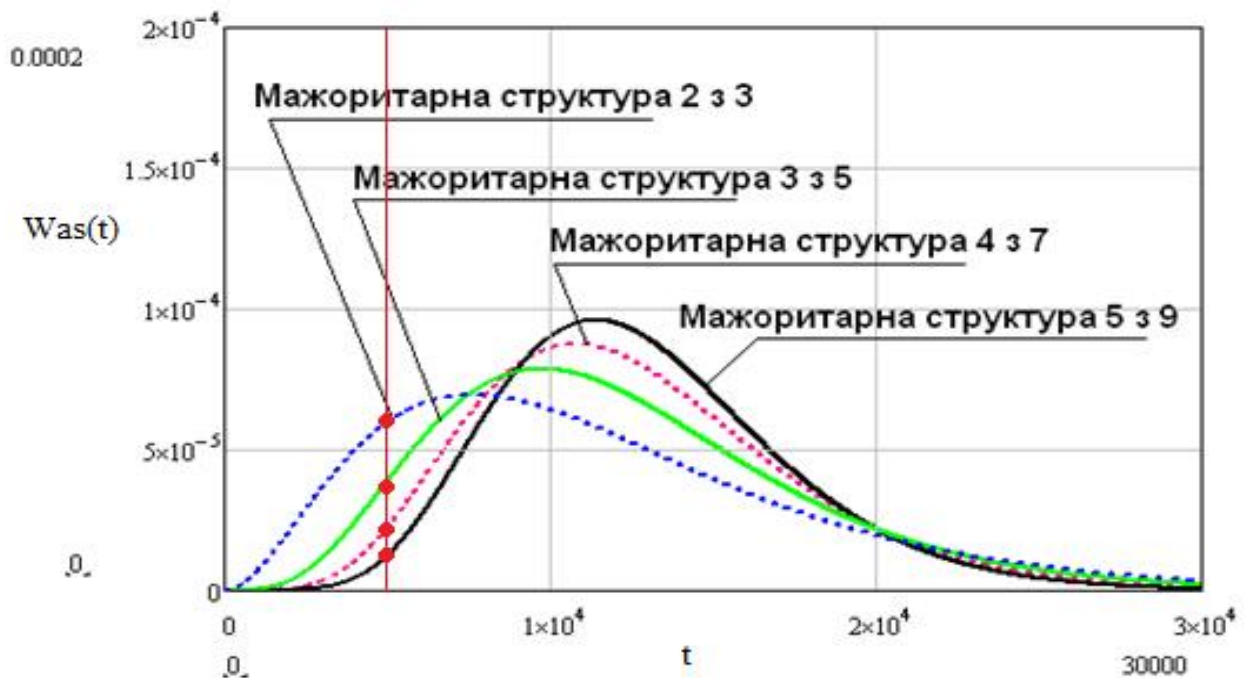


Рис. 4.8. Залежність ймовірності потрапляння в перед аварійні стани від тривалості її експлуатації для 4-х варіантів реалізації правила голосування

Як вже було сказано, у якості інформаційно-керуючої системи застосовуються відмовостійкі РЕСВП з МС, а тому їх функціональна безпека визначається їх надійністю. Таким чином, найбільш важливим в забезпеченні функціональної безпеки відмовостійкої РЕСВП з МС є підвищення її безвідмовності на заданому (необхідному) інтервалі часу експлуатації. Тому на етапі системотехнічного проектування важливим є вибір відмовостійкої системи з МС,

яка б забезпечувала необхідну надійність та функціональну безпечність РЕСВП без технічного обслуговування та ремонту.

Для забезпечення високого рівня надійності РЕСВП, в роботах [236, 242, 243] показана структурна схема відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, яку в цих публікаціях називають «відмовостійка система з паралельно-гібридним резервуванням». До складу системи входить: N ядер, кожне з яких містить M робочих блоків (технічних систем) та мажоритарний елемент. Такі відмовостійкі РЕСВП використовують при проектуванні систем логічного управління.

Однак у відомих публікаціях [236, 242, 243], в яких розглядаються задачі проектування відмовостійких систем, відсутні моделі відмовостійкої системи з використанням дворівневих мажоритарних структур. Тому задача розроблення моделей для оцінювання функціональної безпечності таких відмовостійких РЕСВП з МС є актуальною. В плані вирішення поставленої задачі розроблено модель відмовостійкої РЕСВП з МС, в якій граничну тривалість перебування в працездатному стані визначає правило: відмовостійка РЕСВП втрачає працездатність після критичної відмови двох відмовостійких систем нижчого рівня. Відмовостійкі системи нижчого рівня в подальшому будемо називати модулями. Ця модель враховує появу в ході експлуатації ковзного резерву, який формується з працездатних модулів, що залишилися після відмови ядра або 2-х модулів в одному ядрі.

Основною перевагою таких відмовостійких РЕСВП є те, що вони забезпечують високий рівень надійності не змінюючи при цьому правила голосування мажоритарного елементау, що є особливо важливим для критичних інфраструктур [150, 234].

4.2.1. Конфігурація відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур

До складу відмовостійкої РЕСВП, структурна схема якої представлена на рис. 4.9 входить: три ядра, в складі кожного є по 3 модуля; резервні модулі, що з'являються

в процесі роботи відмовостійкої РЕСВП; перший детектор розузгодження для виявлення несправних модулів ($ДР_1$); другий детектор розузгодження для

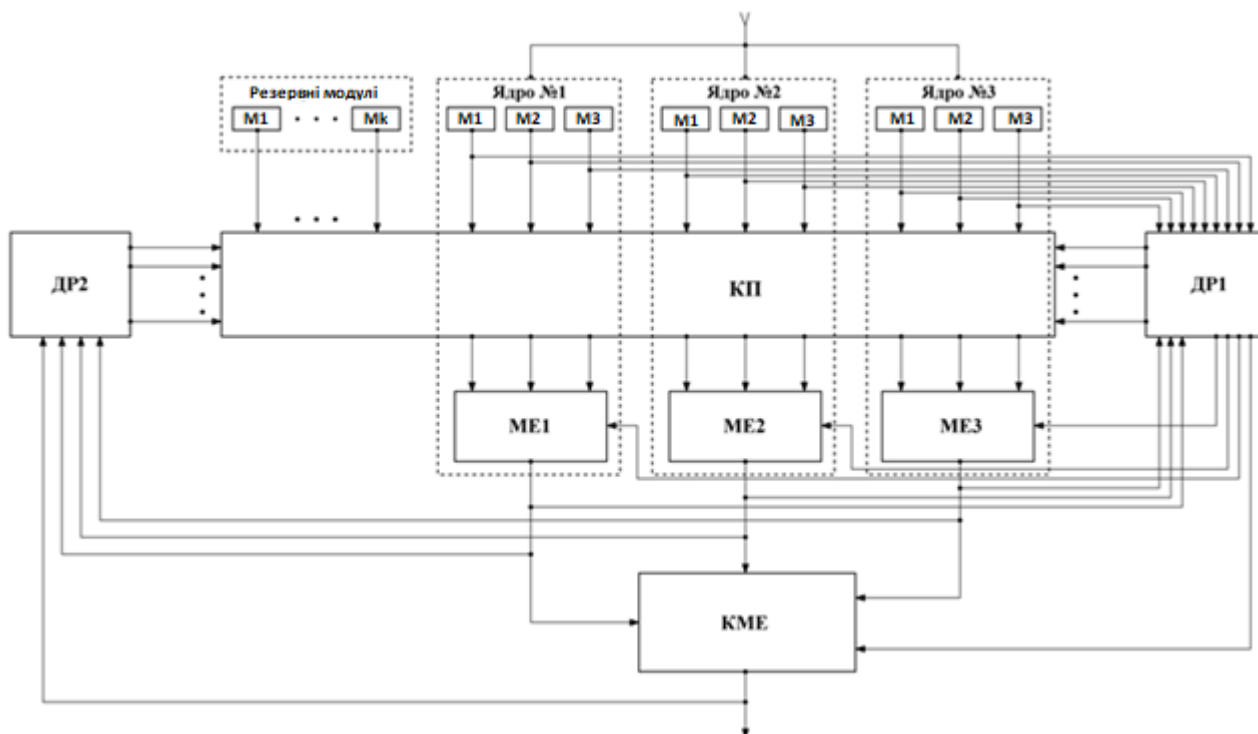


Рис. 4.9. Структурна схема відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур

виявлення несправних ядер ($ДР_2$); мажоритарні елементи для 1-го, 2-го та 3-го ядер ($МЕ_1$, $МЕ_2$, $МЕ_3$); кінцевий мажоритарний елемент ($КМЕ$); комутаційний пристрій. Відповідно з виходів кожного мажоритарного елемента сигнал надходить на $КМЕ$. Початкова кількість модулів в кожному ядрі рівна трьом, правило прийняття рішення в кожному мажоритарному елементі є фіксованим. Особливістю поведінки такої відмовостійкої РЕСВП є два етапи локалізації несправних модулів: локалізація всередині ядра і локалізація на рівні ядра. Нижче докладно розкрито обидва етапи.

Локалізація несправного модуля в ядрі. Контроль працездатності модулів в ядрі виконується за допомогою $ДР_1$. Цей детектор розузгодження здійснює порівняння на кожному такті видачі сигналу з виходу мажоритарного елемента ядра ($МЕ_1$, $МЕ_2$, $МЕ_3$) із сигналом з виходу кожного модуля. Не співпадіння сигналу одного модуля з сигналом на виході $МЕ$ у переважній більшості випадків свідчить про збій у програмному забезпеченні цього модуля, оскільки інтенсивність збоїв

перевищує інтенсивність відмов. При виявленні не співпадіння запускається процедура тестування модуля. Якщо процедура тестування виявляє факт збою, здійснюється перезавантаження програмного забезпечення модуля і він продовжує роботу в складі ядра. Якщо ні, то ДР₁ видає сигнал про втрату працездатності модуля в ядрі. Після цього здійснюється відключення виявленої несправного модуля з ядра та підключення модуля з резерву (при його наявності).

Локалізація несправного ядра відмовостійкої РЕСВП. Контроль працездатності ядер відмовостійкої РЕСВП виконується за допомогою ДР₂. Цей детектор розузгодження здійснює порівняння сигналів з виходів МЕ₁, МЕ₂, МЕ₃ з сигналом КМЕ. При їх не співпадінні, ДР₂ видає сигнал про втрату працездатності відповідного ядра відмовостійкої РЕСВП, яка наступила внаслідок недостатньої кількості модулів для правильної роботи ядра, тобто коли в ядрі залишається один справний модуль, або внаслідок відмови мажоритарного елемента (МЕ₁, МЕ₂, МЕ₃). Після цього здійснюється процедура переведення справних модулів, що залишились в ядрі, в резерв або в інші ядра, де кількість модулів є меншою від початкової.

4.2.2. Перелік процедур, які визначають поведінку відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних після відмови модуля або мажоритарного елемента

Процедура 1. Виявлення несправного модуля в ядрі та його відключення.

Процедура 2. Переведення справних модулів з ядра в ковзний «холодний» резерв. Ця процедура запускається після відмови мажоритарного елемента, а також у випадку, коли в ядрі залишилась один справний модуль.

Процедура 3. Переведення справного модуля з одного ядра в інше. Процедура передбачає переведення справних модулів з ядра, що відмовило, в інші ядра, де кількість модулів є меншою від початкової.

Процедура 4. Підключення резервного модуля в ядро. Ця процедура характеризується тривалістю, яку визначає затрата часу на завантаження програмного забезпечення в модуля.

4.2.3. Опис особливостей поведінки відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, обумовлених наявністю програмного забезпечення

- Щоб уникнути однотипних збоїв в модулів одного ядра, програмне забезпечення для них розробляється в трьох варіантах різними розробниками (програмістами). Це зменшує ймовірність появи однакових помилок у всіх модулях одночасно.
- Після виявлення порушення працездатності одного модуля, детектором розузгодження ДР₁ запускається процедура його тестування: якщо процедура тестування встановлює факт відмови модуля, як такої, що сталась через збій програмного забезпечення, то після цього здійснюється перезавантаження програмного забезпечення модуля і вона продовжує роботу в складі ядра; якщо процедура тестування не виявила факту збою, то ДР₁ видає сигнал про втрату працездатності модуля відповідного ядра, як такої, що наступила з причини відмови апаратної частини модуля.
- Тривалість процедури підключення модуля з резерву в ядро визначається тривалістю завантаження програмного забезпечення.

4.2.4. Розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійкої РЕСВП для двох правил прийняття рішення для формування вихідного сигналу

Визначення базових подій для структурно-автоматних моделей відмовостійкої РЕСВП. З представлення поведінки відмовостійкої РЕСВП складається перелік подій, які можуть в ній відбуватися. Події слід представляти парами, фіксуючи початок і закінчення відповідного часового інтервалу, який відповідає певному стану відмовостійкої РЕСВП. Події, що відбуваються у відмовостійкій РЕСВП, обумовлені її поведінкою, представлено в табл. 4.3. Аналіз поданих в таблиці подій дозволяє визначити базові події [253].

Таблиця 4.3 – Представлення пар подій, які фіксують початок і закінчення часового інтервалу перебування досліджуваної відмовостійкої РЕСВП в певному стані

Пор. № пари подій	Подія, яка фіксує початок часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Подія, яка фіксує закінчення часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Середнє значення тривалості часового інтервалу між подіями, [сек.]
1	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова модуля в ядрі №1»	\bar{t}_1
2	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова модуля в ядрі №2»	\bar{t}_2
3	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова модуля в ядрі №3»	\bar{t}_3
4	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова комутаційного пристрою»	\bar{t}_4
5	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова детектора розузгодження №1»	\bar{t}_5
6	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова детектора розузгодження №2»	\bar{t}_6
7	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова кінцевого мажоритарного елемента»	\bar{t}_7
8	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова МЕ №1»	\bar{t}_8
9	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова МЕ №2»	\bar{t}_9
10	«Початок роботи РЕСВП»	«Відмова МЕ №3»	\bar{t}_{10}

Пор. № пари подій	Подія, яка фіксує початок часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Подія, яка фіксує закінчення часового інтервалу перебування РЕСВП в певному стані	Середнє значення тривалості часового інтервалу між подіями, [сек.]
11	«Початок процедури виявлення несправного модуля в ядрі»	«Закінчення процедури виявлення несправного модуля в ядрі»	\bar{t}_{11}
12	«Початок процедури переведення справного модуля з ядра в резерв»	«Закінчення процедури переведення справного модуля з ядра в резерв»	\bar{t}_{12}
13	«Початок процедури переведення справного модуля з одного ядра в інше»	«Закінчення процедури переведення справного модуля з одного ядра в інше»	\bar{t}_{13}
14	«Початок процедури підключення резервного модуля в ядро»	«Закінчення процедури підключення резервного модуля в ядро»	\bar{t}_{14}

Незалежними базовими подіями у відмовостійкій системі є: «Відмова модуля в ядрі №1», «Відмова модуля в ядрі №2», «Відмова модуля в ядрі №3», «Відмова МЕ №1», «Відмова МЕ №2», «Відмова МЕ №3». Іншою базовою подією в моделі є подія «Закінчення процедури підключення резервного модуля в ядро».

Отже, в число базових мають бути включені наступні події:

- **Базова подія 1** «Відмова модуля в ядрі №1».

- **Базова подія 2** «Відмова модуля в ядрі №2».
- **Базова подія 3** «Відмова модуля в ядрі №3».
- **Базова подія 4** «Відмова МЕ №1».
- **Базова подія 5** «Відмова МЕ №2».
- **Базова подія 6** «Відмова МЕ №3».
- **Базова подія 7** «Закінчення процедури підключення резервного модуля в ядро».

Зведеними базовими подіями є: подія «Закінчення процедури виявлення несправного модуля в ядрі», подія «Закінчення процедури переведення справного модуля з ядра в резерв», подія «Закінчення процедури переведення справного модуля з одного ядра в інше».

Відмова мажоритарного елемента фіксується відсутністю сигналу на виході за наявності сигналів на його вході.

Допущення прийняті при розробленні моделей відмовостійкої РЕСВП. В розроблених моделях прийнято наступні допущення:

- Надійність детекторів розузгодження ($ДР_1$, $ДР_2$), комутаційного пристрою та кінцевого мажоритарного елемента є значно вищою від надійності інших складових відмовостійкої РЕСВП і мають тривалість безвідмовної роботи більшу ніж тривалість її експлуатації. Тому в моделях ці пристрої вважаються безвідмовними.
- Інтенсивність збоїв програмного забезпечення модуля в моделях не враховується, оскільки $ДР_1$ має засіб тестування, який її експлуатації факт збою з ймовірністю 1, а усунення його наслідків здійснюється шляхом перезавантаження програмного забезпечення.
- Тривалість всіх процесів, які відбуваються в системі мають експоненційний розподіл і відповідно інтенсивності базових подій є сталими в часі величинами.

Параметри відмовостійкої РЕСВП, які відображені в моделі. В розробленій надійнісній моделі відмовостійкої РЕСВП її склад і окремі складові представлено

відповідними параметрами, а саме:

- N_1 – кількість модулів в 1-му ядрі;
- N_2 – кількість модулів в 2-му ядрі;
- N_3 – кількість модулів в 3-му ядрі;
- λ_n – інтенсивність відмов модуля в ядрі;
- λ_{me} – інтенсивність відмов ME1, ME2, ME3;
- T – середнє значення інтервалу часу необхідного для підключення модуля з резерву в ядро.

Структура вектора станів відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур. Вектор станів відмовостійкої РЕСВП представлений наступними компонентами [253]:

V1 – відображає поточну кількість працездатних модулів у 1-му ядрі (початкове значення компоненти V1 дорівнює кількості модулів робочої конфігурації $N_1=3$);

V2 – відображає поточний стан 1-го ядра (початкове значення компоненти V2 дорівнює нулю):

- $V2=0$ – ядро і ME₁ справні;
- $V2=1$ – ядро вважається таким, що відмовило внаслідок відмови 2-х модулів у ядрі;
- $V2=2$ – ядро вважається таким, що відмовило внаслідок відмови ME₁;

V3 – відображає поточну кількість працездатних модулів у 2-му ядрі (початкове значення компоненти V3 дорівнює кількості модулів робочої конфігурації $N_2=3$);

V4 – відображає поточний стан 2-го ядра (початкове значення компоненти V4 дорівнює нулю):

- $V4=0$ – ядро і ME₂ справні;
- $V4=1$ – ядро вважається таким, що відмовило внаслідок відмови 2-х модулів у ядрі;
- $V4=2$ – ядро вважається таким, що відмовило внаслідок відмови ME₂;

V5 – відображає поточну кількість працездатних модулів у 3-му ядрі (початкове значення компоненти V5 дорівнює кількості модулів робочої конфігурації $n_3=3$);

V6 – відображає поточний стан 3-го ядра (початкове значення компоненти **V6** дорівнює нулю):

- $V6=0$ – ядро і ME_3 справні;
- $V6=1$ – ядро вважається таким, що відмовило внаслідок відмови 2-х модулів у ядрі;
- $V6=2$ – ядро вважається таким, що відмовило внаслідок відмови ME_3 ;

V7 – відображає поточну кількість працездатних модулів в ковзному резерві.

Розроблені структурно-автоматні моделі, представлено в табл.2 Додатку А.

4.2.5. Модель відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур

Для першого варіанту реалізації відмовостійкої РЕСВП розроблено граф станів та переходів, який має 80 станів і 308 переходів. Згідно з графом сформовано математичну модель відмовостійкої РЕСВП у вигляді системи лінійних однорідних диференціальних рівнянь першого порядку (4.6), яка має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{dP_1(t)}{dt} &= -(9\lambda_n + 3\lambda_{me}) \cdot P_1(t); \\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= -(8\lambda_n + 3\lambda_{me}) \cdot P_2(t) + 3\lambda_n \cdot P_1(t); \\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= -(6\lambda_n + 2\lambda_{me}) \cdot P_3(t) + 2\lambda_n \cdot P_2(t); \\
\frac{dP_4(t)}{dt} &= -(8\lambda_n + 3\lambda_{me}) \cdot P_4(t) + 3\lambda_n \cdot P_1(t); \\
\frac{dP_5(t)}{dt} &= -(7\lambda_n + 3\lambda_{me}) \cdot P_5(t) + 3\lambda_n \cdot P_2(t) + 3\lambda_n \cdot P_3(t); \\
&\cdot \\
&\cdot \\
\frac{dP_{40}(t)}{dt} &= -(4\lambda_n + 2\lambda_{me}) \cdot P_{40}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{39}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{19}(t); \\
\frac{dP_{41}(t)}{dt} &= -\left(5\lambda_n + 2\lambda_{me} + \frac{1}{T}\right) \cdot P_{41}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{24}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{19}(t); \\
\frac{dP_{42}(t)}{dt} &= -\left(5\lambda_n + 2\lambda_{me} + \frac{1}{T}\right) \cdot P_{42}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{25}(t); \\
\frac{dP_{43}(t)}{dt} &= -\left(5\lambda_n + 2\lambda_{me} + \frac{1}{T}\right) \cdot P_{43}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{26}(t); \\
\frac{dP_{44}(t)}{dt} &= -(5\lambda_n + 2\lambda_{me}) \cdot P_{44}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{27}(t); \\
\frac{dP_{45}(t)}{dt} &= -\left(5\lambda_n + 2\lambda_{me} + \frac{1}{T}\right) \cdot P_{45}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{28}(t); \\
&\cdot \\
&\cdot \\
\frac{dP_{74}(t)}{dt} &= -\left(4\lambda_n + 2\lambda_{me} + \frac{1}{T}\right) \cdot P_{74}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{42}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{70}(t); \\
\frac{dP_{75}(t)}{dt} &= -\left(4\lambda_n + 2\lambda_{me} + \frac{1}{T}\right) \cdot P_{75}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{43}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{71}(t); \\
\frac{dP_{76}(t)}{dt} &= -(4\lambda_n + 2\lambda_{me}) \cdot P_{76}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{44}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{72}(t); \\
\frac{dP_{77}(t)}{dt} &= -\left(4\lambda_n + 2\lambda_{me} + \frac{1}{T}\right) \cdot P_{77}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{50}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{65}(t); \\
\frac{dP_{78}(t)}{dt} &= -\left(4\lambda_n + 2\lambda_{me} + \frac{1}{T}\right) \cdot P_{78}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{51}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{66}(t); \\
\frac{dP_{79}(t)}{dt} &= -\left(4\lambda_n + 2\lambda_{me} + \frac{1}{T}\right) \cdot P_{79}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{52}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{67}(t); \\
\frac{dP_{80}(t)}{dt} &= -(4\lambda_n + 2\lambda_{me}) \cdot P_{80}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{53}(t) + 3\lambda_n \cdot P_{68}(t).
\end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

4.2.6. Методика синтезу відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур

Для синтезу відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур необхідно мати розроблену вище модель такої системи і приведену нижче методику, яка складається з таких кроків:

1. Встановлення граничних значень показників надійності модулів в ядрі, які забезпечують заданий рівень надійності відмовостійкої РЕСВП.
2. Дослідження залежності середнього значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП, яка втрачає працездатність після критичної відмови 2-х ядер, від відношення інтенсивності відмови мажоритарного елемента ядра (ME_1, ME_2, ME_3) до інтенсивності відмови модуля в ядрі
3. Дослідження залежності ймовірності безвідмовної роботи РЕСВП від тривалості її експлуатації.
4. Дослідження залежності середнього значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП, яка втрачає працездатність після критичної відмови в останньому ядрі, від відношення інтенсивності відмови мажоритарного елемента (ME_1, ME_2, ME_3) до інтенсивності відмови модулів в ядрі.

Дана методика дає змогу вибрати доцільні значення і не завищувати показники надійності складових РЕСВП, які забезпечать заданий рівень функціональної безпеки.

Нижче приведено докладний опис пунктів методики з ілюстрацією на прикладі синтезу структури відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур.

Встановлення граничних значень показників надійності модулів в ядрі, які забезпечують заданий рівень надійності відмовостійкої РЕСВП. В даному дослідженні мова йде про відмовостійку РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, яка втрачає працездатність після критичної відмови 2-х ядер. Математична модель відмовостійкої РЕСВП представляє собою систему лінійних однорідних диференціальних рівнянь, яку складають 80 рівнянь.

Результати дослідження залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП від тривалості експлуатації при різних значеннях відношення інтенсивності відмов мажоритарного елемента ядра до інтенсивності відмов одного модуля в ядрі подано на рис. 4.10.

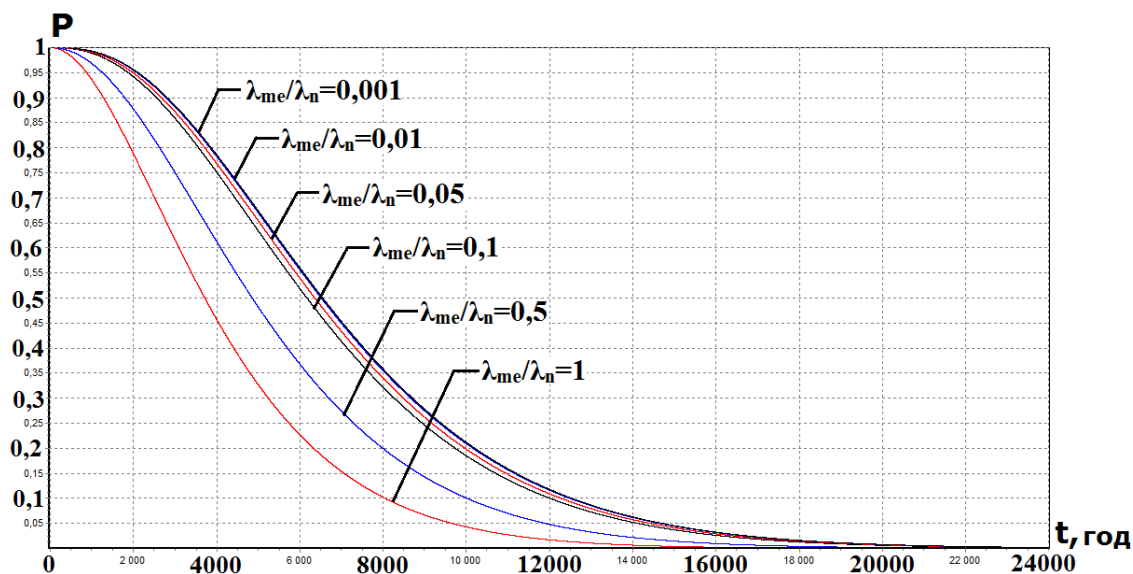


Рис. 4.10. Залежність ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур від тривалості її експлуатації при різних значеннях відношення інтенсивності відмов мажоритарного елемента ядра до інтенсивності відмов одного модуля в ядрі

З рисунка видно мінімальне співвідношення інтенсивності відмов мажоритарного елемента ядра до інтенсивності відмов одного модуля в ядрі повинно бути не меншим 10-ти або більшим. Для більш точного визначення цього співвідношення потрібно виконати наступний пункт методики.

Дослідження залежності середнього значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, яка втрачає працездатність після критичної відмови 2-х ядер, від відношення інтенсивності відмови мажоритарного елемента ядра (ME_1 , ME_2 , ME_3) до інтенсивності відмови модуля в ядрі (рис. 4.11 і табл. 4.4).

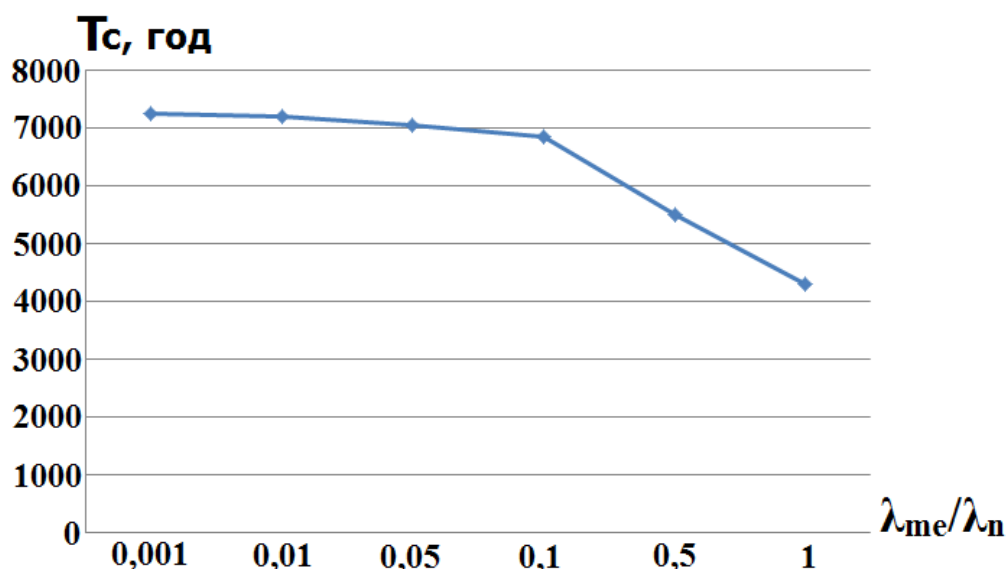


Рис. 4.11. Залежність середнього значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП від відношення інтенсивності відмови мажоритарного елемента до інтенсивності відмови модулів в ядрі

Таблиця 4.4 – Залежність середнього значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП від відношення інтенсивності відмови мажоритарного елемента до інтенсивності відмови модулів в ядрі

T_c , год	4282	5485	6840	7034	7193	7229
λ_{me}/λ_n	1	0,5	0,1	0,05	0,01	0,001

Отримані результати показують, що показник надійності «середнє значення тривалості безвідмовної роботи», зростає при зменшенні інтенсивності відмов мажоритарного елемента (інтервалі зміни параметра λ_{me}/λ_n від 1 до 0,1) на 2558 год. або у відсотковому еквіваленті на 60%; подальше зменшення інтенсивності відмови мажоритарних елементів (ME_1, ME_2, ME_3) не дає суттєвого зростання показника надійності «середнє значення тривалості роботи до катастрофічної відмови». Використання мажоритарних елементів (ME_1, ME_2, ME_3) з інтенсивністю відмов нижчою ніж $\lambda_{me} = 0,00001$ 1/год не є доцільним для даної відмовостійкої РЕСВП.

Дослідження залежності ймовірності безвідмовної роботи РЕСВП від тривалості її експлуатації. Тут мова йде про відмовостійку РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, яка втрачає працездатність

після критичної відмови в останньому ядрі. для проєктанта важливим є визначення інтервалу часу, на якому ймовірність безвідмовної роботи РЕСВП не впаде нижче заданого граничного значення (наприклад, рівень 0,9). Результати досліджень подані на рисунку 4.12.

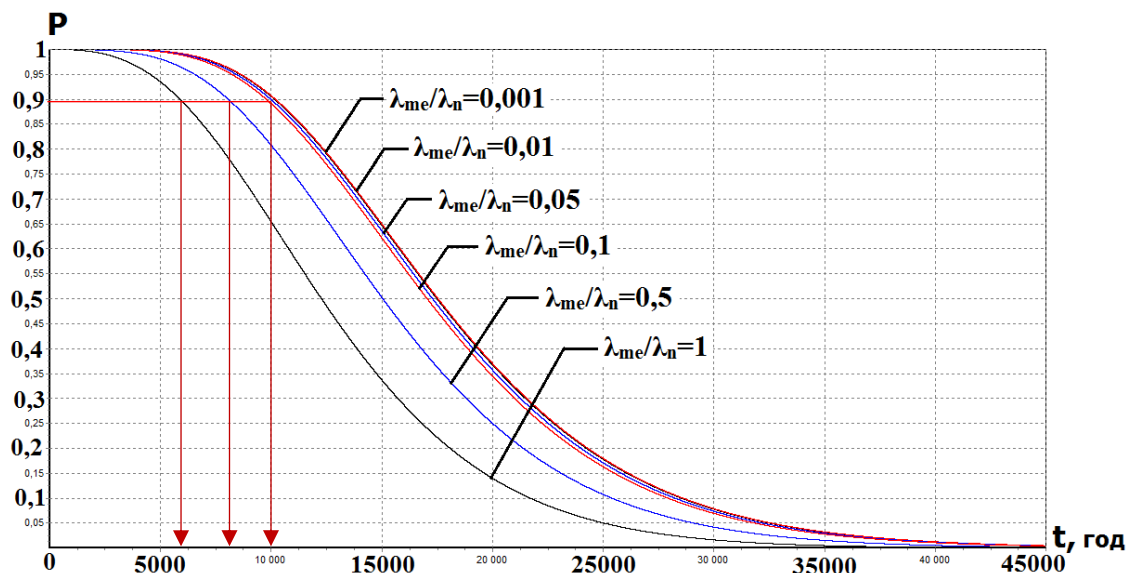


Рис. 4.12. Залежність ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур від тривалості її експлуатації при різних співвідношеннях між інтенсивностями відмов мажоритарного елемента та РЕСВП

З рисунку видно, до якого рівня доцільно збільшувати надійність модулів, для забезпечення заданого інтервалу часу, на якому забезпечується значення ймовірності безвідмовної роботи не менше 0,9.

Дослідження залежності середнього значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, яка втрачає працездатність після критичної відмови в останньому ядрі, від відношення інтенсивності відмови мажоритарного елемента (ME_1, ME_2, ME_3) до інтенсивності відмови модулів в ядрі.

Отримані результати, подані на рисунку 4.13 і в таблиці 4.5, показують, що показник надійності «середнє значення тривалості безвідмовної роботи» для відмовостійкої РЕСВП, яка зберігає працездатність коли залишаються справним «1 ядро із 3», також зростає при зменшенні інтенсивності відмов мажоритарного елемента (інтервал зміни параметра $\lambda_{ме}/\lambda_n$ від 1 до 0,1) на 4932 год. або у

відсотковому еквіваленті на 37%; подальше зменшення інтенсивності відмови мажоритарних елементів (ME_1, ME_2, ME_3) не дає суттєвого зростання показника надійності «середнє значення тривалості роботи до критичної відмови». Використання мажоритарних елементів (ME_1, ME_2, ME_3) з інтенсивністю відмов нижчою ніж $\lambda_{me} = 0,00001$ 1/год не є доцільним для даної відмовостійкої РЕСВП.

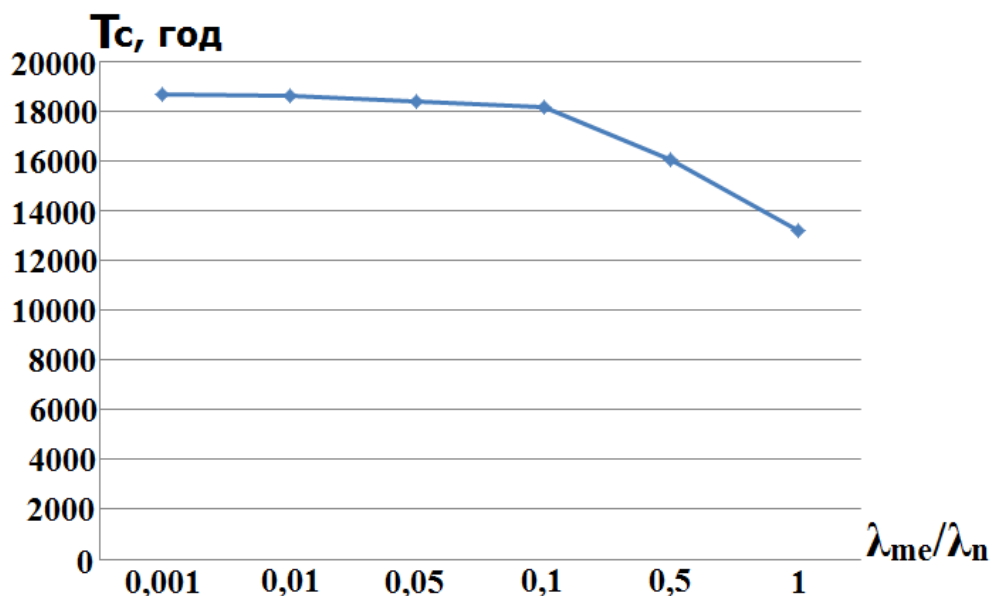


Рис. 4.13. Залежність середнього значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП від відношення інтенсивності відмови мажоритарного елемента до інтенсивності відмови модуля в ядрі

Таблиця 4.5 – Залежність середнього значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП від відношення інтенсивності відмови мажоритарного елемента до інтенсивності відмови модуля в ядрі

T_c , год	13199	16061	18131	18383	18600	18651
λ_{me}/λ_n	1	0,5	0,1	0,05	0,01	0,001

4.3. Застосування розроблених моделей та методик до процедур аналізу та синтезу відмовостійких РЕСВП з різними типами мажоритарних структур

4.3.1. Порівняння надійності відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур та відмовостійкої РЕСВП на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом голосування

Необхідно прийняти рішення, якій відмовостійкій РЕСВП (відмовостійкій РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур чи відмовостійкій РЕСВП на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом голосування) слід віддати перевагу, при конкретних умовах реалізації, заданих вхідними параметрами. Модулі, на основі яких формується відмовостійка РЕСВП, мають такі параметри: інтенсивність відмов в робочому стані $\lambda_n = 0,0001$ 1/год.; інтенсивність відмов, якщо модуль перебуває в «холодному» резерві $\lambda_m = 0,00001$ 1/год.; тривалість завантаження програмного забезпечення $T = 0,1$ год.

Для відмовостійкої РЕСВП тривалість підключення модуля з «холодного» резерву в «гарячий» і тривалість підключення модуля з «холодного» резерву в ядро визначає тривалість завантаження програмного забезпечення. Інтенсивність відмов мажоритарного елемента $\lambda_{me} = 0,00001$ 1/год. В таблиці 4.6 показані результати порівняння надійності РЕСВП, для якої розглядається використання 6 варіантів забезпечення відмовостійкості. Для коректності порівняння у всіх варіантах однакова загальна кількість модулів – 9. Для порівняння розглядаються наступні варіанти відмовостійких РЕСВП, які мають однакову загальну кількість модулів ($N_z = 9$) але різну кількість робочих модулів N_r : 1 – відмовостійка РЕСВП з використанням трьох МС вкладених в МС і правилом голосування «2 ядра із 3»; 2 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «5 із 9»; 3 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «4 із 7» (2 модуля в резерві); 4 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «3 із 5» (4 модулі в резерві); 5 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» (6 модулів в резерві); 6 – відмовостійка РЕСВП з використанням трьох МС вкладених в МС і збереженням її

працездатності до останнього працездатного ядра. В таблиці використано такі позначення: N_r – кількість робочих модулів в МС; N_z – загальна кількість модулів; G і M – кількість модулів в гарячому і холодному резерві. $T_{сер}$ – середній час роботи до відмови.

Отримані результати (рис. 4.14 і табл. 4.6) при порівнянні відмовостійкої РЕСВП з використанням мажоритарних дворівневих структур вкладених і відмовостійкої РЕСВП на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом голосування показують, що кращі показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи та середнє значення тривалості безвідмовної роботи) при заданому наборі вхідних параметрів дає відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» плюс 6 модулів в резерві.

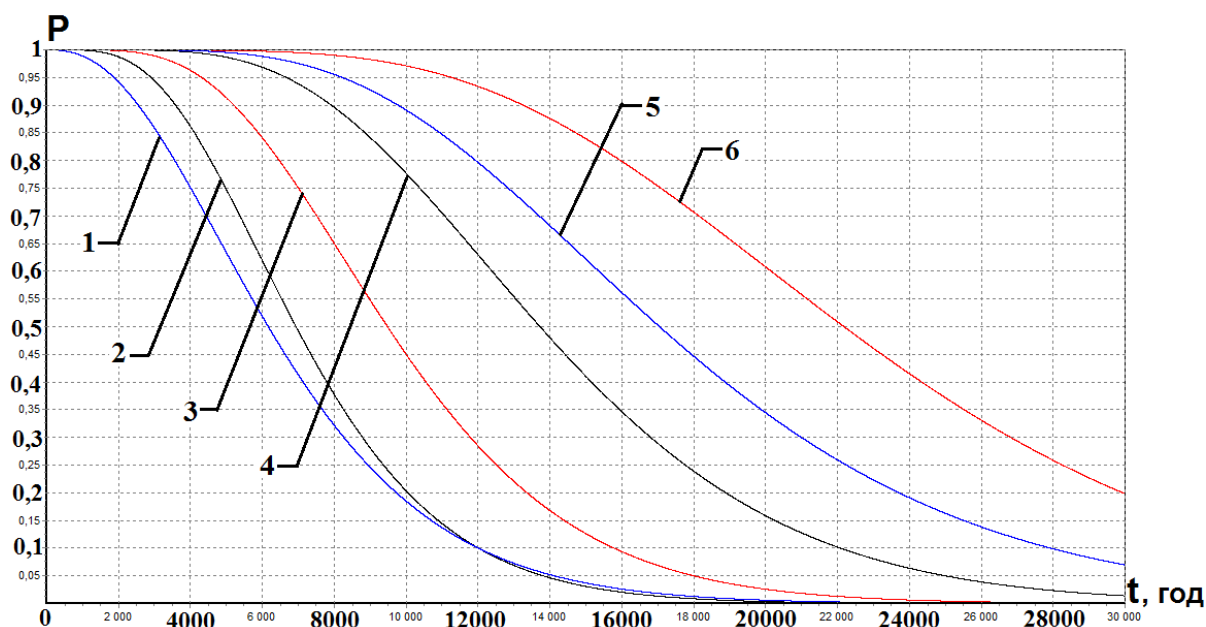


Рис. 4.14. Порівняння надійності 4-х варіантів побудови (реалізації) відмовостійкої РЕСВП з МС з фіксованим правилом голосування (криві 1, 3, 4, 6) та 2-х варіантів побудови (реалізації) відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневої мажоритарної структури (криві 2 і 5)

Середнє значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» плюс 6 модулів в резерві є більшим, зокрема в порівнянні з: відмовостійкою РЕСВП №1 (табл. 4.6) на 241%; відмовостійкою РЕСВП №2 на 213%; відмовостійкою РЕСВП №3 на 131%;

відмовостійкою РЕСВП №4 на 60%; відмовостійкою РЕСВП №5 на 28%.

Таблиця 4.6 – Середні значення тривалостей безвідмовної роботи для різних конфігурацій відмовостійкої РЕСВП з мажоритарною структурою

Тип відмовостійкої РЕСВП	N_r/N_z	G	M	Тсер, год	К-ть станів	К-ть переходів
РЕСВП №1. Дворівнева мажоритарна структура з правилами голосування на обох рівнях «2 із 3», яка втрачає працездатність після втрати працездатності двох ядер	9/9	0	0	6840	80	308
РЕСВП №2. МС з фіксованим правилом голосування «5 із 9»	9/9	0	0	7460	9	18
РЕСВП №3. МС з фіксованим правилом голосування «4 із 7» (2 модулі в резерві)	7/9	1	1	10099	28	78
РЕСВП №4. МС з фіксованим правилом голосування «3 із 5» (4 модулі в резерві).	5/9	1	3	14502	40	118
РЕСВП №5. Дворівнева мажоритарна структура з правилами голосування на обох рівнях «2 із 3», яка втрачає працездатність з втратою працездатності останнього ядра	9/9	0	0	18131	200	794
РЕСВП №6. МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» (6 модулів в резерві)	3/9	1	5	23266	36	110

Такий результат обумовлений тим, що в робочій конфігурації даної відмовостійкої РЕСВП знаходиться 3 модулі, один модуль перебуває в «гарячому» резерві, а решта 5 модулів перебувають в «холодному» резерві. Таким чином експлуатаційний ресурс РЕСВП вичерпується повільніше.

4.3.2. Порівняння надійності відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур у та відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури і відповідною зміною правила голосування

Необхідно прийняти рішення, якій відмовостійкій РЕСВП (відмовостійкій РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур чи відмовостійкій РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури) слід віддати перевагу, при конкретних умовах реалізації, заданих вхідними параметрами. Модулі, на основі яких формується відмовостійка РЕСВП, мають такі параметри: інтенсивність відмов в робочому стані $\lambda_n = 0,0001$ 1/год.; інтенсивність відмов, якщо модуль перебуває в «холодному» резерві $\lambda_m = 0,00001$ 1/год.; тривалість завантаження програмного забезпечення $T = 0,1$ год. Для відмовостійкої РЕСВП тривалість підключення модуля з «холодного» резерву в «гарячий» і тривалість підключення модуля з «холодного» резерву в ядро визначає тривалість завантаження програмного забезпечення. Інтенсивність відмов мажоритарного елемента $\lambda_{me} = 0,00001$ 1/год.

Для порівняння розглядаються наступні варіанти відмовостійких РЕСВП: 1 варіант – відмовостійка РЕСВП з використанням трьох МС вкладених в МС і початковим правилом збереження працездатності «2 ядра із 3 ядер» з переходом на одну мажоритарну структуру з правилом «2 із 3»; 2 варіант – відмовостійка РЕСВП з реконфігурацією МС і з початковою конфігурацією «5 із 9»; 3 варіант – відмовостійка РЕСВП з реконфігурацією МС і з початковою конфігурацією «4 із 7» і 2 РЕСВП в резерві; 4 варіант – відмовостійка РЕСВП з реконфігурацією МС і з початковою конфігурацією «3 із 5» і 4 РЕСВП в резерві; 5 варіант – відмовостійка РЕСВП з використанням трьох МС вкладених в МС і правилом збереження працездатності «2 ядра із 3 ядер». Показники надійності, що відповідають цим варіантам побудови відмовостійких систем відображені на рис. 4.12 і табл. 4.7.

Отримані результати (рис. 4.15 і табл. 4.7) при порівнянні відмовостійких РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур і відмовостійкої

РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури показують, що кращі показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи на заданому (потрібному) інтервалі експлуатації та середнє значення тривалості безвідмовної роботи) при заданому наборі вхідних параметрів, дає відмовостійка РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури з правилом голосування «3 із 5»плюс 4 модулі в резерві. Середнє значення безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури з правилом голосування «3 із 5»плюс 4 модулі в резерві є більшим, зокрема в порівнянні з: відмовостійкою РЕСВП № 1 (табл. 4.7, рис. 4.15) на 185%; відмовостійкою РЕСВП № 4 на 5%; відмовостійкою РЕСВП № 3 на 6%; відмовостійкою РЕСВП № 2 на 7%;

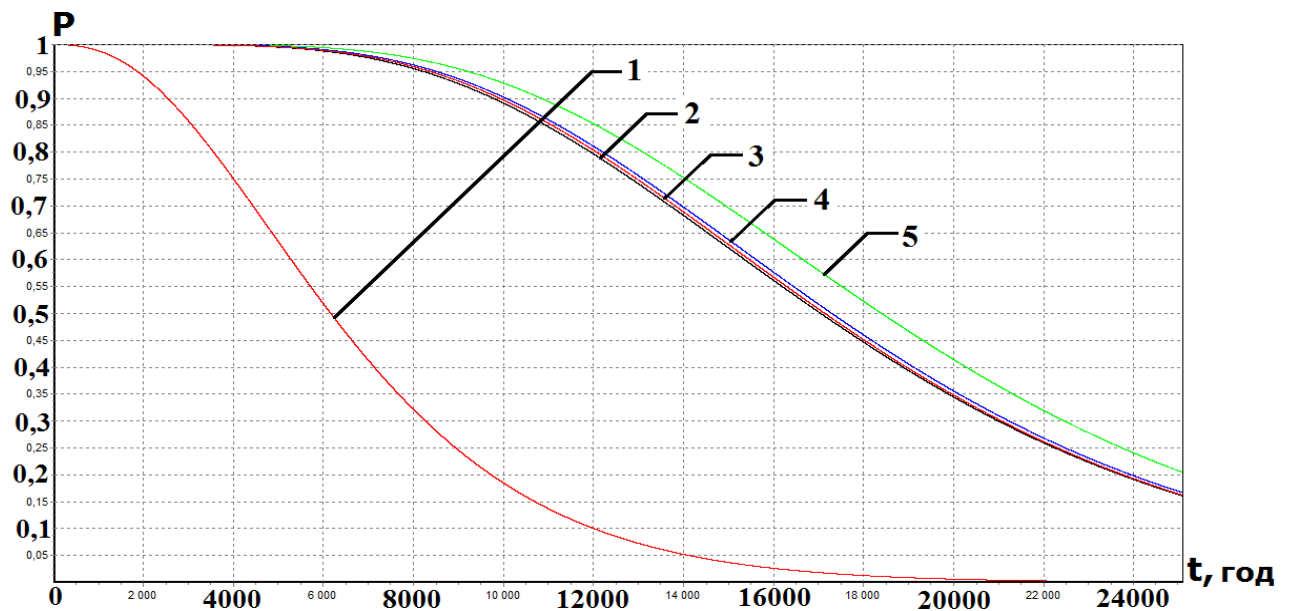


Рис. 4.15. Порівняння надійності варіантів побудови відмовостійкоїРЕСВП з реконфігурацією МС та відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур

Цей результат обумовлений тим, що 4 модулі перебувають в «холодному» резерві, таким чином зберігаючи свій експлуатаційний ресурс.

Таблиця 4.7 – Середні значення тривалостей безвідмовної роботи для різних варіантів побудови відмовостійкої РЕСВП з мажоритарною структурою

Тип	Параметри	N	Наявність модулів в “гарячому” резерві	M	Середнє значення тривалості безвідмовної роботи модулів, год	Параметри графа	
						К-ть станів	К-ть переходів
1).	Дворівнева МС з правилом голосування «2 ядра з 3»	9	0	0	6840	80	308
2).	Дворівнева МС з правилом працездатності «1 ядро з 3»	9	0	0	18131	200	794
3).	МС з реконфігурацією типу «5 з 9»	9	0	0	18248	61	169
4).	МС з реконфігурацією типу «4 з 7» (2 модулі в резерві)	7	1	1	18407	82	247
5).	МС з реконфігурацією типу «3 з 5» (4 модулі в резерві)	5	1	3	19495	70	217

M - к-ть модулів в холодному резерві

4.3.3. Надійнісний параметричний синтез радіоелектронної системи відповідального призначення довготривалого використання

Використання мажоритарного принципу резервування, як вже було сказано вище, має ряд переваг в порівнянні з іншими видами структурного резервування, а саме: високий рівень функціональної безпечності, стійкість по відношенню до

одиначних відмов і збоїв, відсутність перерв у роботі при відмові модулів з яких складається РЕСВП, простоту процедури контролю та діагностики для виявлення несправних модулів.

Проте застосування відмовостійкої РЕСВП з мажоритарною структурою типу « m із n » без відновлення є ефективним її використанням на відносно коротких інтервалах часу безперервної експлуатації. Для забезпечення довготривалої безперервної експлуатації РЕСВП із заданим рівнем надійності, при використанні мажоритарного принципу резервування необхідно вводити ковзний резерв для модулів ядра та використовувати технічне обслуговування.

Тому актуальною є задача визначення конфігурації відмовостійкої РЕСВП на основі мажоритарної структури, яка б забезпечила довготривалу безперервну експлуатацію радіоелектронних систем. Для вирішення поставленої задачі в цьому підрозділі запропоновано моделі: відмовостійкої РЕСВП на основі мажоритарної структури з комбінованим структурним резервуванням і фіксованим правилом голосування та з врахуванням параметрів стратегії аварійного відновлення, відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури, відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур.

Синтез відновлюваної відмовостійкої РЕСВП з МС передбачає вирішення наступних п'яти задач:

1. Визначення мінімальної кількості ремонтів РЕСВП для заданого рівня надійності.
2. Визначення мінімальної кількості модулів ковзного резерву.
3. Вибір правила голосування на момент реконфігурації.
4. Вибір варіанту відмовостійкої системи з МС для РЕСВП є найбільш доцільним при конкретних умовах реалізації, заданих вхідними параметрами.
5. Забезпечення заданого значення показника функціональної безпечності відмовостійкої РЕСВП шляхом вибору необхідної кількості ремонтів

Задача №1. Необхідно визначити, яку мінімальну кількість ремонтів модулів необхідно передбачити для ремонтної бригади, щоб відмовостійка РЕСВП побудована на основі мажоритарної структури з правилом голосування «2 із 3»,

змогла забезпечити значення ймовірності безвідмовної роботи $P_{б.р.} = 0,9$ на інтервалі експлуатації 10000 год. Розрахунки виконані при таких значеннях параметрів: $n = 3$ (кількість модулів в ядрі МС); $\lambda_n = 1 \cdot 10^{-4}$ 1/год (інтенсивність відмов модуля в ядрі); $T_p = 3$ год (тривалість перебування ремонтної бригади в дорозі); $T_{рем} = 0,3$ год (тривалість ремонту модуля).

При порівнянні розглядаються наступні варіанти відмовостійких РЕСВП: 1 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» (без ремонту); 2 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» (1 ремонт); 3 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» (2 ремонти); 4 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» (3 ремонти); 5 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» (4 ремонти); 6 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» (5 ремонтів); 7 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3» (6 ремонтів).

Отримані результати дослідження, які представлено на рис. 4.16 та рис. 4.17,

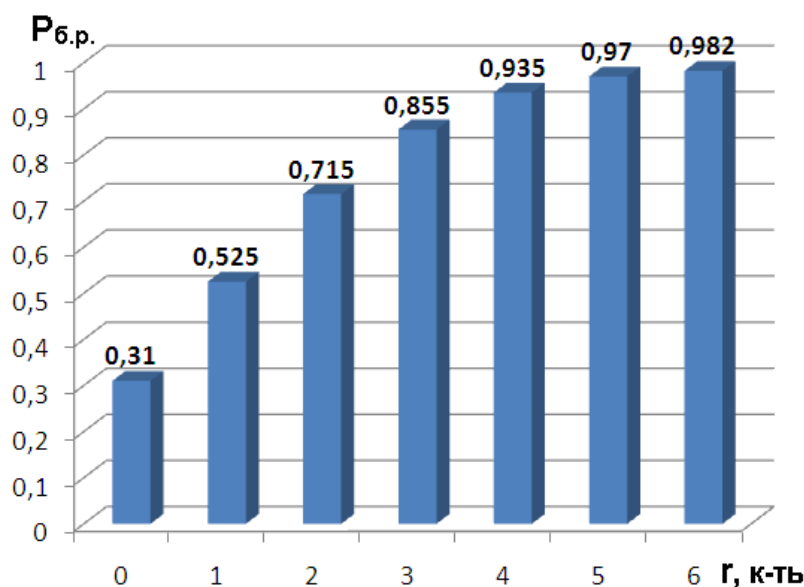


Рис. 4.16. Залежність значення ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП на основі МС з правилом голосування «2 із 3» (на інтервалі 10000 год) від кількості ремонтів

Отримані результати показують, що для того аби забезпечити заданий рівень надійності, а саме значення ймовірності безвідмовної роботи 0,9 на інтервалі

експлуатації 10000 год, для ремонтної бригади необхідно передбачити мінімум 4 ремонти, при заданих вхідних параметрах.

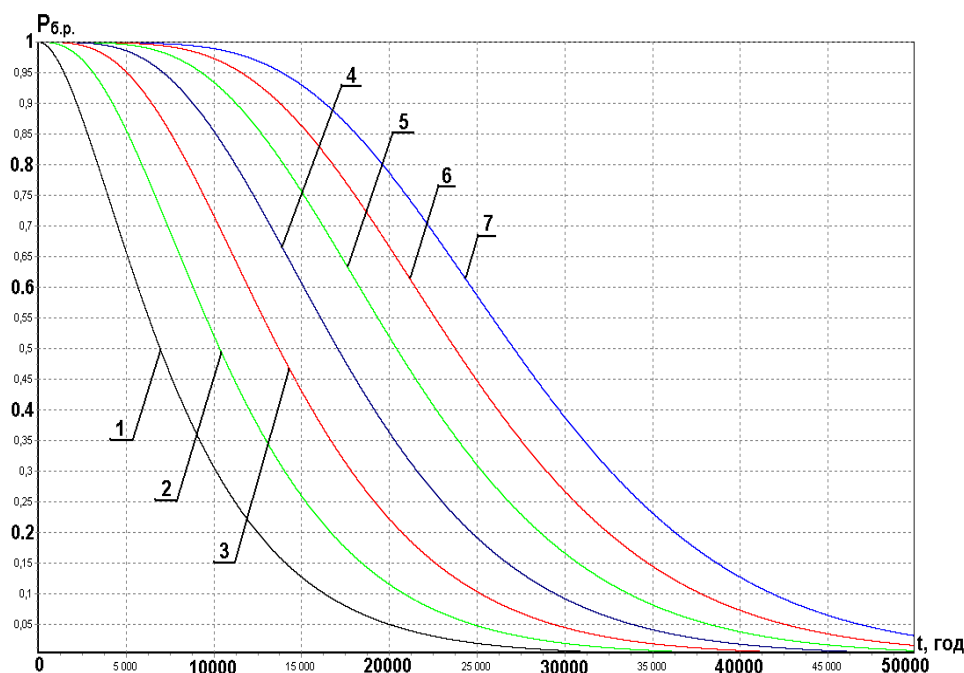


Рис. 4.17. голосування ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП від тривалості її експлуатації для семи варіантів реалізації

Задача №2. Необхідно визначити, яку мінімальну кількість модулів ковзного резерву потрібно додати до мажоритарної структури з правилом голосування «2 із 3» для того, щоб забезпечити значення ймовірності безвідмовної роботи $P_{б.р.} = 0,9$ на інтервалі експлуатації 10000 год. Значення параметрів відмовостійкої РЕСВП при яких проводилися дослідження: інтенсивність відмов модуля в ядрі $\lambda_n = 0,0001$ 1/год.; інтенсивність відмов модуля в «холодному» резерві $\lambda_m = 0,00001$ 1/год.; тривалість з правилом голосування програмного забезпечення $T = 0,1$ год.

При порівнянні розглядаються перелічені вище варіанти відмовостійких РЕСВП.

Отримані результати дослідження, які представлено на рис. 4.18 та рис.4.19 показують, що для того аби забезпечити заданий рівень надійності, а саме значення ймовірності безвідмовної роботи 0,9 на інтервалі експлуатації 10000 год, для відмовостійкої РЕСВП на основі МС типу «2 із 3» необхідно додати мінімум 5 модулів в ковзний резерв, при заданих вхідних параметрах.

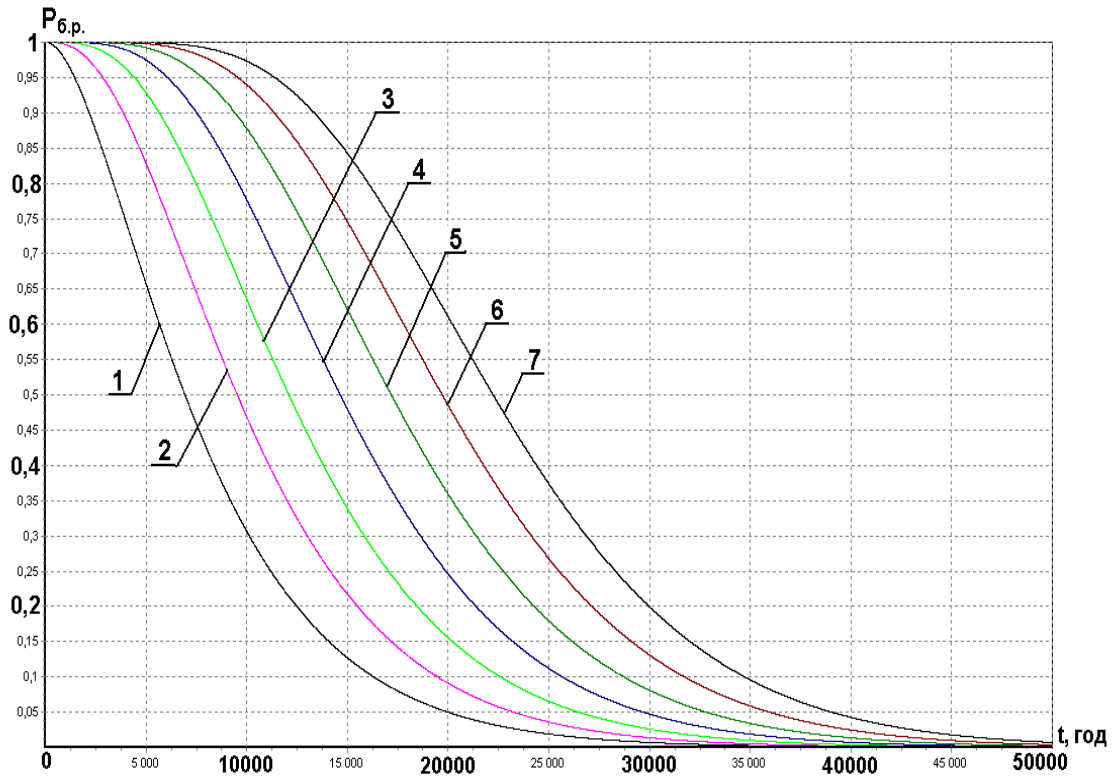


Рис. 4.18. Залежність ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом голосування «2 із 3» з ковзним резервуванням модулів ядра від тривалості її експлуатації для різної кількості резервних модулів

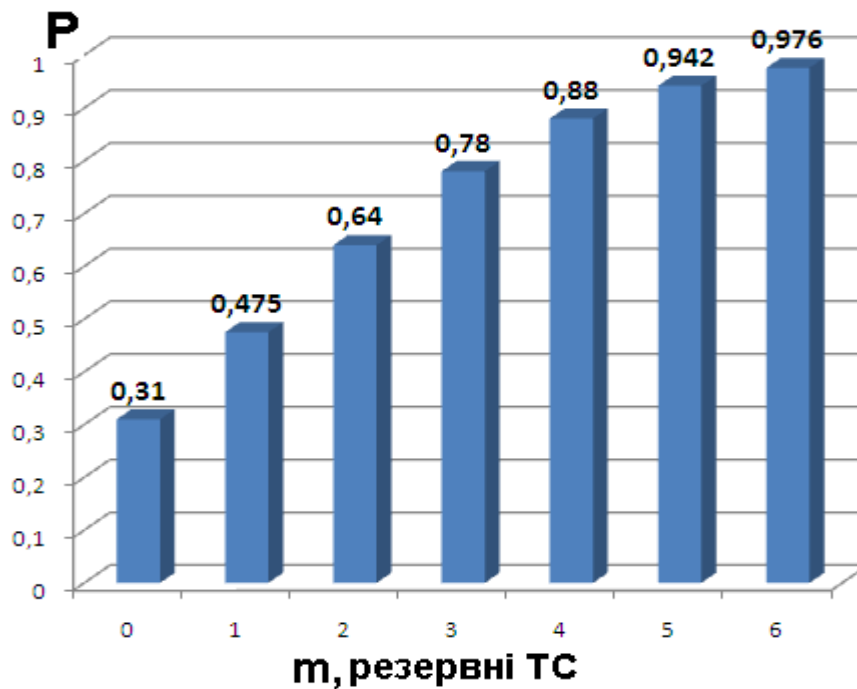


Рис. 4.19. Залежність значення ймовірності безвідмовної роботи (на інтервалі експлуатації 10000 год) МС типу «2 із 3» при різній кількості резервних модулів

Задача №3. Необхідно визначити, яка і з яким правилом прийняття рішення повинна бути початкова кількість модулів в ядрі, для того, щоб забезпечити значення ймовірності безвідмовної роботи $P_{б.р.} = 0,9$ на інтервалі експлуатації 10000 год. Значення параметрів відмовостійкої РЕСВП при яких проводилися дослідження: $\lambda_n = 0,0001$ 1/год (інтенсивність відмов модуля в ядрі МС або в гарячому резерві); $\lambda_m = 0,000011$ /год (інтенсивність відмов резервного модуля (холодний резерв)); $P_{rec} = 0,999$ (ймовірність успішного виконання процедури реконфігурації); $P_h = 0,999$ (ймовірність успішного підключення модуля з гарячого резерву в ядро); $P_c = 0,999$ (ймовірність успішного переведення модуля з холодного резерву в гарячий); $T_h = 0,001$ год (середнє значення тривалості заміни несправного модуля в ядрі на модуль з гарячого резерву); $T_c = 0,1$ год (середнє значення тривалості переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв); $T_{rec} = 0,001$ (середнє значення тривалості реконфігурації МС).

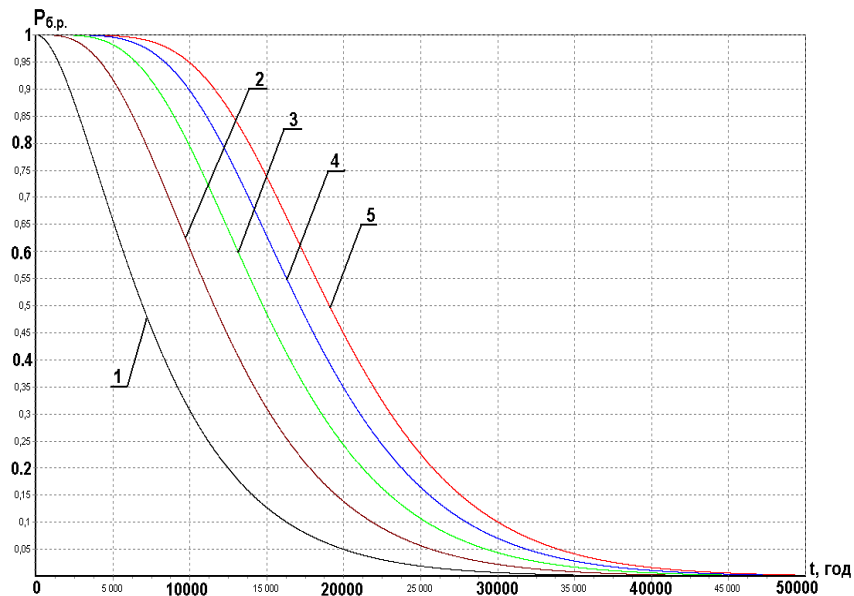


Рис. 4.20. Залежність ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією мажоритарної структури від тривалості її експлуатації з різними правилами голосування

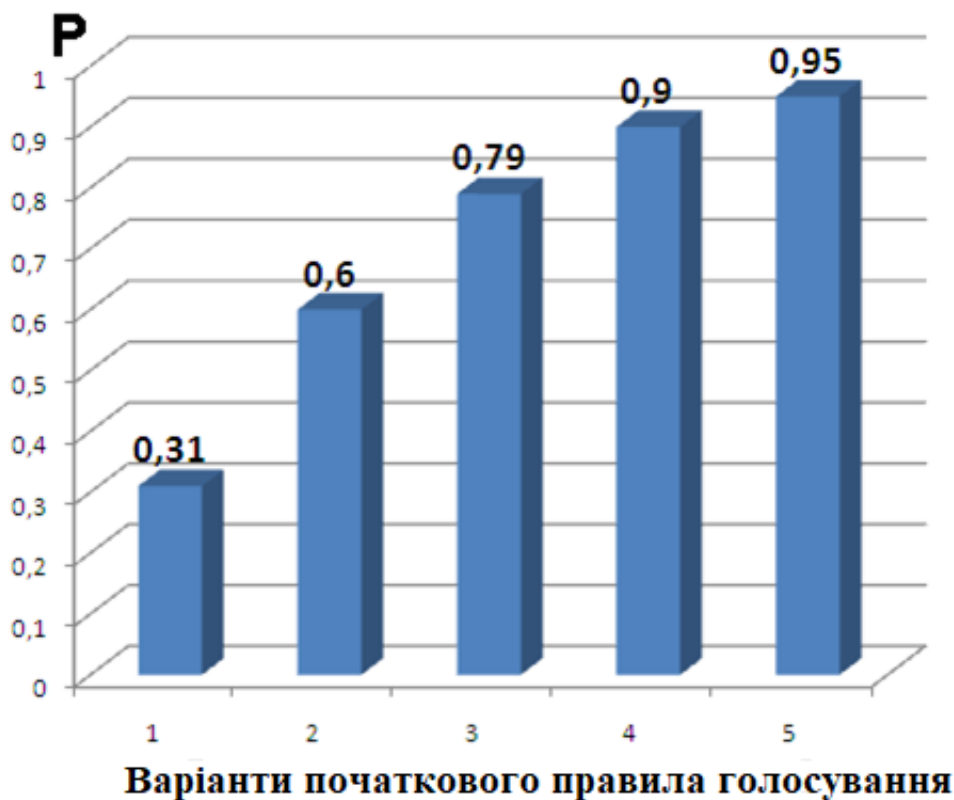


Рис. 4.21 Значення ймовірності безвідмовної роботи (на інтервалі експлуатації 10000 год) для відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією МС та п'яти варіантів початкового правила голосування

Для вибору початкового правила голосування розглянуто наступні варіанти початкового правила голосування: 1 – відмовостійка РЕСВП на основі МС з фіксованим правилом голосування «2 із 3»; 2 – відмовостійка РЕСВП з реконфігурацією МС і початковим правилом голосування «3 із 5»; 3 – відмовостійка РЕСВП з реконфігурацією МС і початковим правилом голосування «4 із 7»; 4 – відмовостійка РЕСВП з реконфігурацією МС і початковим правилом голосування «5 із 9»; 5 – відмовостійка РЕСВП з реконфігурацією МС і початковим правилом голосування «6 із 11».

Отже наведених на рис 4.17 та 4.18 результатів видно, що для забезпечення необхідного рівня надійності при заданих вхідних параметрах відмовостійкої РЕСВП, можна використати відмовостійку РЕСВП з реконфігурацією МС ... і початковим правилом голосування «5 із 9».

Задача №4. Необхідно прийняти рішення, якій з двох відмовостійких РЕСВП (відмовостійкій РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур чи

відмовостійкій РЕСВП на основі мажоритарної структури з правилом голосування «2 із 3») слід віддати перевагу, при конкретних умовах реалізації, заданих вхідними параметрами. Модулі, з яких складається відмовостійка РЕСВП, мають такі параметри: інтенсивність відмов модуля в робочому стані $\lambda_n = 0,0001$ 1/год.; тривалість завантаження програмного забезпечення модуля $T = 0,1$ год. Інтенсивність відмов мажоритарного елемента $\lambda_{me} = 0,00001$ 1/год.

Отримані результати (рис. 4.22) при порівнянні відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур і відмовостійкої РЕСВП на основі мажоритарної структури з правилом голосування «2 із 3» показують, що найкращі показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи та середнє значення тривалості безвідмовної роботи) при заданому наборі вхідних даних, дає відмовостійка РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, яка вважається працездатною з останньою працездатною мажоритарною структурою.

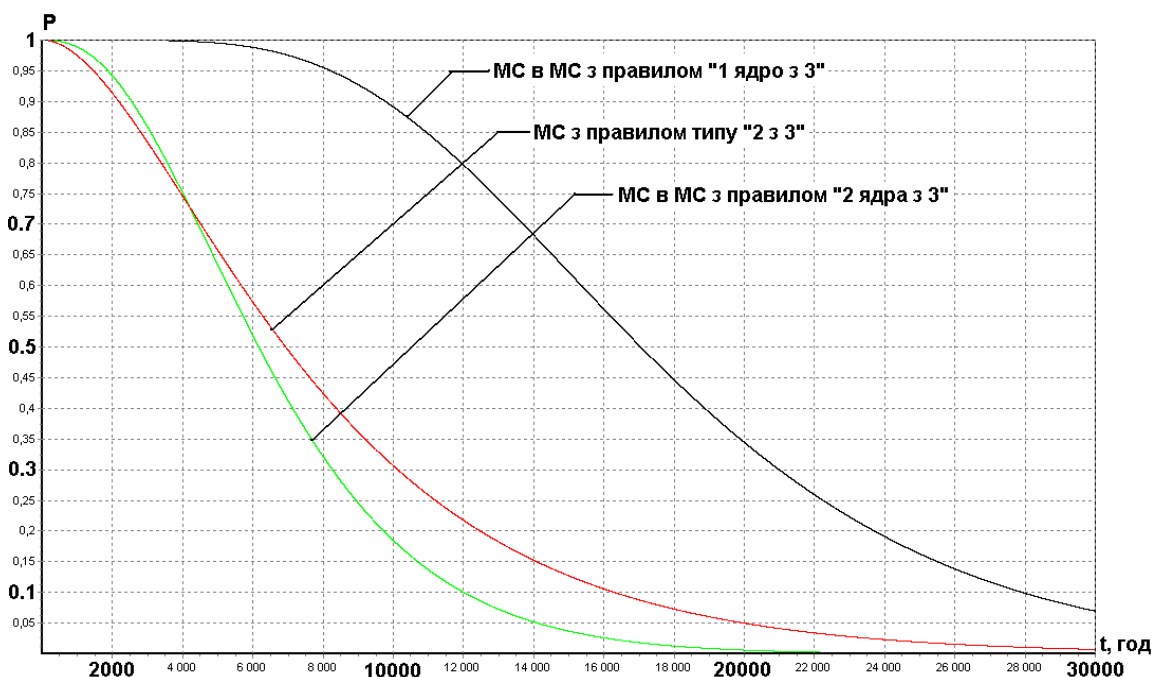


Рис. 4.22. Залежності ймовірності безвідмовної роботи трьох варіантів побудови відмовостійкої РЕСВП від тривалості її експлуатації

Середнє значення безвідмовної роботи відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, яка вважається працездатною з останньою працездатною мажоритарною структурою, є більшим, зокрема в порівнянні з відмовостійкою РЕСВП на основі мажоритарної структури з

фіксованим правилом яка вважається працездатною з останньою працездатною мажоритарною структурою, 9480 год. (або на 114 %), а в порівнянні із відмовостійкою РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, яка вважається працездатною з двома працездатними мажоритарними структурами, на 10937 год. (або на 159 %).

Задача №5. Необхідно визначити необхідну кількість ремонтів для відмовостійкої РЕСВП з мажоритарною структурою і правилом голосування «3 із 5» та з ковзним резервом, яка забезпечить задані значення показників функціональної безпечності (ймовірність потрапляння у передаварійну ситуацію та частота потрапляння у аварійну ситуацію). Результати досліджень, що наведені на рисунку 4.23 отримані для наступних вхідних даних: N – початкова кількість модулів ядра МС ($N = 5$); M – кількість ковзного резерву ($M = 1$); λ_0 – інтенсивність відмов модулів ядра МС ($\lambda_0 = 0,0001$ 1/год); R – запланована кількість ремонтів модулів ($R = 0, 1, 2, 3, 4$).

Для кожного варіанту відмовостійкої РЕСВП з МС і запланованою кількістю ремонтів розробляється граф станів. На основі кожного графа станів компонується формули для визначення ймовірності виникнення передаварійної ситуації.

Ймовірність виникнення передаварійної ситуації у відмовостійкій РЕСВП без ремонту:

$$P_{\text{pas}}(t) = P_5(t) + P_6(t) \quad (4.7)$$

Ймовірність виникнення передаварійної ситуації у відмовостійкій РЕСВП з 1 ремонтом:

$$P_{\text{pas}}(t) = P_5(t) + P_6(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t) \quad (4.8)$$

Ймовірність виникнення передаварійної ситуації у відмовостійкій РЕСВП з 2 ремонтами:

$$P_{\text{pas}}(t) = P_5(t) + P_6(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t) + P_{17}(t) + P_{18}(t) \quad (4.9)$$

Ймовірність виникнення передаварійної ситуації у відмовостійкій РЕСВП з 3 ремонтами:

$$P_{\text{pas}}(t) = P_5(t) + P_6(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t) + P_{17}(t) + P_{18}(t) + P_{23}(t) + P_{24}(t) \quad (4.10)$$

Ймовірність виникнення передаварійної ситуації у відмовостійкій РЕСВП з 4

ремонтами:

$$P_{pas}(t) = P_5(t) + P_6(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t) + P_{17}(t) + P_{18}(t) + P_{23}(t) + P_{24}(t) + P_{29}(t) + P_{30}(t)$$

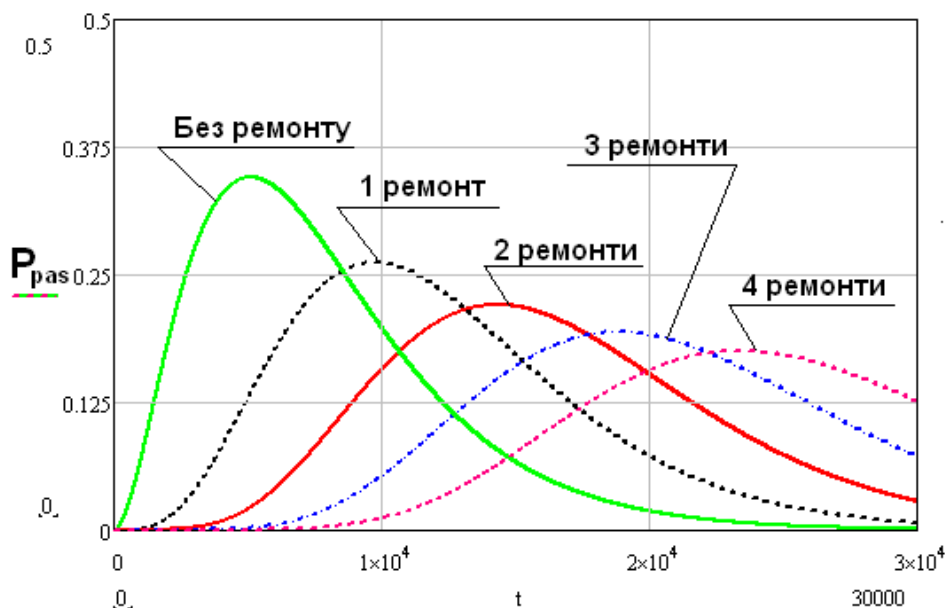


Рис. 4.23 – Залежності ймовірностей виникнення передаварійної ситуації у відмовостійкій РЕСВП з МС з правилом голосування «3 із 5» і з різною кількістю ремонтів, від тривалості її експлуатації

Аналогічно, на основі кожного графа станів, komponуються формули для визначення середнього значення частоти попадання в аварійну ситуацію:

Середнє значення частоти попадання у аварійну ситуацію відмовостійкої РЕСВП без ремонту:

$$P_{chpas}(t) = \lambda_5 \cdot P_5(t) + \lambda_6 \cdot P_6(t) \quad (4.11)$$

Середнє значення частоти попадання у аварійну ситуацію відмовостійкої РЕСВП з 1 ремонтом:

$$P_{chpas}(t) = \lambda_5 \cdot P_5(t) + \lambda_6 \cdot P_6(t) + \lambda_{11} \cdot P_{11}(t) + \lambda_{12} \cdot P_{12}(t) \quad (4.12)$$

Середнє значення частоти попадання у аварійну ситуацію відмовостійкої РЕСВП з 2 ремонтами:

$$P_{chpas}(t) = \lambda_5 \cdot P_5(t) + \lambda_6 \cdot P_6(t) + \lambda_{11} \cdot P_{11}(t) + \lambda_{12} \cdot P_{12}(t) + \lambda_{17} \cdot P_{17}(t) + \lambda_{18} \cdot P_{18}(t) \quad (4.13)$$

Середнє значення частоти попадання у аварійну ситуацію відмовостійкої РЕСВП з 3 ремонтами:

$$P_{chpas}(t) = \lambda_5 \cdot P_5(t) + \lambda_6 \cdot P_6(t) + \lambda_{11} \cdot P_{11}(t) + \lambda_{12} \cdot P_{12}(t) + \lambda_{17} \cdot P_{17}(t) + \lambda_{18} \cdot P_{18}(t) +$$

$$+ \lambda_{23} \cdot P_{23}(t) + \lambda_{24} \cdot P_{24}(t) \quad (4.14)$$

Середнє значення частоти попадання у аварійну ситуацію відмовостійкої РЕСВП з 4 ремонтами:

$$P_{\text{chpas}}(t) = \lambda_5 \cdot P_5(t) + \lambda_6 \cdot P_6(t) + \lambda_{11} \cdot P_{11}(t) + \lambda_{12} \cdot P_{12}(t) + \lambda_{17} \cdot P_{17}(t) + \lambda_{18} \cdot P_{18}(t) + \\ + \lambda_{23} \cdot P_{23}(t) + \lambda_{24} \cdot P_{24}(t) + \lambda_{29} \cdot P_{29}(t) + \lambda_{30} \cdot P_{30}(t) \quad (4.15)$$

Результати дослідження, що наведені на рисунку 4.24 отримані для поданих вище вхідних даних:

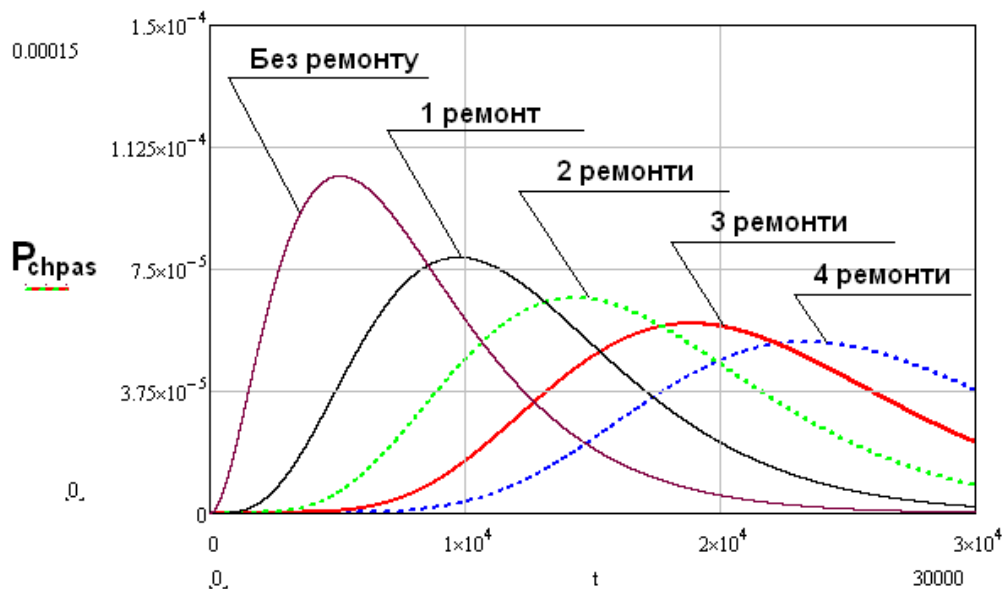


Рис. 4.24 – Залежності середніх значень частоти попадання в аварійну ситуацію відмовостійкої РЕСВП з мажоритарною структурою «3 із 5», для різної кількості ремонтів, від тривалості її експлуатації

Висновки до розділу 4.

1. Для визначення ефективності засобів підвищення відмовостійкості РЕСВП з мажоритарною структурою введено нові показники безпечності, а саме: ймовірність потрапляння в передаварійну ситуацію та частоту та потраплянь в аварійну ситуацію. Ці показники дають змогу кількісно оцінити варіанти реконфігурацій мажоритарної структури та варіанти дворівневих мажоритарних структур з точки зору безпечності, що дає можливість відкинути недоцільні варіанти ще на етапі системотехнічного проектування.
2. Удосконалено аналітичну модель для визначення граничної працездатності

відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією МС. Дана модель на відміну від існуючих дозволяє враховувати довільне правило реконфігурації МС при синтезі РЕСВП, що дало змогу підвищити достовірність отриманих результатів.

3. Розроблено нову аналітичну модель для визначення граничної працездатності відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур. Розроблені моделі, на відміну від існуючих, враховують ковзний резерв, який формується з працездатних модулів, які залишилися справними після відмови мажоритарного елемента ядра або 2-х модулів в одному ядрі. Це дало змогу розв'язувати задачі надійнісного синтезу відмовостійкої РЕСВП із заданим рівнем безпечності.
4. Ступінь адекватності розроблених моделей відмовостійких систем з МС дає змогу покласти їх в основу методики надійнісного синтезу. Цінність методики синтезу в тому, що під час розв'язання задачі розробник РЕСВП вводячи надлишковість і визначаючи показники надійності має змогу відслідковувати тенденцію зміни та отримати кількісні значення показників функціональної безпечності РЕСВП. Це дозволяє не завищувати кількість резервних модулів, показники їх надійності, не ускладнювати правила голосування, а відповідно не підвищувати необґрунтовано вартість, масо-габаритні показники та складність відмовостійких РЕСВП з мажоритарною структурою.

РОЗДІЛ 5. СИНТЕЗ БЕЗПЕЧНИХ АЛГОРИТМІВ ПОВЕДІНКИ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Безпечність складних технічних систем визначається не тільки відмовостійкою структурою та надійнісною поведінкою радіоелектронної системи відповідального призначення (РЕСВП), а також її функціональною поведінкою. Функціональна поведінка визначається алгоритмом, який задає умови і послідовність дій підсистем та модулів РЕСВП при виконанні нею завдання. Алгоритм поведінки (АП) розробляється на етапі системотехнічного проектування РЕСВП [244]. Прикладом таких АП є алгоритми пошуку і виявлення цілей [105, 206, 207], алгоритми отримання, запису та передавання телеметричних даних [245], алгоритми отримання навігаційних даних [246], алгоритми керування [246], тощо.

Особливістю алгоритмів поведінки РЕСВП є як успішне так й неуспішне завершення (виконання завдання) алгоритму [248]. Неуспішні завершення АП призводять до аварійних ситуацій. Для забезпечення заданого рівня функціональної безпечності РЕСВП необхідно мінімізувати ймовірність неуспішного завершення її алгоритму поведінки.

Для мінімізації неуспішних завершень алгоритму поведінки РЕСВП, на практиці, передбачають повторне виконання особливо критичних, з точки зору безпечності, функцій у випадку відмов апаратури, збоїв в програмному забезпеченні чи помилок оператора. Повторне виконання певних функцій в межах часу виконання АП називають часовою надлишковістю. Часова надлишковість передбачає повторне виконання сукупності операційних блоків АП [249], тобто в АП вводять додаткові цикли. Однак, характерною особливістю РЕСВП є граничне значення тривалості виконання кожної функції і АП в цілому. Якщо це значення перевищить гранично допустиме, то алгоритм неуспішно завершує свою роботу і РЕСВП потрапить у критичну відмову, а складна технічна система, в складі якої функціонує ця РЕСВП, в аварійну ситуацію. Таким чином, введення часової надлишковості при певних вимогах до тривалості виконання АП може бути не прийнятним.

Якщо після кількох повторних циклів РЕСВП не змогла виконати завдання, а середній час виконання циклу перевищив граничне значення, то відбувається переключення на інший спосіб виконання невиконаної функції (переключення на іншу підсистему, що входить в склад РЕСВП). Якщо і ця підсистема не змогла виконати свою функцію, то здійснюється переключення на наступну. Тобто, в цьому випадку, успішне завершення АП забезпечується функціональною надлишковістю [250].

Таким чином, якщо всі функції, передбачені в АП, виконано, виконано, то маємо успішне його завершення, якщо ні, то неуспішне завершення, а відповідно складна технічна система, в складі якої функціонує ця РЕСВП, попадає в аварійну ситуацію. Перевірка ефективності введення кожного з різновидів надлишковості повинна відбуватись на етапі системотехнічного проектування РЕСВП і повинна дати відповіді на наступні питання:

- Для яких функцій АП потрібно ввести повторні цикли?
- Скільки разів кожен цикл має виконатись?
- Чи перевищить середнє значення тривалості виконання алгоритму поведінки граничне значення?
- Чи потрібно переключитись на іншу підсистему РЕСВП для виконання невиконаної функції?
- Як вплине введення надлишковості на показник безпечності функціонування РЕСВП?

Отже, на етапі системотехнічного проектування, проєктант повинен мати методологію (сукупність моделей, методів та методик) яка дасть змогу ввести такі засоби часової та функціональної надлишковості і синтезувати такий АП, що забезпечить з одного боку заданий рівень функціональної безпечності, а з іншого - заданий рівень функціональної ефективності РЕСВП. Такі алгоритми в подальшому будемо називати безпечними АП.

Відсутність такої можливості у сучасних засобів проектування змушує здійснювати перевірку на предмет безпечності лише на етапі випробувань [251] складної технічної системи. Однак такий підхід не завжди є прийнятним, оскільки

за наявності помилок в алгоритмі поведінки РЕСВП в аварійну ситуацію може потрапити і складна технічна система в цілому. Такі випадки в останні роки часто проявлялись під час запуску літальних космічних апаратів Союз (2018р), Прогрес (2018 р., 2017р., 2016 р.), DragonSpace, ракет військового призначення Булава (2017 р.). Основними причинами, практично усіх аварійних ситуацій, були помилки в алгоритмах керування розгонними блоками, в системах керування, в системах навігації. Як показав проведений аналіз, ці помилки не були виявлені на етапі проектування. Наслідки від таких аварій є дуже суттєвими – це потенційна можливість загибелі екіпажу, зараження значних територій небезпечними речовинами (ракетним паливом), небезпека потенційного падіння вибухонебезпечних предметів на житлові будинки тощо.

Як було сказано вище, для синтезу безпечних АП необхідно вводити часову та функціональну надлишковість і визначати їх вплив на показники ефективності алгоритму, оскільки показники безпечності та ефективності АП тісно пов'язані між собою. Визначальним для цього є правильний вибір і правильне використання показників функціональної безпечності РЕСВП.

Розглянемо модель всіх можливих варіантів реалізації АП в процесі експлуатації РЕСВП у вигляді графа станів і переходів. Для цього треба собі уявити, що нібито ведеться спостереження за РЕСВП на якій багато разів запускають той самий АП. В результаті виконання алгоритму поведінки РЕСВП потрапляє у різні стани. Стани поточного виконання визначаються детермінованими чинниками, які визначають процес виконання АП (кількість операційних блоків, тривалість виконання операційного блоку, кількість циклів, кількість шляхів тощо), а стани успішного завершення та аварійні стани визначаються випадковими чинниками, які призводять до невиконання чи зупинки АП (вихід з ладу підсистем, не спрацювання окремих підсистем, помилки оператора, перевищення граничного значення тривалості ($T_{гр}$) виконання АП, зовнішні завади тощо). Таким чином повний простір станів буде складатися з трьох груп станів:

- стани першої групи будуть відображати процес переходу із одного

операційного блоку АП до іншого в процесі виконання цільової функції;

- стани другої групи – це успішне завершення АП;
- стани третьої групи – це неуспішне завершення АП.

В результаті виконання алгоритму поведінки, РЕСВП буде знаходитись в першій групі станів певний час, середнє значення якого ($T_{сер}$) не повинно перевищувати граничне значення тривалості виконання ($T_{ГР}$) завдання РЕСВП. В залежності від зовнішніх та внутрішніх чинників РЕСВП буде переходити у групу 2 або у групу 3. Якщо час перебування РЕСВП в першій групі станів перевищить граничне значення ($T_{ГР}$), то РЕСВП не виконає свого завдання і складна технічна система і потрапить в аварійну ситуацію. Якщо РЕСВП за час $T_{сер} \leq T_{ГР}$ переходить у групу станів 2, то свою функцію РЕСВП виконала успішно. Якщо РЕСВП потрапляє в групу станів 3, то для них існує два варіанти наслідків:

- при $t \leq T_{ГР}$, РЕСВП може повертатись в групу станів 1 в результаті повторного виконання частини АП. Причому, кількість потраплянь в групу станів 3 з групи станів 1 і назад при виконанні вищезазначеної умови може бути декілька.
- при $t > T_{ГР}$, РЕСВП залишається в групі станів 3 тому що АП потрапляє у стан неуспішного виконання задачі, а РЕСВП спричиняє аварійну ситуацію.

Потрапляння РЕСВП в групу станів 1 та 2 характеризується **ймовірністю успішного завершення АП** – $P_{ВЗ}(t)$. Це ймовірність того, що РЕСВП в результаті виконання АП виконає своє завдання. Дана ймовірність є сумою ймовірностей перебування у k станах успішного виконання - $P_j(t)$

$$P_{ВЗ}(t) = \sum_{j=1}^k P_j(t), \quad (5.1)$$

Середнє значення тривалості виконання АП: виконання АП:

$$T_{сер} = \int_0^{\infty} P_{ВЗ}(t) dt \quad (5.2)$$

Потрапляння РЕСВП в групу станів 3 характеризується **ймовірністю неуспішного (аварійного) завершення АП** – $Q(t)$. Це ймовірність того, що результатом неуспішного завершення АП буде не виконання РЕСВП свого завдання. Кількісно дану ймовірність можна обчислити як суму ймовірностей

перебування АП в станах неуспішного завершення.

$$Q(t) = \sum_{i=q}^v P_i(t), \quad (5.3)$$

де q, \dots, v – номери станів неуспішного завершення АП

Однак ймовірність неуспішного завершення АП є інтегральною характеристикою алгоритму і не дає змоги оцінити скільки разів за час $T_{\text{СЕР}}$ РЕСВП потрапить в аварійний стан.

Тому, пропонується ввести нову *характеристику безпечності* експлуатації АП – *частоту потрапляння у стани неуспішного завершення*:

$$w(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \sum_{q=0}^{z-1} \lambda_{z,z-q} \cdot P_q(t), \quad (5.4)$$

де $\lambda_{z,z-q}$ – інтенсивність переходу в стан неуспішного завершення АП з стану q ,

$P_q(t)$ - ймовірність перебування РЕСВП в стані q ,

$Q(t)$ - ймовірність потрапляння РЕСВП в аварійний стан.

Вигляд характеристики безпечності експлуатації АП (рис.5.1.) має наступні варіанти.

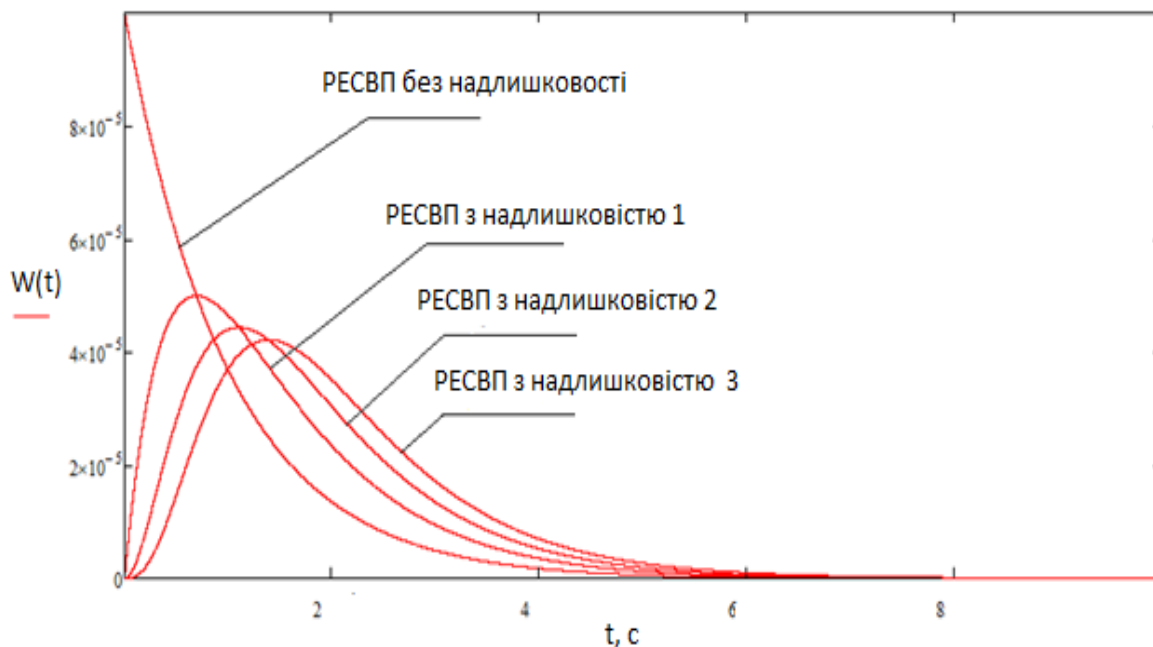


Рис. 5.1. Варіанти вигляду характеристики безпечності АП

Якщо РЕСВП не має функціональної та структурної надлишковості, то максимум характеристики безпечності $w(t)$ буде в точці $t=0$, а характеристика буде

спадати до нуля.

При наявності надлишковості $w(t)$ в момент $t = 0$ може приймати значення ≥ 0 і далі збільшуватися до якогось максимального значення, а тоді спадати до нуля. Чим більше надлишковості (часової і/або функціональної) введено в АП тим менше буде значення максимуму $w(t)$ і тим далі вправо він переміститься. Тобто, при збільшенні надлишковості, частота потрапляння в аварійний стан зменшується.

Зв'язок характеристики безпеки з показниками ефективності РЕСВП приведено на рис.5.2.

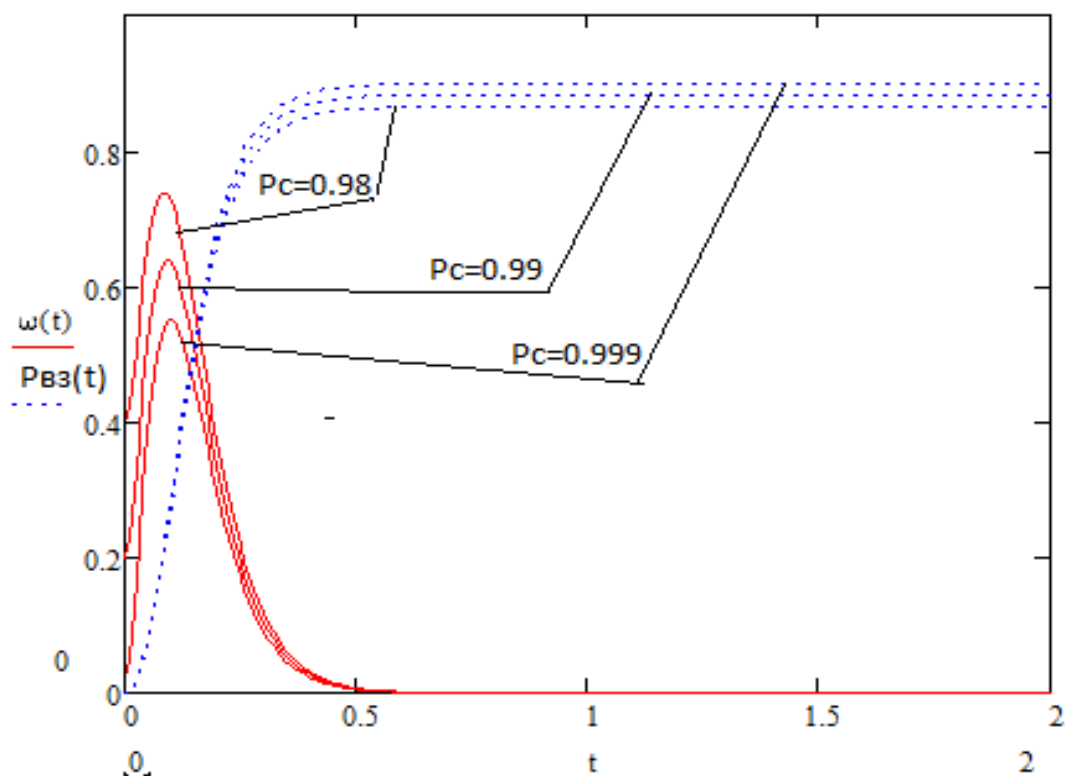


Рис. 5.2. Зв'язок характеристики безпеки експлуатації АП з показником ефективності РЕСВП

Таким чином, суть синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП полягає в мінімізації максимального значення $\omega(t)$ - частоти потрапляння у стани неуспішного виконання при таких обмежуючих умовах:

- мінімально допустимому граничному значенні ймовірності успішного завершення АП – $P_{ГР}(t)$
- граничному значенні ймовірності неуспішного завершення АП – $Q(t)$,

5.1. Методологія синтезу безпечних алгоритмів поведінки радіоелектронних систем відповідального призначення

Потенційну ефективність введеної часової надлишковості в АП оцінюють за допомогою засобів моделювання на етапі проектування, а реальну ефективність – на етапі натурних випробувань. Дуже часто ці оцінки суттєво розходяться і доведення алгоритму поведінки РЕСВП до потрібного рівня ефективності (безпечності) відбувається вже експериментально, що призводить до збільшення витрат на випробування в 3 - 5 разів [251].

Дослідження сучасних методів моделювання АП проведено в [106, 248]. Ці дослідження показали, що такий стан речей обумовлений тим, що при оцінюванні показників ефективності АП (ймовірність виконання задачі та середній час виконання задачі) переважна більшість сучасних засобів не враховують наступного:

- в блок-схемі АП, крім блоку успішного виконання, є один або декілька блоків неуспішного виконання цільової функції РЕСВП. Наявність блоків неуспішного виконання обумовлено тим, що в результаті дії зовнішніх (завади, намірена протидія тощо) і внутрішніх (збої та відмови апаратного і програмного забезпечення, помилки оператора тощо) чинників функціонування РЕСВП може завершуватись аварійною зупинкою, переходом в режим контролю справності підсистем, переходом в безпечний режим роботи після аварійної ситуації для запобігання катастрофічних наслідків.
- частина перевірочних блоків є детермінованими (перевірка умов виходу з циклу, перевірка умов зміни напрямку виконання АП тощо), а частина перевірочних блоків є стохастичними і результат їх виконання визначається ймовірністю виконання конкретної функції апаратурою, програмним забезпеченням чи оператором. Наявність стохастичних блоків обумовлено параметрами, значення яких наперед є невідомими, а задаються або середніми значеннями, наприклад, тривалості виконання функції окремою

підсистемою, або густиною ймовірності чи ймовірністю появи, наприклад відмови обладнання, помилкової дії оператора. Такі блоки відображають дію внутрішніх (відмови, збої) та зовнішніх (завади, дія інших систем) чинників. Сучасні засоби моделювання АП не передбачають врахування стохастичних перевірочних блоків.

Методологія синтезу безпечних АП РЕСВП складається з сукупності методів, моделей та методик представлених у вигляді блок-схеми на рис. 5.3. Дана методологія складається з *п'яти* етапів.

Етап 1: Евристичний синтез алгоритму поведінки РЕСВП. Формування еквівалентного алгоритму на основі його оригіналу. Еквівалентний алгоритм – це модель оригіналу у вигляді блок-схеми, в якому враховано блоки неуспішного завершення та стохастичні перевірочні блоки.

Етап 2. Розроблення структурно-автоматної моделі алгоритму поведінки на основі еквівалентного алгоритму. Структурно-автоматна модель дає змогу здійснювати формалізовану (автоматизовану) побудову моделей у вигляді графа станів і переходів для будь-яких значень показників функціональності та параметрів АП.

Етап 3. Формування аналітичної моделі алгоритму поведінки у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена та її розв'язання. Даний етап вирішується застосуванням методу простору станів.

Етап 4. Компонування формул для визначення показників ефективності алгоритму поведінки. Формули компонуються евристичним методом.

Етап 5. Розв'язання задач синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП. Метод розв'язання – багатоваріантний аналіз доцільних варіантів реалізації (побудови) АП.

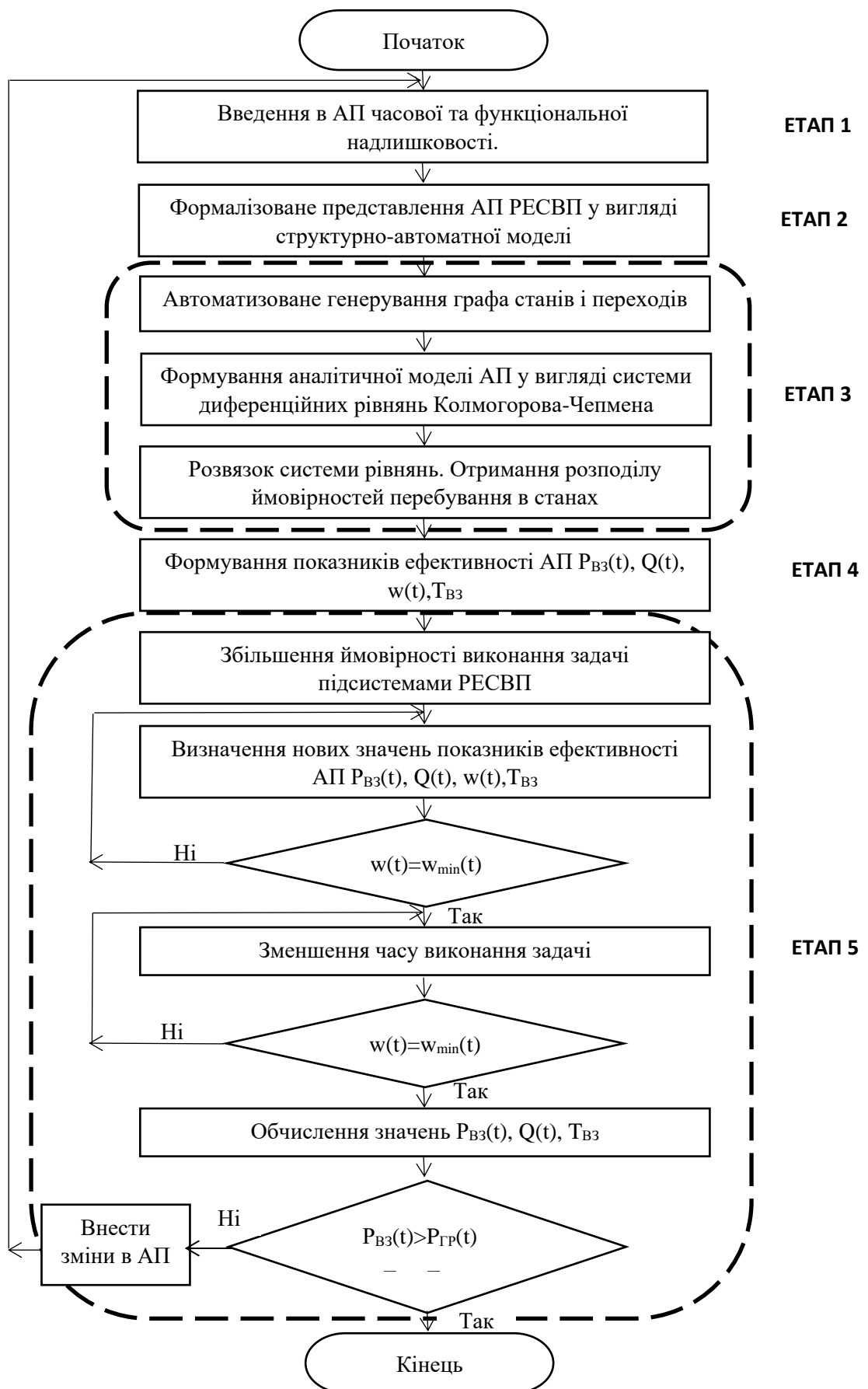


Рис. 5.3. Методологія синтезу безпечних АП РЕСВП

На *першому етапі* в формується базовий алгоритм поведінки РЕСВП і представляється у вигляді блок-схеми. Наступним кроком, в базовий АП, емпірично вводиться часова надлишковість в критичні, з точки зору успішного виконання, функції. Практично це реалізується у циклічному повторному виконанні певних операційних блоків. Таких циклів повторного виконання певних функцій в АП може бути декілька десятків. Причому, виникає певне протиріччя: з одного боку наперед неможливо наперед визначити кількість повторних виконань, а з іншого – не можна допускати зациклення на певній функції (занадто довгих за тривалістю циклів). Якщо після певної кількості повторних виконань підсистема не може виконати поставлену задачу, то з певною ймовірністю виконання задачі передається іншій підсистемі, якщо є така можливість. Таким чином вводиться функціональна надлишковість. Введення функціональної надлишковості в модель АП здійснюється шляхом введення в блок-схему АП стохастичних перевірочних блоків. Якщо, при певних умовах застосування, при введенні часової і функціональної надлишковості РЕСВП за заданий час не може виконати поставлену задачу із заданою ймовірністю, то АП завершується неуспішним виконанням. Таким чином, після введення додаткових циклів та стохастичних блоків вибору інших підсистем, на основі базового АП, отримується еквівалентний АП.

На *другому етапі* здійснюється розроблення структурно-автоматної моделі АП, яка є формалізованим представленням алгоритму поведінки РЕСВП. Особливістю САМ алгоритму поведінки буде наявність двох типів перевірочних блоків (стохастичних та детермінованих) та однієї базової події – виконання операційного блоку. Також САМ буде містити блоки успішного та неуспішного завершення АП.

На *третьому етапі* на основі САМ, за допомогою програмного забезпечення ASNA [103], автоматизовано генерується граф станів і переходів та здійснюється формування аналітичної моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Така система рівнянь формується автоматизовано та розв'язується чисельно за допомогою програмного забезпечення ASNA. В

програмному забезпеченні ASNA передбачено експорт системи рівнянь у вигляді матриці інтенсивностей переходів для розв'язування аналітично за допомогою програмного забезпечення Matlab, методом матричної експоненти. В результаті розв'язку системи диференціальних рівнянь на третьому етапі буде отримано розподіл ймовірностей перебування у кожному стані.

На *четвертому етапі* komponуються формули для визначення показників ефективності АП. Ці формули представляють собою суми ймовірностей перебування у відповідних станах.

На *п'ятому етапі* виконується розв'язання задач синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП через багатоваріантний аналіз. Зауважимо, що показники ефективності АП залежать від показників функціональної ефективності і надійності РЕСВП та параметрів його АП, а саме: ймовірності ймовірність виконання задачі підсистемою, середнє значення тривалості виконання задачі підсистемою, ймовірність безвідмовної роботи підсистеми, кількість циклів повторного виконання операційних блоків АП, ймовірність переходу на альтернативну підсистему тощо). Змінюючи ці показники знаходять мінімальне значення частоти потрапляння – $\omega_{\min}(t)$ в стани неуспішного виконання АП – показник безпечності. Якщо $P_{ВЗ}(t) > P_{ГР}(t)$, $T_{ВЗ} < T_{ГР}$, то отриманий АП є безпечним. Якщо дана умова не виконується, то необхідно внести зміни в АП і повторити усі вищезазначені етапи.

5. 2. Методика підтвердження достовірності отриманого результату синтезу безпечного алгоритму поведінки

Для підтвердження достовірності отриманого результату синтезу безпечного АП потрібно порівняти їх з експериментальними даними. Оскільки на етапі системотехнічного проектування отримати результати експерименту є неможливим, то необхідно провести моделювання принципово іншим методом.

Ключовим в цій методиці є вибір альтернативного методу моделювання АП. Він повинен дати змогу врахувати неуспішні виконання АП та наявність стохастичних та детермінованих переходів. Серед можливих варіантів для

моделювання АП РЕСВП на сьогодні найбільш перспективними є такі методи: мова алгоритмічних алгебр, метод траєкторного моделювання та метод простору станів. В [106] було проведено аналіз ефективності цих методів і найбільш доцільним для АП РЕСВП слід використати метод схеми шляхів [248, 251].

Схема шляхів є формалізованим представленням функціональної поведінки РЕСВП в компактній формі, що відображає сукупність всіх шляхів, які ведуть до успішного виконання або невиконання цільової функції РЕСВП. На відміну від методу простору станів схема шляхів не дає змоги отримати показники ефективності у вигляді розподілів чи функцій, а лише у вигляді значень ймовірності потрапляння в аварійну ситуацію та середнє значення часу виконання АП. Ці числові значення будуть порівнюватися з значеннями, отриманими методом простору станів і при їх співпадінні з певною точністю можна зробити висновки про адекватність результатів моделювання, отриманих методом простору станів.

Методика перевірки достовірності результатів синтезу безпечного АП представлена на рис. 5.2.

На *першому етапі* методика передбачає представлення АП у вигляді блок-схеми, модель якого на *другому етапі* представляють у формалізованому вигляді, у вигляді схеми шляхів [248]. Дане представлення є модифікацією логіко-ймовірнісного методу комутації ймовірнісних пакетів [201] і є компактным, на відміну від блок-схеми, представленням АП.

На *третьому етапі* необхідно, на основі моделі АП у вигляді схеми шляхів, сформулювати вирази для визначення показників ефективності, а саме ймовірності виконання та середнього значення тривалості виконання завдання РЕСВП з урахуванням усіх шляхів алгоритму.

Четвертий етап передбачає введення вхідних даних для моделювання.

На *п'ятому етапі* здійснюється моделювання процесу виконання АП. Тут передбачається обчислення ймовірності виконання та середнього значення тривалості виконання завдання РЕСВП на j -му кроці виконання кожного циклу.

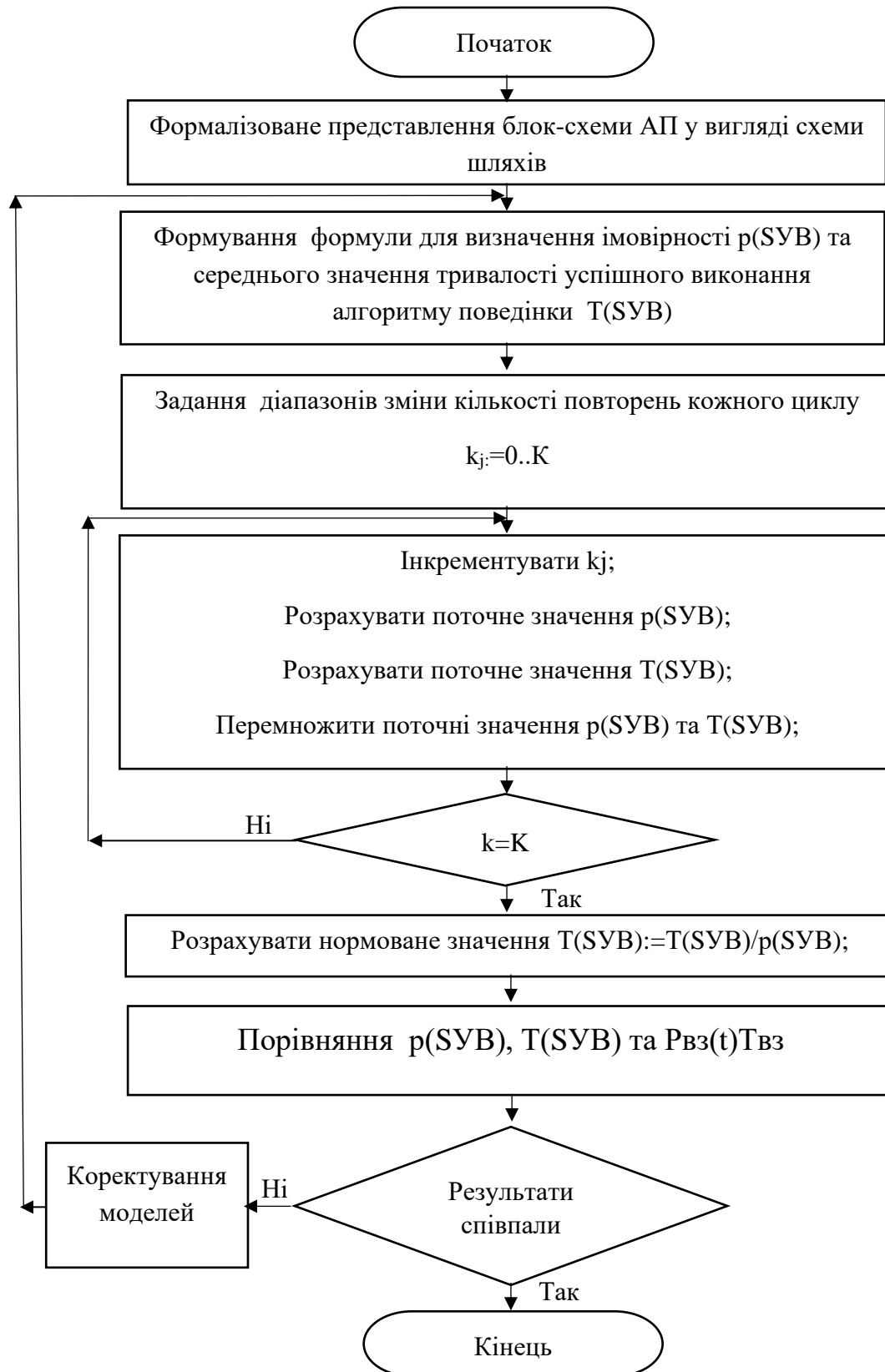


Рис.5.4. Схема методики підтвердження достовірності отриманих результатів синтезу АП

Далі за допомогою детермінованого блоку визначається завершення кожного

циклу.

На шостому етапі відбувається розрахунок значень ймовірності виконання та середнього значення тривалості виконання завдання РЕСВП з урахуванням неуспішних завершень АП.

Далі здійснюється перевірка відповідності розрахованих значень ймовірності виконання та середнього значення тривалості виконання АП, значенням цих же показників, отриманих за допомогою методу простору станів.

Якщо результати співпадають, то синтез безпечного АП проведено успішно, якщо не співпадають, то необхідно провести коректування АП і повторити процес синтезу алгоритму поведінки РЕСВП.

Нижче показано методики виконання кожного етапу методології синтезу безпечних АП, на прикладі АП прицільного радіоелектронного комплексу/

5.3. Методика формування блок-схеми еквівалентного алгоритму поведінки

Для синтезу безпечного алгоритму поведінки РЕСВП необхідно емпірично сформувавши початковий варіант (варіанти) моделі алгоритму у вигляді блок-схеми. Для алгоритму функціональної поведінки РЕСВП притаманні такі особливості, які необхідно відобразити в його моделі, а саме [105, 106]:

наявність: циклів повторного виконання окремих фрагментів АП, включаючи використання часової надлишковості; процедури підключення резерву; процедур самоконтролю і діагностики апаратних засобів; програмного забезпечення;

наявність стохастичних і детермінованих переходів для розрізнення виходів з ладу апаратних засобів та збоїв програмного забезпечення та реалізації виходу з циклу за певної (детермінованої) умови;

наявність блоків успішного і неуспішного виконання АП.

Для побудови моделі алгоритму поведінки у вигляді блок-схеми, треба його представити наступним чином. Операційні блоки АП відображають функції підсистем та пристроїв, які входять в склад РЕСВП. Тривалість виконання кожної функції є випадковою величиною і описується значенням $T_{сер}$, що відображає середній операційний час виконання функції.

Необхідно зазначити, що послідовно з'єднані операційні блоки, зміна параметрів яких не потребує деталізації при моделюванні, об'єднують в один із сумуванням $T_{сер}$ кожного операційного блоку. Таким чином можна редукувати графічне відображення алгоритму, а відповідно і розмірність моделі, оскільки кількість операційних блоків АП визначає розмірність моделі.

Перевіряючі блоки АП відображають розгалуження і розділені на два типи: стохастичний блок *альтернативного переходу* і детермінований блок *умовного переходу*.

Стохастичний блок альтернативного переходу призначений для опису роботи: апаратури (ймовірність виконання завдання), яка входить в склад РЕСВП та зміни режиму її роботи в процесі виконання задачі; засобів контролю і діагностики.

Цикли АП графічно відображаються на блок-схемі розгалуженнями перевіряючих блоків з переходом на один із попередніх операційних блоків. При цьому перехід на цільовий операційний блок для унеможливлення зациклення алгоритму при моделюванні доцільно зробити не безпосередньо, а через проміжний блок, що виконуватиме функцію лічильника кількості виконаних циклів.

Успішне чи неуспішне виконання АП завершується у відповідному блоці.

На рисунку 5.5 показано приклад блок-схеми еквівалентного алгоритму поведінки РЕСВП. Базовим АП послужив евристично розроблений фрагмент алгоритму пошуку, виявлення та захоплення цілей для прицільного радіоелектронного комплексу (РЕК).

Базовий алгоритм прицільного РЕК містить наступні функції та процедури: отримання цілевказівки, пошук цілі, повторний пошук цілі, контроль, діагностика, введення координат цілі, захоплення цілі. В цьому алгоритмі використано часову надлишковість для функції пошуку цілі, яка реалізована у вигляді циклу. Алгоритм поведінки складається з 8 операційних блоків (4 з них – кінцеві: один блок – успішного виконання та три блоки неуспішного виконання) та 5 перевіряючих блоків (4 стохастичні альтернативного переходу та 1 детермінований умовного переходу).

Таке представлення еквівалентного АП отримується на першому етапі методології синтезу безпечних АП і є вхідними даними для побудови САМ.

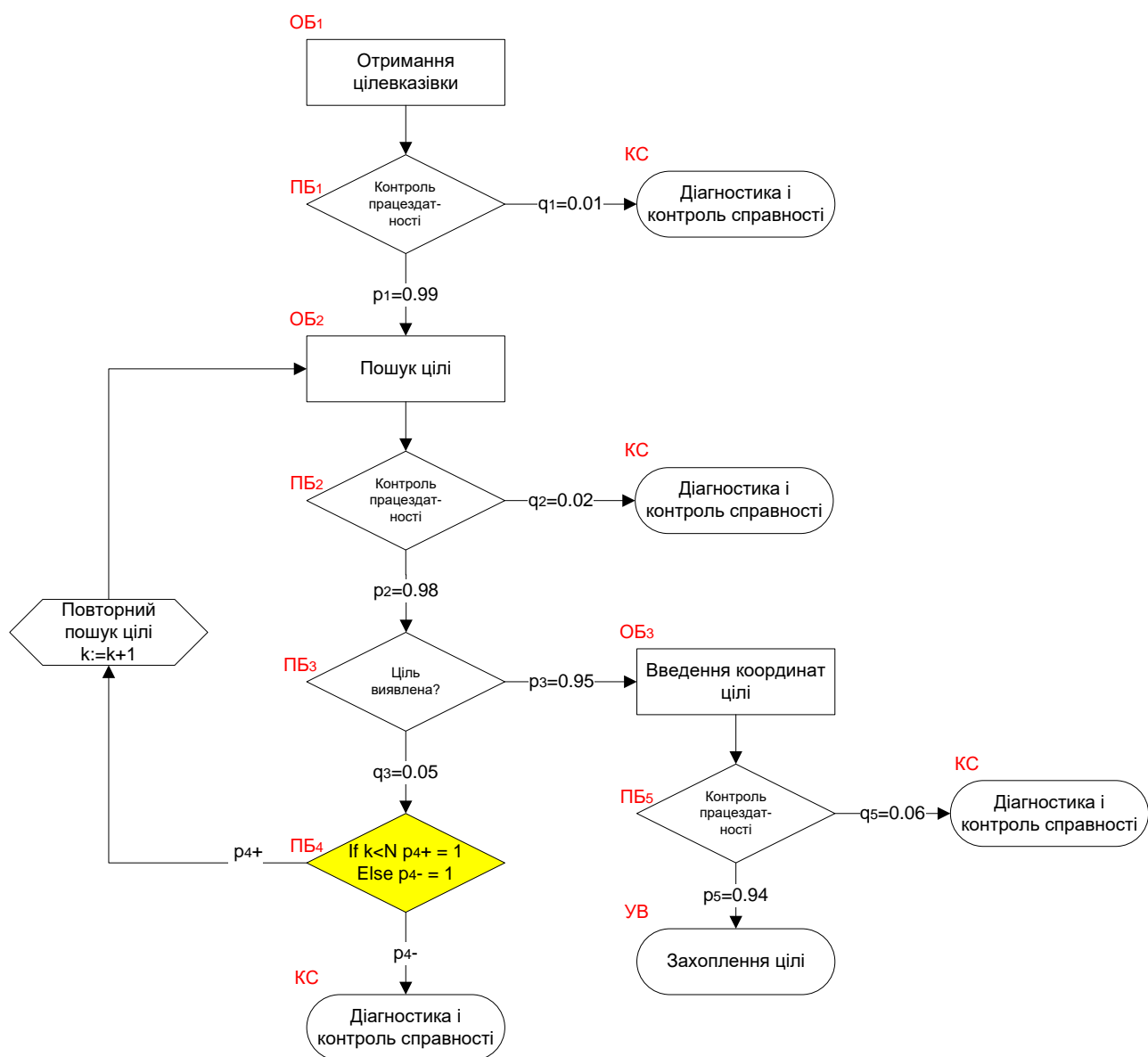


Рис. 5.5. Блок-схема алгоритму поведінки прицільного РЕК

5.4. Методика побудови структурно-автоматної моделі алгоритму поведінки радіоелектронної системи відповідального призначення

Для синтезу безпечного алгоритму поведінки РЕСВП треба мати показники його безпечності та ефективності і змінюючи параметри АП привести ці показники до заданих значень. Для цього потрібно перейти від блок-схеми еквівалентного АП до математичної моделі, яка дасть змогу визначати значення показників

безпеки та ефективності. Ефективним інструментом такого переходу є удосконалений метод простору станів. Даний метод дає змогу здійснити розроблення стохастичної моделі у вигляді графа станів і переходів, в якому мають бути представлені всі три групи станів, зазначених вище.

Для отримання графа станів та переходів необхідно спочатку представляти АП у вигляді структурно-автоматної моделі (САМ) [105]. На наступному етапі за допомогою спеціального алгоритму [102] автоматизовано згенерувати граф станів і переходів і на його основі сформуванати аналітичну модель АП у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена.

Структурно-автоматна модель еквівалентного алгоритму поведінки РЕСВП складається з трьох множин даних: множина формальних параметрів, що містить усі константи та їх значення, які використовуються при формуванні математичної моделі РЕСВП; вектор стану, призначений для кодування станів, у яких може знаходитися РЕСВП в процесі виконання завдання; дерево правил модифікації компонент вектора стану – формалізоване представлення функціональної або надійнісної поведінки РЕСВП. Особливістю в побудові дерева правил модифікації вектора стану для є те, що для АП характерною є лише одна базова подія – виконання операційного блоку.

5.4.1. Формування множини формальних параметрів та вектора стану

При побудові САМ алгоритму поведінки особливі вимоги ставляться до множини формальних параметрів, оскільки вона повинна містити всі техніко-тактичні характеристики складових РЕСВП (середні значення тривалості виконання кожної функції РЕСВП, імовірності виконання цих функцій, надійність апаратних засобів і програмного забезпечення), що забезпечить побудову адекватної математичної моделі алгоритму поведінки РЕСВП.

Окремою задачею є формування вектора стану (ВС), що полягає в записі усіх змінних, які будуть використовуватися при побудові дерева правил модифікації вектора стану. Кількість компонент ВС визначає деталізацію опису об'єкта у моделі. З іншого боку кількість компонент ВС впливає на розмірність моделі. У ВС

вносяться компоненти, які характеризують поточний стан РЕСВП в кожен момент часу, а також компоненти, що визначають особливості режиму роботи РЕСВП.

Правильна нумерація усіх блоків повинна забезпечити зручність та швидкість формування формул розрахунку інтенсивності базової події (ФРІБП) та формули розрахунку імовірності альтернативного переходу (ФРІАП) у відповідних полях дерева правил модифікації компонент вектора стану (ПМКВС) при подальшій роботі із САМ.

У САМ у множину формальних параметрів потрібно ввести задані імовірності правильного виконання функцій РЕСВП та середні значення тривалості їх виконання.

Інтенсивність переходу [106] із j -го стану моделі РЕК у $(j+1)$ -ий дорівнює добутку інтенсивності виконання операційного блоку АП, що відповідає j -ому стану РЕК, на імовірності переходів перевіряючих блоків, що знаходяться на шляху АП, що веде до операційного блоку, який відповідає $(j+1)$ -ому стану моделі РЕК.

Перехід відбувається лише між описаними станами, тому у ФРІБП обов'язково повинні бути вирази, що описують середнє значення тривалості виконання операційного блоку, а у ФРІАП – імовірність альтернативного переходу до наступного операційного блоку, наприклад:

$$\lambda_{V2 \rightarrow V3} = \frac{1}{T_2} \cdot p_2 \cdot p_3 \quad (5.5)$$

або

$$\lambda_{V2 \rightarrow V3} = \frac{1}{T_2} \cdot p_{2_3} \cdot r_{3_3} \quad (5.6)$$

$\frac{1}{T_2}$
де $\frac{1}{T_2}$ – інтенсивність виконання операційного блоку – величина, обернена до середнього значення тривалості виконання ОБ₂;

p_2 і p_{2_3} – імовірності переходу з стохастичного блоку альтернативного переходу ПБ₁ в стохастичний блок альтернативного переходу ПБ₂;

p_3 і r_{3_3} – імовірності переходу з стохастичного блоку альтернативного

переходу ПБ₂ у оперційний блок ОБ₃.

5.4.2. Відображення в структурно-автоматній моделі часової надлишковості, внесеної в алгоритм поведінки

Слід зазначити, що введення в блок-схему алгоритму поведінки часової надлишковості для виконання певних функцій призвело, окрім введення стохастичного блоку альтернативного переходу, ще і додаткове введення й детермінованого блоку умовного переходу. А це, в свою чергу, зумовило особливий запис формули розрахунку імовірності альтернативного переходу. Поки лічильник кількості повторень циклу не обнулиться або не досягне максимального значення, алгоритм може виконуватися виключно по одному з можливих шляхів через перехід r_4^+ або r_4^- залежно від умови перевірки детермінованого блоку умовного переходу. Тільки після закінчення циклу і зміни початкового результату перевірки умови детермінованого блоку умовного переходу на протилежний, алгоритм виконуватиметься через інший перехід [106]:

$r_4^+ = 1$ – ймовірність переходу з детермінованого блоку перевірки умови виконання циклу, якщо умова істинна;

$r_4^- = 1$ – ймовірність переходу з детермінованого блоку перевірки умови виконання циклу, якщо умова хибна;

Формули розрахунку інтенсивності базової події, формули розрахунку імовірності альтернативного переходу та правила модифікації компонент вектора стану заносяться у відповідні поля дерева правил модифікації компонент вектора стану, яке відображає поведінку РЕСВП.

Для аналізу алгоритму поведінки у поле умови відмови програмного модуля ASNA не потрібно нічого записувати, що дає змогу отримати повний розподіл ймовірностей перебування РЕСВП у станах.

Для прикладу, при побудові САМ алгоритму поведінки (рис.5.5) необхідно розробити типову структуру вектора стану, множину формальних параметрів моделі та дерево правил модифікації згідно рекомендацій, наведених вище. В

даному випадку вектор стану алгоритму поведінки РЕСВП необхідно представити обов'язковими наступними компонентами:

V_1 – відображає номер виконуваного операційного блока згідно блок-схеми АП;

V_2 – відображає кількість виконаних циклів АП.

Компоненти вектора стану можуть набувати значень:

$V_1=1 \dots N$ – при виконанні відповідних операційних блоків;

$V_1=111$ – при досягненні стану “Успішне виконання”;

$V_1=000$ – при досягненні стану “Неуспішне виконання”;

$V_2=0 \dots M$ – після виконання відповідних циклів АП.

Множину формальних параметрів моделі складають:

p_i – ймовірність виконання i – го операційного блоку

q_i – ймовірність невиконання i – го операційного блоку

T_i – середнє значення тривалості виконання i – го операційного блоку

Дерево правил модифікації вектора стану подано в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Структурно-автоматна модель алгоритму пошуку та виявлення цілей прицільним РЕК

Умови та обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
$V_1=1$	$1/T_1$	p_1	$V_1:=2$
$V_1=1$	$1/T_1$	q_1	$V_1:=000$
$V_1=2$	$1/T_2$	p_2*p_3	$V_1:=3$
$V_1=2$	$1/T_2$	q_2	$V_1:=000$
$(V_1=2)$ $(V_2 < N)$ AND	$1/T_2$	$p_2*q_3*p_4$	$V_1:=2;$ $V_2:=V_2+1$
$(V_1=2)$ $(V_2=N)$ AND	$1/T_2$	$p_2*q_3*q_4$	$V_1:=000$
$V_1=3$	$1/T_3$	p_5	$V_1:=111$
$V_1=3$	$1/T_3$	q_5	$V_1:=000$

5.4.3. Методика верифікації розробленої структурно-автоматної моделі

Після побудови САМ алгоритму поведінки її необхідно верифікувати. Верифікація моделі АП здійснюється перевіркою наявності всіх можливих варіантів його виконання на графі станів та переходів.

Ця задача є складною та громіздкою, тому її доцільно проводити з використанням програмного модуля ASNA [103]. Особливістю такої верифікації САМ алгоритму поведінки є те, що вона проводиться поступовою перевіркою кожного запису дерева правил модифікації та шляхом перевірки окремих гілок АП. Для цього необхідно ввести в розгалужуючі перевіряючі блоки АП значення імовірностей 0 або 1 і згенерувати граф станів та переходів. Таким чином, проаналізувавши отриманий граф і переконавшись у відсутності переходів на вимкнуті стани, забезпечується ізоляція вибраних гілок алгоритму, що показує наскільки правильно записано умови і правила переходу на конкретну гілку АП.

5.5. Формування аналітичної моделі алгоритму поведінки у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена та її розв'язання

Верифікована САМ алгоритму поведінки РЕСВП є вхідними даними для програмного модуля ASNA, який автоматизовано генерує граф станів та переходів, і на його основі формує аналітичну модель у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена [102]:

$$\frac{d\bar{P}(t)}{dt} = A \cdot \bar{P}(t), \quad (5.7)$$

де $\bar{P}(t)$ – вектор-стовпець ймовірностей існування станів, в яких може перебувати РЕСВП при виконанні АП;

A – матриця інтенсивностей переходів із стану в стан;

$\frac{d\bar{P}(t)}{dt}$ – вектор-стовпець похідних по часу ймовірностей існування станів, в яких може перебувати РЕСВП при виконанні АП.

Для прикладу, граф станів і переходів для АП прицільного РЕК, представлений на рис 5.6 містить 13 станів та 16 переходів. Стани 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10 – відповідають виконанню блоків АП. Стани 8, 12 і 13 відповідають станам

успішного завершення АП. Стани 3, 7 і 11 відповідають станам неуспішного завершення АП.

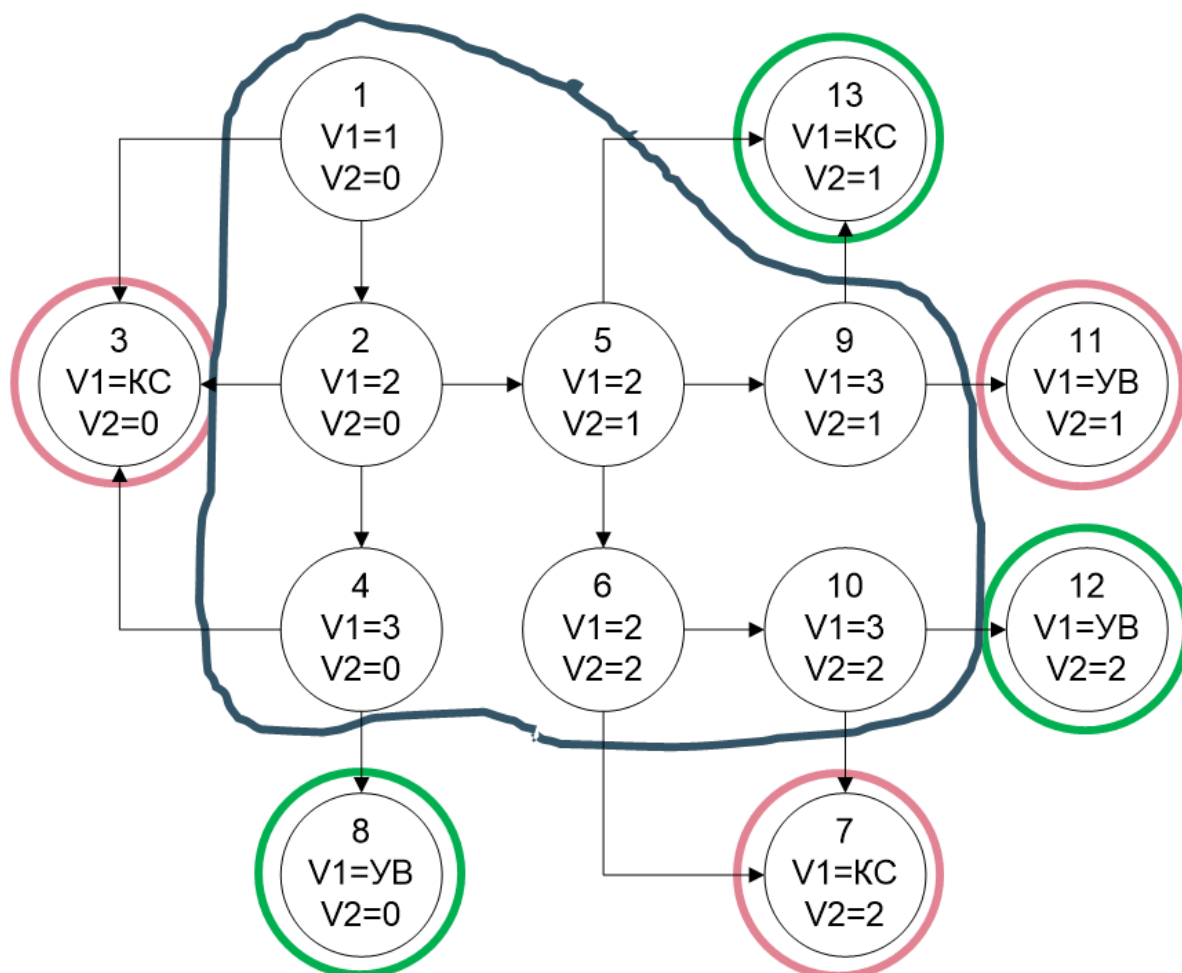


Рис. 5.6. Граф станів та переходів алгоритму поведінки прицільного РЕК

Відповідно аналітичною моделлю даного АП, яка отримана на основі графа станів і переходів рис.5.4 буде система лінійних диференційних рівнянь Колмогорова – Чепмена (5.8).

Програмний модуль ASNA за допомогою чисельного методу Рунге-Кутта - Мерсона дозволяє знайти розв'язки системи лінійних диференційних рівнянь і подати їх у вигляді розподілу імовірностей перебування у кожному стані.

$$\begin{aligned}
\frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{2,1}P_2(t) - \lambda_{3,1}P_3(t) \\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{2,1}P_1(t) - \lambda_{3,2}P_3(t) - \lambda_{4,2}P_4(t) - \lambda_{5,2}P_5(t) \\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{3,1}P_1(t) + \lambda_{3,2}P_2(t) + \lambda_{3,4}P_4(t) \\
\frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{4,2}P_2(t) - \lambda_{3,4}P_3(t) - \lambda_{8,4}P_8(t) \\
\frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{5,2}P_2(t) - \lambda_{6,5}P_6(t) - \lambda_{9,5}P_9(t) - \lambda_{13,5}P_{13}(t) \\
\frac{dP_6(t)}{dt} &= \lambda_{6,5}P_5(t) - \lambda_{7,6}P_7(t) - \lambda_{10,6}P_{10}(t) \\
\frac{dP_7(t)}{dt} &= \lambda_{7,6}P_6(t) + \lambda_{7,10}P_{10}(t) \\
\frac{dP_8(t)}{dt} &= \lambda_{8,4}P_4(t) \\
\frac{dP_9(t)}{dt} &= \lambda_{9,5}P_5(t) - \lambda_{11,9}P_{11}(t) - \lambda_{13,9}P_{13}(t) \\
\frac{dP_{10}(t)}{dt} &= \lambda_{10,6}P_6(t) - \lambda_{7,10}P_7(t) - \lambda_{12,10}P_{12}(t) \\
\frac{dP_{11}(t)}{dt} &= \lambda_{11,9}P_9(t) \\
\frac{dP_{12}(t)}{dt} &= \lambda_{12,10}P_{10}(t) \\
\frac{dP_{13}(t)}{dt} &= \lambda_{13,5}P_5(t) + \lambda_{13,9}P_9(t)
\end{aligned} \tag{5.8}$$

5.6. Методика компонентування формул для визначення показників ефективності алгоритму поведінки

Як вже було сказано на початку розділу, для АП з точки зору безпечності, визначальним показником є частота потрапляння в стани неуспішного виконання. Цей показник для безпечного АП повинен досягати мінімуму. Так як цей показник визначається з характеристики «густина розподілу ймовірності появи аварійної ситуації», то її мінімум відповідає його мінімальному значенню. Однак цей

мінімум повинен забезпечуватися при наступних обмежуючих умовах на виконання алгоритму – граничному значенні ймовірності виконання та граничному значенні середнього значення тривалості виконання. При недотриманні алгоритмом цих обмежуючих умов, РЕСВП не виконає своє завдання (свою функцію) в складі складної технічної системи.

Формули для визначення перелічених вище показників ефективності АП компонується за такими міркуваннями. Треба сформулювати функції, аргументами яких будуть сумарні значення ймовірностей перебування РЕСВП у певних станах. Значення цих ймовірностей буде отримано в результаті розв’язання системи лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена (5.8).

Нижче приведено приклад формування показників ефективності для АП прицільного РЕК. В табл. 5.2 показано стани, в яких може перебувати АП прицільного РЕК. Ознака стану неуспішного виконання є значення компонента вектора стану – $V1 = 000$, ознака успішного виконання – $V1 = 111$.

Таблиця 5.2 – Специфікація станів, в яких може перебувати АП прицільного РЕК

1	$V1=1; V2=0$	8	$V1=111; V2=0$
2	$V1=2; V2=0$	9	$V1=3; V2=1$
3	$V1=000; V2=0$	10	$V1=3; V2=2$
4	$V1=3; V2=0$	11	$V1=000; V2=1$
5	$V1=2; V2=1$	12	$V1=111; V2=1$
6	$V1=2; V2=2$	13	$V1=111; V2=2$
7	$V1=000; V2=2$		

Стани 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10 – відповідають виконанню операційних блоків з групи 1. Стани 8, 12 і 13 відповідають станам успішного виконання АП (група 2). Стани 3, 7 і 11 відповідають станам неуспішного виконання АП і потрапляння РЕСВП в аварійний стан (група 3).

Частота потрапляння в аварійну ситуацію (в стани 3,7 та 11) згідно (5.4) буде мати вигляд:

$$\omega(t) = \lambda_{3,1} \cdot P_1(t) + \lambda_{3,2} \cdot P_2(t) + \lambda_{3,4} \cdot P_4(t) + \lambda_{7,6} \cdot P_6(t) + \lambda_{7,10} \cdot P_{10}(t) + \lambda_{11,5} \cdot P_5(t) + \lambda_{11,9} \cdot P_9(t) \quad (5.9)$$

Ймовірність потрапляння в аварійну ситуацію (в стани 3,7 та 11), згідно (5.3) буде мати вигляд:

$$Q(t) = P_3(t) + P_7(t) + P_{11}(t) \quad (5.10)$$

Ймовірність виконання РЕСВП завдання (Стани 1, 2, 4, 5, 6,8, 9, 10, 12, 13) згідно (5.1) буде мати вигляд:

$$P_{ВЗ}(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_8(t) + P_9(t) + P_{10}(t) + P_{12}(t) + P_{13}(t) \quad (5.11)$$

Середня тривалість виконання завдання, згідно (5.4) буде мати вигляд:

$$T_{сер} = \int_0^{\infty} P_{ВЗ}(t)dt = \int_0^{\infty} (P_1(t) + P_2(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_8(t) + P_9(t) + P_{10}(t) + P_{12}(t) + P_{13}(t))dt \quad (5.12)$$

5.7. Методика розв'язання задач синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП.

Для ілюстрації методики розв'язання задач синтезу безпечних алгоритмів поведінки використано алгоритм пошуку, виявлення та захоплення цілей для прицільного радіоелектронного комплексу, розглянутий в підрозділі 5.3.

Синтез безпечного алгоритму поведінки РЕСВП полягає у знаходженні мінімуму функції частоти потрапляння у аварійну ситуацію в межах допустимих значень ймовірності перебування у аварійній ситуації та середнього значення часу виконання АП:

$$\min_{\substack{P_{ВЗ}(t) \geq P_{ВЗгр}(t) \\ T_{сер} \leq T_{сергр}}} \{\omega(t)\}, \quad (5.13)$$

де $P_{ВЗгр}(t)$ – граничне значення ймовірності успішного виконання задачі ,

$T_{гр}$ – граничне значення середнього значення тривалості виконання АП.

Процедура мінімізації є двоетапною. На першому етапі для різних значень ймовірності виконання задачі підсистемою здійснюється зміна тривалості виконання задачі підсистемою і знаходиться при якому значенні тривалості

виконання значення частоти потрапляння в аварійну ситуацію буде найменшем. На другому етапі фіксується знайдене значення тривалості виконання завдання підсистемою й аналогічно знаходиться ймовірність виконання задачі підсистемою.

Практично процедура мінімізації полягає у багатократній зміні наборів вхідних даних, визначених проектантом, від зміни яких буде залежати імовірність потрапляння в аварійну ситуацію та середнє значення тривалості виконання АП. В результаті отримуємо сімейство залежностей частоти потрапляння РЕСВП в стан аварійної ситуації в залежності від зміни конкретних вхідних параметрів АП. Оскільки при зменшенні середнього ... тривалості виконання алгоритму чи збільшенні значення ймовірності виконання алгоритму частота потрапляння РЕСВП в аварійну ситуацію буде спадати, то доцільно оцінювати прирости зменшення цієї частоти і знайти точку де цей приріст є максимальним.

Для використаного в якості прикладу АП прицільного РЕК рис.5.3. було проведено перший етап дослідження залежностей показників безпеки та показників від тривалості виконання своєї функції кожною підсистемою РЕК і результати подано в таблицях 5.3 – 5.5. В проведених дослідженнях середні значення тривалості виконання своєї функції для всіх підсистем РЕК вважаються однаковими.

Таблиця 5.3 – Показники безпеки та ефективності прицільного РЕК при зміні середнього значення тривалості окремими підсистемами при ймовірності виконання своєї функції усіма його підсистемами $P = 0,98$

t, c	0,5	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,005
P	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Q	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
w	1,53E-05	6,50E-05	1,54E-04	2,70E-04	3,54E-04	1,07E-03	2,16E-03
tv	6,27	1,25	0,62	0,37	0,25	0,12	0,06
dw		7,65E-01	5,78E-01	4,30E-01	2,37E-01	6,69E-01	5,05E-01
dt		0,800638	0,504	0,403226	0,324324	0,52	0,5

Таблиця 5.4 – Показники безпечності та ефективності прицільного РЕК при зміні середнього значення тривалості виконання процедур окремими підсистемами при ймовірності виконання своєї функції усіма його підсистемами $P = 0,99$

t, c	0,5	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,005
P	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969
Q	0,0297	0,0297	0,0297	0,0297	0,0297	0,0297	0,0297
w	1,44E-05	7,40E-05	1,48E-04	3,09E-04	4,03E-04	1,23E-03	5,59E-03
tv	5,8	1,16	0,58	0,34	0,23	0,11	0,05
dw		8,05E-01	5,00E-01	5,21E-01	2,33E-01	6,72E-01	7,80E-01
dt		0,8	0,5	0,413793	0,323529	0,521739	0,545455

Таблиця 5.5 – Показники безпечності та ефективності прицільного РЕК при зміні середнього значення тривалості виконання процедур окремими підсистемами при ймовірності виконання своєї функції усіма його підсистемами $P = 0,999$

t	0,5	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,005
P	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
Q	0,00299	0,00299	0,00299	0,00299	0,00299	0,00299	0,00299
w	1,05E-06	5,25E-06	1,05E-05	1,74E-05	2,61E-05	5,23E-05	1,04E-04
tv	6,02	1,07	0,6	0,36	0,24	0,12	0,06
dw		8,00E-01	5,00E-01	3,97E-01	3,33E-01	5,01E-01	4,97E-01
dt		0,822259	0,439252	0,4	0,333333	0,5	0,5

Графік залежності частоти потрапляння в аварійну ситуацію від часу виконання підсистемами задачі приведено на рис. 5.5. З графіка видно, що при середньому значенні тривалості виконання АП $t = 0,02$ с швидкість зменшення середнього значення частоти потрапляння в аварійну ситуацію дорівнює нулю і відповідно воно є мінімальним.

Отже, мінімальне значення частоти потрапляння прицільного РЕК в аварійну ситуацію отримується при середньому значенні тривалості виконання своєї функції кожною підсистемою, яка дорівнює $0,02$ с. Тому необхідно зафіксувати цю тривалість і внести її як параметр АП в множину формальних параметрів.

На другому етапі необхідно провести дослідження залежності показників

безпеки та показників ефективності від зміни значення ймовірності виконання своєї функції кожною підсистемою. Результати досліджень подані в таблиці 5.7.

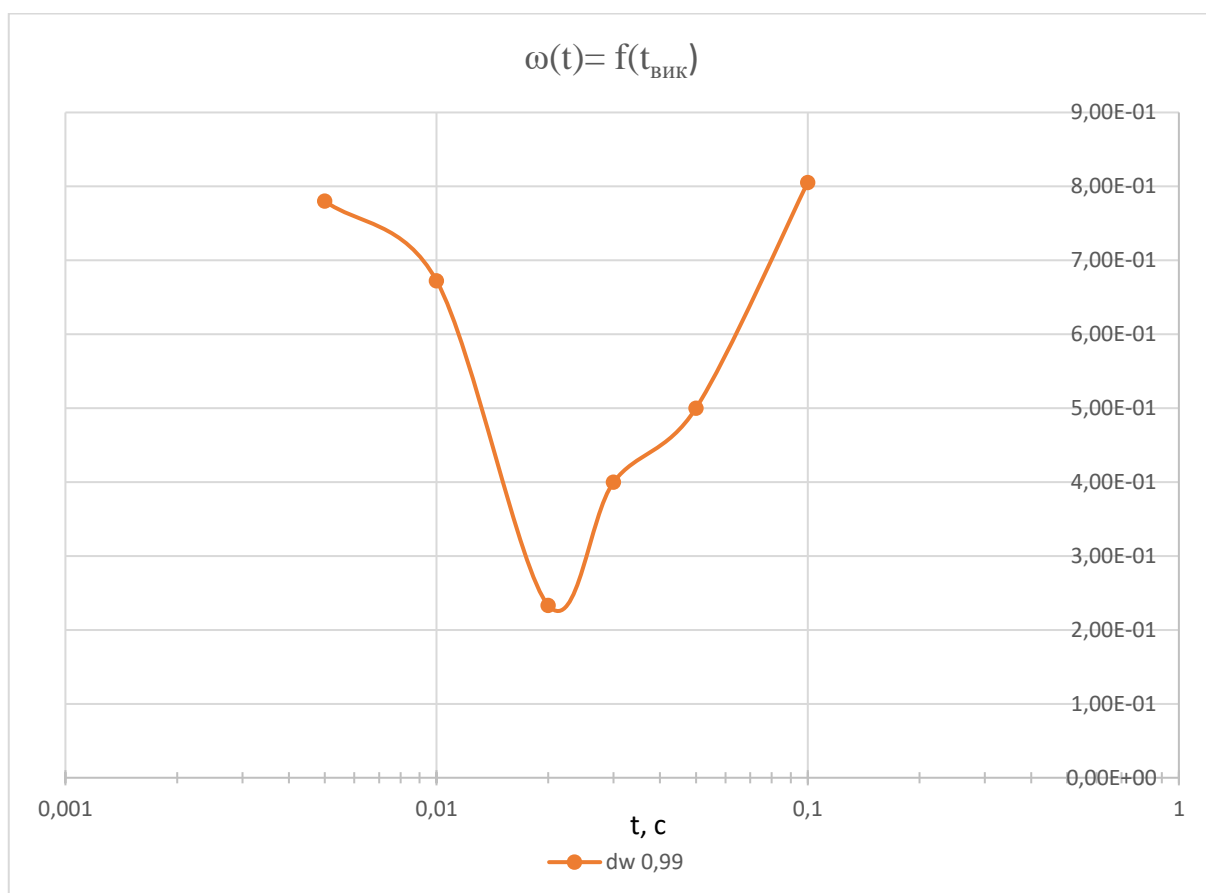


Рис. 5.7. Залежність частоти потрапляння в аварійну ситуацію від середнього значення тривалості виконання своєї функції кожною підсистемою РЕК

Таблиця 5.6 – Показники безпеки та ефективності прицільного РЕК при зміні ймовірності виконання своєї функції окремими підсистемами при середньому значенні тривалості виконання своєї функції кожною підсистемою $t = 0,02 \text{ с}$

p	0,9	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,999	0,9999
P	0,72	0,854	0,882	0,911	0,94	0,97	0,997	0,9985
Q	0,279	0,145	0,117	0,088	0,06	0,03	3,00E-03	2,99E-04
w	6,78E-03	3,21E-03	2,54E-03	1,88E-03	1,24E-03	6,10E-04	6,00E-05	6,00E-06
1-P	2,80E-01	1,46E-01	1,18E-01	8,90E-02	6,00E-02	3,00E-02	3,00E-03	1,50E-03
1-Q	0,721	0,855	0,883	0,912	0,94	0,97	0,997	0,999701
d(1-P)	1,34E-01	1,34E-01	2,80E-02	2,90E-02	2,90E-02	3,00E-02	2,70E-02	1,50E-03
dw	3,57E-03	3,57E-03	6,70E-04	6,60E-04	6,40E-04	6,30E-04	5,50E-04	5,40E-05
dQ	0,134	0,134	0,028	0,029	0,028	0,03	0,027	0,00270

При збільшенні ймовірності виконання задачі окремою підсистемою зменшується частота потрапляння РЕСВП у аварійні стани. Залежність зміни частоти потрапляння в аварійну ситуацію показано на рис. 5.8. Якщо прийняти, що РЕСВП буде вважатись безпечною при $\omega(t) < 1 \cdot 10^{-3}$, то це можна реалізувати за умови якщо ймовірність виконання задачі окремою підсистемою буде не менше 0,99, при середньому значенні тривалості виконання задачі цією підсистемою не більше ніж $t = 0,02$ с.

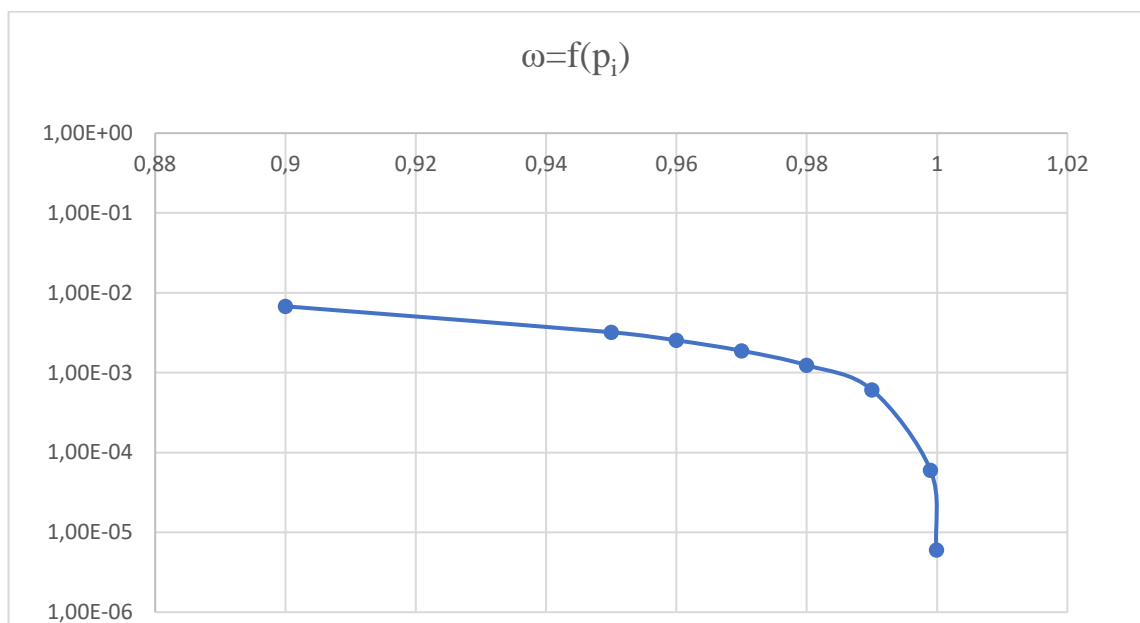


Рис.5.8. Залежність частоти потрапляння АП в аварійну ситуацію від ймовірності виконання своєї функції кожною підсистемою

В результаті визначення мінімального значення частоти потрапляння в аварійну ситуацію $\omega(t)$ проєктант отримує відповідні для цього випадку значення ймовірності виконання функції підсистемою РЕСВП та середню тривалість виконання функції. Якщо підвищити ймовірність виконання функції підсистемою РЕСВП, то зросте ймовірність виконання завдання при незмінному значенні потрапляння в аварійну ситуацію. Збільшення ймовірності виконання функції підсистемою означає заміну обладнання на інше, з більш високими тактико – технічними характеристиками.

Для усунення необґрунтованого завищення характеристик, а відповідно і ціни обладнання за допомогою розробленої моделі можна визначити залежності ймовірності виконання завдання РЕСВП від ймовірності виконання функції кожною підсистемою. На рис. 5.9 приведено такі залежності.

З рисунку видно, що при мінімальній граничній ймовірності виконання функцій підсистемами $z=0,99$ ймовірність виконання завдання становить 0,96, то

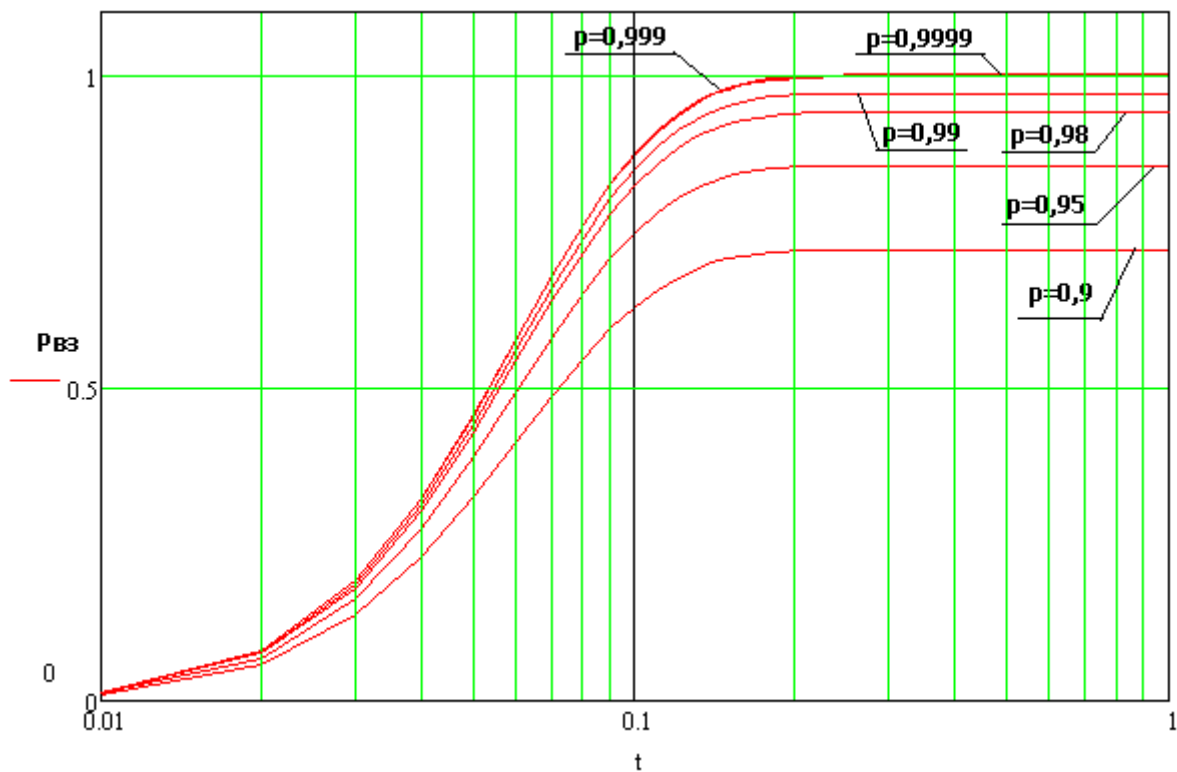


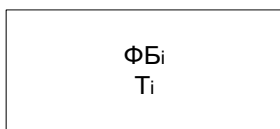
Рис.5.9. Залежність ймовірності виконання завдання РЕСВП від ймовірності виконання своєї функції кожною окремою підсистемою при збільшенні цієї ймовірності до 0,999 ймовірність виконання завдання зростає до 0,995, а при подальшому збільшенні ймовірності виконання функцій підсистемами до 0,9999 ймовірність виконання завдання зростає лише до 0,997. Тому значення ймовірності виконання функції підсистемою РЕСВП доцільно вибирати в межах від 0,99 до 0,999, використовуючи як критерій - вартість обладнання.

Оскільки відповідальність за сформований алгоритм поведінки РЕСВП є високою, то обов'язковою є перевірка достовірності результату. Методику

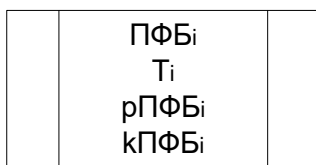
перевірки достовірності результату синтезу безпечного АП було представлено в підрозділі 5.2. Згідно методики, необхідно здійснити розроблення моделі АП у вигляді схеми шляхів.

Підчас формування моделі АП у вигляді схеми шляхів операційні блоки (ОБ) потрібно перетворити у відповідні їм функціональні блоки (ФБ) і показати зв'язки між ними переходами $L_{i, m}$. Побудова схеми шляхів здійснюється за такими правилами [248, 252]:

1. Функціональний блок $ФБ_i$ на схемі шляхів характеризується середнім значенням тривалості виконання функції T_i і відповідає операційному блоку $ОБ_i$ на блок-схемі АП;



Якщо фрагмент алгоритму виконується повторно, то на схемі шляхів він відображається функціональним блоком $ПФБ_i$ з повторним виконанням його функції – функціональним блоком з повторенням, в якому враховується середнє значення тривалості виконання T_i , кількість повторних виконань $kПФБ_i$ та імовірність повторного виконання $pПФБ_i$;



Параметром переходу $L_{i, m}$, який зв'яже на схемі шляхів функціональні блоки $ФБ_i$ та $ФБ_m$, є добуток значень $pL_{i, m}$ всіх імовірностей відображених в стохастичних блоках альтернативного переходу та детермінованих блоках умовного переходу АП, що лежать на шляху між операційними блоками $ОБ_i$ та $ОБ_m$;

Функціональний блок завершення на схемі шляхів відповідає сукупності однотипних блоків завершення (успішне виконання, неуспішне виконання) на блок-схемі.

Модель АП у вигляді схеми шляхів налічує стільки ж функціональних блоків $ФБ$, скільки на блок-схемі АП є операційних блоків $ОБ$. В моделі АП у вигляді

схеми шляхів зовсім не має перевіряючих блоків ОБ, а фрагмент алгоритму, що містить цикл на схемі шляхів може бути представлений одним функціональним блоком з повторенням ПФБ.

Таким чином, у відповідності до вищезазначених правил [248, 252] побудовано схему шляхів для алгоритму пошуку, виявлення і захоплення цілі прицільним РЕК (рис. 5.3), яка складається з 5 функціональних блоків (один з них – функціональний блок з повторенням) і зображена на рисунку 5.9.

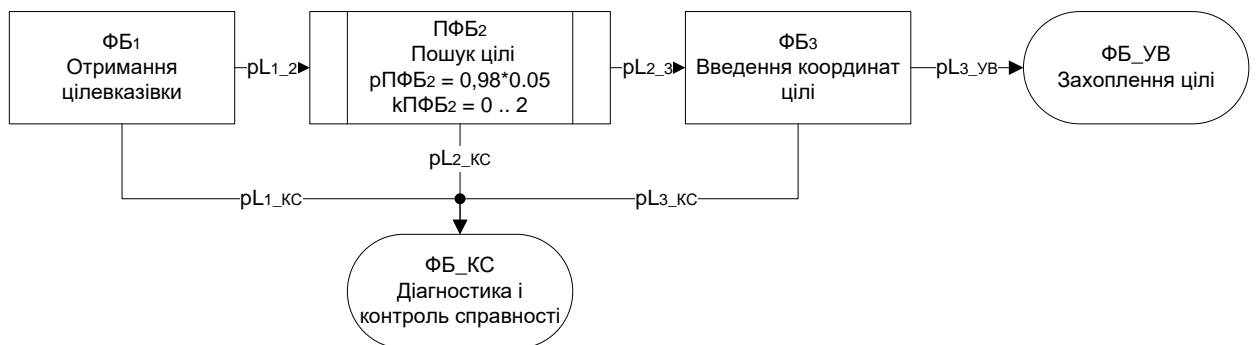


Рис. 5.9. Модель алгоритму пошуку, виявлення і захоплення цілі прицільним РЕК у вигляді схеми шляхів

Отже, модель АП у вигляді схеми шляхів повністю відображає всі можливі шляхи моделі АП у вигляді схеми шляхів у явній, але у значно компактнішій формі, ніж блок-схема АП.

Модель алгоритму поведінки РЕСВП дає змогу отримати два вирази. Один вираз буде добутком ймовірностей існування усіх можливих шляхів від початку АП до блоку його успішного виконання.

$$p(L) = \prod_{(m,n) \in L} p_{mn} \quad (5.14)$$

Причому, на відміну від існуючих методів, ймовірності існування шляхів, які ведуть до неуспішного виконання не враховуються. Другий вираз – це сума тривалостей проходження кожного шляху, який веде до успішного виконання АП.

$$T(L) = \sum_{m \in L} T_{Bm} \quad (5.15),$$

де T_{Bm} – середнє значення тривалості виконання m -го функціонального блока, що лежить на даному шляху.

Взявши за основу формули (5.18 і 5.19) і модель АП у вигляді схеми шляхів з'являється можливість отримати вираз для ймовірності існування найдовшого шляху від початку до успішного виконання з врахуванням кількості виконаних циклів в АП:

$$p(L_{maxUB}) = \prod_{i=1}^I (p(L_i))^{N_i} \quad (5.16),$$

$$T(L_{maxUB}) = \sum_{m=1}^M (N_m \cdot T_{Bm}) \quad (5.17),$$

де $p(L_{maxUB})$ – імовірність існування найдовшого шляху успішного виконання;

$T(L_{maxUB})$ – тривалість проходження найдовшого шляху успішного виконання;

T_{Bm} – середнє значення тривалості виконання m -го функціонального блоку;

L_i – i -ий перехід на схемі шляхів;

I – кількість переходів на схемі шляхів;

N_i – кількість обходів переходу L_i ;

M – кількість функціональних блоків на схемі шляхів;

N_m – кількість циклів виконання функціонального блоку T_m .

Якщо повторень циклу немає, то функціональний блок T_m не виконується і ймовірність виконання цього блоку рівна 1, але його тривалість виконання рівна 0. Таким чином «нульовий» цикл не впливає на кінцеві значення імовірності існування та тривалості шляху успішного виконання, а не «нульовий» цикл буде повторюватися відповідну кількість разів. Від кількості повторів будуть залежати значення показників ефективності АП.

Перевага моделі АП у вигляді схеми шляхів в тому, що зміна послідовності проходження всіх гілок алгоритму від початку до успішного виконання не впливає на результати дослідження показників ефективності АП. Крім цього розподіл часу виконання операційного блоку не впливає на точність результату.

Математична модель АП дає змогу отримувати формули для визначення показників його ефективності «проходженням» шляху від початку до успішного виконання з врахуванням кількості виконуваних циклів в АП. Тому ймовірність $p(S_{UB})$ та середнє значення тривалості $T_{сер}(S_{UB})$ успішного виконання алгоритму визначаються за формулами [252]:

$$p(S_{yB}) = \sum_{j=1}^J (p_j(S_{yB})), \quad (5.18)$$

$$T_{сер}(S_{yB}) = \frac{1}{p(S_{yB})} \sum_{j=1}^J (p_j(S_{yB}) \cdot T_j(S_{yB})). \quad (5.19)$$

Середнє значення тривалості успішного виконання алгоритму $T_{сер}(S_{yB})$ представляє собою середньозважене значення середніх значень тривалостей $T_j(S_{yB})$ всіх J шляхів успішного виконання алгоритму з врахуванням імовірності проходження j -го шляху $p_j(S_{yB})$ успішного виконання алгоритму як вагового коефіцієнта, і нормується за імовірністю успішного виконання алгоритму $p(S_{yB})$. Це дає змогу отримати достовірне середнє значення тривалості виконання АП з урахуванням введеної часової надлишковості.

Таким чином модель алгоритму пошуку, виявлення і захоплення цілі прицільним РЕК показана на рисунку 5.9 забезпечила можливість отримання формул для визначення показників його ефективності. Формула для визначення ймовірності успішного виконання алгоритму пошуку, виявлення і захоплення цілі:

$$p(S_{yB}) = pL_{1-2} \cdot (pПФБ_2)^{kПФБ_2} \cdot pL_{2-3} \cdot pL_{3-yB} \quad (5.20)$$

Оскільки на блок-схемі АП перевіряючий блок розміщується після операційного блоку, тобто умова циклу завжди перевіряється після виконання функції, то звідси випливає, що тіло циклу завжди виконується хоча б один раз.

Тому середнє значення тривалості успішного виконання алгоритму пошуку, виявлення і захоплення цілі визначається за формулою:

$$T_k(S_{yB}) = T_1 + T_2 \cdot (1 + kПФБ_2) + T_3. \quad (5.21)$$

Методика визначення показників ефективності АП згідно (5.20) та (5.21) містить три етапи [252]:

- Етап 1.* Внести вхідні дані, ідентифікувати переходи на схемі шляхів.
Записати формули для визначення імовірності та середнього

значення тривалості виконання алгоритму поведінки $p(S_{yB})$ та $T(S_{yB})$.

Задати діапазон зміни кількості повторень циклу $k=[0, K]$.

Задати початкові значення: $p(S_{yB})=0$, $T(S_{yB})=0$.

Етап 2.

Поки $k < K$, інкрементувати k .

Розрахувати поточне значення $p(S_{yB})$.

Розрахувати поточне значення $T(S_{yB})$.

Перемножити поточні значення $p(S_{yB})$ та $T(S_{yB})$.

Додати розраховане $p(S_{yB})$ до попереднього значення $p(S_{yB})$.

Додати розраховане $T(S_{yB})$ до попереднього значення $T(S_{yB})$.

Етап 3.

Коли $k=K$, розрахувати значення $T_{\text{сер}}(S_{yB})$ та $p(S_{yB})$ за формулами (3.5) та (3.6) відповідно.

Вивести кінцеві значення імовірності успішного виконання алгоритму поведінки та його середнє значення тривалості.

В результаті при тих же вхідних даних, що і для моделі у вигляді графа станів і переходів отримано аналогічні результати з відхиленням між ними не більше 3%, що підтверджує їх достовірність.

Висновки до розділу 5

1. Особливістю алгоритмів поведінки РЕСВП є те, що для них притаманне як успішне так й неуспішне виконання задачі. Неуспішні завершення АП призводять до аварійних ситуацій. Для зменшення ймовірності появи аварійної ситуації в алгоритм поведінки, для найбільш критичних функцій вводять часову та функціональну надлишковість. Введення цієї надлишковості з одного боку підвищує функціональну безпечність, а з іншого збільшує тривалість виконання завдання РЕСВП. Якщо ця тривалість перевищує граничне значення, то РЕСВП не виконає завдання, а це призведе до потрапляння в аварійну ситуацію. Для встановлення зв'язку між надлишковістю, показниками функціональної ефективності та показниками безпечності алгоритмів поведінки РЕСВП введено новий показник – *частота потрапляння в аварійну ситуацію*.

Особливістю цього показника, на відміну від існуючих є те, що при введенні часової і/або функціональної надлишковості можна оцінити її вплив на частоту потрапляння алгоритму в стани неуспішного завершення при заданих граничних значеннях ймовірності виконання задачі та тривалості виконання задачі.

2. Для синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП розроблена методологія синтезу, яка дає змогу отримати модель алгоритму на основі якої можна підібрати такі параметри алгоритму та величину часової і функціональної надлишковості, що з одного боку будуть забезпечені задані показники функціональної ефективності, а з іншого боку – мінімальна частота потрапляння РЕСВП в аварійну ситуацію. Методологія містить цілий ряд методик, придатних до багатоваріантного аналізу.
3. В результаті послідовного застосування розроблених методик проєктант має змогу перейти від базового алгоритму поведінки до еквівалентного із внесеними різновидами надлишковості. Від еквівалентного алгоритму поведінки здійснюється перехід до аналітичної моделі, на основі якої можна отримати характеристику безпечності – частоту потрапляння в аварійну ситуацію. Мінімізація частоти потрапляння алгоритму поведінки в стани неуспішного виконання, а відповідно РЕСВП в стан аварійної ситуації, за допомогою методики евристичного синтезу через багатоваріантний аналіз дає змогу отримати безпечний алгоритм поведінки РЕСВП.
4. Для забезпечення достовірності результатів синтезу розроблено методику на базі методу схеми шляхів, яка дає змогу здійснити валідацію результатів моделювання. Достовірні результати моделювання дають змогу суттєво зменшити об'єм натурних випробувань.
5. Розроблену методологію було апробовано при синтезі алгоритмів поведінки безпілотних літальних апаратів, що дало змогу забезпеченням мінімальне частоти потрапляння безпілота в аварійну ситуацію.

ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язано науково-прикладну проблему підвищення ефективності процедур синтезу радіоелектронних систем відповідального призначення шляхом розвитку теоретичних засад комплексного забезпечення заданого рівня функціональної безпечності та надійності на етапі системотехнічного проектування. Ефективність процедур синтезу полягає, з одного боку, в скороченні витрат часу на розроблення моделей для двох і більше варіантів побудови РЕСВП, а з іншого – в підвищенні ступеня достовірності отриманих показників функціональної безпечності. Підвищення достовірності забезпечується врахуванням впливу на функціональну безпечність: відмовостійких структур зі складною поведінкою, алгоритмів поведінки із часовою та функціональною надлишковістю та стратегій технічного обслуговування. А високий рівень формалізації запропонованих методів та моделей дає змогу автоматизувати процедури синтезу РЕСВП із заданим рівнем функціональної безпечності.

В дисертації отримано наступні наукові результати:

1. На основі проведеного аналізу відомих методів оцінювання функціональної безпечності РЕСВП встановлено, що використані в них моделі не дають можливості отримати разом з показниками функціональної безпечності, ще і показники надійності та оцінювати їх взаємозв'язок. Також відомі методи не призначені для багатоваріантного аналізу, що важливо на етапі системотехнічного проектування РЕСВП. Разом з цим встановлено, що обов'язковим показником, на основі якого здійснюється оцінювання функціональної безпечності, FMEA/FMECA–аналіз та PNA/HAZOP/LOPA–аналіз, є мінімальні січення.
2. Запропоновано метод розділення непрацездатних станів на непрацездатні безпечні стани, критичні та катастрофічні стани. В основу метода покладено методикку класифікації непрацездатних станів, удосконалено структуру вектора станів та введено поняття маски аварійної ситуації, що дало змогу однозначно класифікувати різновиди непрацездатних станів. Разом з цим

розроблено методику побудови бінарної структурно-автоматної моделі.

3. Введено поняття функції аварійності для оцінювання функціональної безпечності РЕСВП та принципи її формування з простору непрацездатних станів за допомогою маски аварійності. Для цього розроблено метод формування функції аварійності в підпросторі непрацездатних станів, який передбачає визначення груп станів, що відповідають кожній функції аварійності, містить процедури сортування компонент масок аварійних ситуацій, знаходження функцій аварійності, порівняння станів у функціях аварійності та формування виразів для функцій аварійності. Для візуалізації результату побудови функції аварійності розроблено метод побудови дерева відмов на основі функцій аварійності.
4. Розроблено метод визначення середнього значення ймовірності виникнення мінімального січення за наявності прихованих відмов. Метод дає змогу отримати середнє значення ймовірності появи аварійної ситуації як суму середніх значень мінімальних січень, які містять як комбінації явних та прихованих відмов, так і виключно приховані відмови. Слід відзначити, що відомі методи визначення середнього значення ймовірності виникнення мінімального січення враховують тільки явні відмови. В процесі валідації розробленого методу встановлено, що середнє значення ймовірності виникнення мінімального січення, яке містить виключно явні відмови, визначене існуючим та запропонованим методами – співпадають. Цим підтверджується правильність запропонованого методу. Середні значення ймовірностей виникнення мінімальних січень, які містять комбінації явних та прихованих відмов та значення ймовірностей виникнення мінімальних січень, визначених відомими методами, відрізняються в 3,9 рази, причому відомі методи дають завищені значення цих ймовірностей. Середні значення ймовірностей виникнення мінімальних січень, які містять виключно приховані відмови та значення ймовірності виникнення мінімальних січень, визначених існуючими методами відрізняються на два порядки (в 107,9 рази).

5. Запропоновано нове представлення стратегії технічного обслуговування сукупності РЕСВП одною ремонтною бригадою у вигляді системи масового обслуговування. На основі цього представлення отримано математичну модель стратегії технічного обслуговування РЕСВП з врахуванням виникнення аварійних ситуацій, спричинених явними та прихованими відмовами. На базі моделі розроблено два методи для автоматизованого визначення функції готовності з врахуванням ймовірності появи аварійної ситуації та автоматизованого синтезу параметрів стратегії технічного обслуговування за заданим значенням коефіцієнта готовності. Не врахування прихованих відмов завищує коефіцієнт готовності від 3 до 5%, якщо кількість РЕСВП, які знаходяться на обслуговуванні у одній ремонтній бригади, не перевищує 10. При збільшенні кількості РЕСВП завищення значення коефіцієнта готовності зростає.
6. Розроблено методика розв'язання задачі синтезу стратегії технічного обслуговування сукупності РЕСВП. Методика дає змогу проводити дослідження функції готовності, ймовірності появи аварійної ситуації та функцій аварійності РЕСВП. Оскільки ця методика призначена для багатоваріантного аналізу, то створено алгоритм автоматизованого розрахунку функції готовності РЕСВП за допомогою програмного забезпечення MatLab та алгоритм автоматизації розв'язання задач синтезу показників стратегії її технічного обслуговування та ремонту.
7. Для синтезу безпечних РЕСВП з використанням мажоритарної структури з реконфігурацією та дворівневої мажоритарної структури розроблено математичні моделі, які дають змогу отримати нові показники функціональної безпечності відмовостійких систем цього класу: ймовірність потрапляння РЕСВП в передаварійну ситуацію та частоту потраплянь в аварійну ситуацію. Це дало змогу оцінювати вплив різних способів підвищення надійності РЕСВП з використанням мажоритарним структур на її безпечність. На основі цих моделей розроблено методика надійнісного синтезу відмовостійкої РЕСВП з реконфігурацією

мажоритарної структури та методику синтезу відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневої мажоритарної структури. Ці методики дозволяють скоротити витрати часу для розв'язання задачі синтезу кожного наступного варіанту побудови РЕСВП на 85 – 112%, причому з контролем заданого рівня функціональної безпечності.

8. Запропоновано нову характеристику функціональної безпечності експлуатації алгоритму поведінки – частоту потрапляння у стани неуспішного завершення за час, необхідний для виконання алгоритму поведінки. Розроблено методологію синтезу безпечних алгоритмів поведінки РЕСВП, яка забезпечує визначення ймовірності його аварійного завершення та частоту потрапляння у стан неуспішного завершення. На базі методології сформовано методику введення часової та функціональної надлишковості в алгоритм поведінки РЕСВП та методику синтезу алгоритмів поведінки, призначених для розроблення програмного забезпечення програмно-апаратної реалізації РЕСВП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Georgios Giannopoulos Risk assessment methodologies for Critical Infrastructure Protection. Part I: A state of the art //Georgios Giannopoulos Roberto Filippini Muriel Schimmer/ Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. – 53р.
2. US Department of Defense Standard Practice for System Safety: MIL-STD-882D.-2000.
3. US Department of Defense System Safety Program Requirements: MIL-STD-882C.-1993.
4. Functional safety. Safety instrumented systems for the industrial proceses. Part 1. Terms, definitions and technical requirements IEC 61511-1-2011.
5. Functional safety. Safety instrumented systems for the industrial processes. Part 2. Guidelines for the application of IEC 61511-2-2011.
6. Functional safety. Safety instrumented systems for the process industry sector. Part 3. Guidelines for the determination of the required safety integrity levels: IEC 61511-3-2011.
7. Нозик А.А. Теория и практика автоматизированного моделирования надежности и безопасности структурно-сложных систем / А. А. Нозик, А. С Можаяев. // М.: Территория нефтегаз №5. – 2012 – с. 24-25.
8. Одарущенко О.Н. Марковські моделі оцінювання функціональної безпеки програмно-технічних комплексів на самодіагностовних програмовних платформах з урахуванням помилок засобів контролю / Одарущенко О.Н., Руденко А.А., Харченко В.С. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2019. – № 4. – 17–29 с.
9. Pooja S. Design of safety critical and control systems of Nuclear Power Plants using Petri nets/ Pooja Singh, Lalit Kumar Singh// Nuclear Engineering and Technology. –№51. –2019. – PP. 1289 – 1296.
10. Ajit K. Reliability and Safety Engineering /Ajit Kumar Verma, Srividya Ajit, Durga

- Rao Karanki, Ajit Kumar Verma, Srividya Ajit, Durga Rao Karanki // Springer Science & Business Media, 2010. - 577 p.
11. Functional safety of electrical /electronic /programmable electronic safety related systems. part 1: General requirements: IEC 61508-1. - 2010.
 12. Соколов Ю.Н. Применение компьютерных технологий для оценивания надежности и безопасности программно-технических комплексов / Ю.Н. Соколов, В.С. Харченко, В.М. Илюшко, Ю.Л. Поночевный, М.Ф. Бабаков / Под ред. Ю.Н. Соколова, В.С. Харченко. - Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", 2013. - 458 с.
 13. Skrobanek P. Analysis Of Timing Requirements For Intrusion Detection And Prevention Using Fault Tree With Time Dependencies / Skrobanek P., Woda M. // In: Skrobanek P, editor. Intrusion detection systems. InTech.- 2011.- P. 307–324.
 14. . Shubhamangala B. R. Application Security Risk: Assessment and Modeling// Shubhamangala B. R, Snehanshu Saha / ISACA Journal, Volume 2. – 2016
 15. Myers A. Complex System Reliability. Multichannel Systems with Imperfect Fault Coverage 2nd Edition / A. Myers // Springer London, 2014. – 2014. – 238 p.
 16. Minimal cut set analysis. Appendix D // Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Second Edition by Center for Chemical Process Safety/ American Institute of Chemical Engineers, 2010
 17. Reliability Engineering Handbook, Volume 1/ Dimitri Kececioglu //DEStech Publications, Inc, 2002 –720 p
 18. Henley, Ernest J., Hiromitsu Kumamoto: Probabilistic Risk Assessment: Reliability Engineering, Design and Analysis. Wiley-IEEE Press, 2 edition, (2000)
 19. Baldwin E. Carr Unmanned Aerial Vehicles: Examining the Safety, Security, Privacy and Regulatory Issues of Integration into U.S. Airspace / National Center for Policy Analysis. – 2013, – 44 p.
 20. Takehisa Kohda A Simple Method to Derive Minimal Cut Sets for a Non-coherent Fault Tree / International Journal of Automation and Computing №2 (2006). – pp.151–156
 21. Reliability Engineering Handbook, Volume 2/ Dimitri Kececioglu //DEStech

Publications, Inc, 2002 – 550 p

22. Lee Ostrom Cheryl Wilhelmsen Risk Assessment: Tools, Techniques, and Their Applications, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2019
23. Eckard Bode, Thomas Peikenkamp, Jan Rakow, Samuel Wischmeyer Model Based Importance Analysis for Minimal Cut Sets // International Symposium on Automated Technology for Verification and Analysis (ATVA 2008):Automated Technology for Verification and Analysis, 2008, pp. 303 – 317
24. Čepin M. A dynamic fault tree / Marko Čepin, Borut Mavko // Reliability Engineering & System Safety. – 2002.- Vol. 75, № 1. – P. 83 - 91.
25. Volk M. Fast Dynamic Fault Tree Analysis by Model Checking Techniques/ Matthias Volk, Sebastian Junges, Joost-Pieter Katoen// IEEE Transactions on Industrial Informatics. – Volume 14. – Issue: 1 , Jan. –2018 –PP. 370 – 379.
26. Miroslav Kvassay Minimal Cut Sets and Path Sets in Binary Decision Diagrams and logical differential calculus/Miroslav Kvassay ; Jozef Kostolny//The 10th International Conference on Digital Technologies 2014, 9-11 July 2014, Zilina, Slovakia
27. F. Pedro Binary Decision Diagrams applied to Fault Tree Analysis/F. Pedro G. Marquez// 2008 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring, , 18-20 June 2008, Derby, UK
28. 1.100. Nicholas J. Bahr System Safety Engineering and Risk Assessment. A Practical Approach, Second Edition/ Nicholas J. Bahr - Second edition.. Boca Raton, Florida CRC Press, 2015 – 407 p.
29. CRTA-FMECA. Failure Mode, Effects and Criticality Analysis. (FMECA). 1993. Accesion For. NTIS CRA&I. 14. DTIC TAB. 0. Ucaflow-cJiCed. 0. Prepared by:.. Reliability Analysis Center Byf 762. PO Box 4700 Distributionl Rome, NY 13442-4700
30. Takeichi M. Failure rate calculation with priority FTA method for functional safety of complex automotive subsystems / M. Takeichi, Y.Sato, K.Suyama, T. Kawahara // Xi'an: International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE), 2011.- p.55-58.

31. Xiangyu Han A combined analysis method of FMEA and FTA for improving the safety analysis quality of safety-critical software / Han Xiangyu, Jun Zhang // Beijing: IEEE International Conference on Granular Computing (GrC).- 2013.- p.353-356.
32. Volochiy B. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyi, Oleksandr Mulyak, Sergiy Volochiy // Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management SMRLO 2016. – Israel, Beer Sheva, 15 – 18 February, 2016. – IEEE, 2016. – P. 347 - 356.
33. Guidance on Failure Modes & Effects Analyses (FMEAs)// The International Marine Contractors Association/ IMCA M 166, April 2002
34. D.H. Stamatis Risk Management Using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). - ASQ Quality Press, 2019 p. - 118 стор.
35. Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA) IEC 60812
36. MIL-STD-1629A, Military Standard: Procedures For Performing A Failure Mode, Effects, And Criticality Analysis
37. BSI Standard, BS 5760-5:1991: 'Reliability of Systems, Equipment and Components', Part 5: 'Guide to Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMEA and FMECA)
38. Кривонос А.И. Структурно-алгоритмическая организация и модели надежности мажоритарно-резервированных систем / А.И. Кривонос, Н.К. Байда, А.А. Кулаков, В.С. Харченко, Н.П. Благодарный // Космічна наука і технологія. – 1995. – №1. – С.74–79.
39. Kharchenko, V., Ponochozny, Y., Boyarchuk, A. Availability Assessment of Information and Control Systems with Online Software Update and Verification. In: Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications Communications in Computer and Information Science, Vol. 469, Springer International Publishing Switzerland, pp. 300--324 (2014)

40. Kim P. Gostelow. The design of a fault-tolerant, realtime, multi-core computer system. In: In Aerospace Conference, IEEE, pp. 1--8(2011)
41. Ткачук П.П. Система автоматизованого управління польотом і корисним навантаженням тактичних безпілотних літальних апаратів / П.П. Ткачук, Ю.П. Сальник, Ю.М. Пащук, І.В. Матала // Військово-технічний збірник. АСВ.- №1 (10). - 2014.- с. 74-78.
42. Харченко В.П. Авіоніка безпілотних літальних апаратів / В.П.Харченко, В.І.Чепіженко, А.А.Тунік, С.В.Павлова. – К.: ТОВ «Абрис–принт», 2012. – 464 с.
43. Viktorov, O. Reconfigurable Multiprocessor System Reliability Estimation. Asian Journal of Information Technology 6 (9), pp. 958--960(2007)
44. C.W. Johnson, Failure in Safety-Critical Systems: A Handbook of Accident and Incident Reporting, University of Glasgow Press, Glasgow, Scotland, 2003.
45. Горопашная А.В. Методы анализа безопасности сложных технических систем: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. фіз.-мат. наук / А. В. Горопашная . – СПб. : Б.В., 2009 . – 17 с.
46. Ольшевский Ю.Н. Перспективы развития систем управления и защиты ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000 / Ю.Н. Ольшевский, Г.А.Жемчугов, А.О.Мирошник, Т.Н.Галкина // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2001. – С. 188–196.
47. Озірковський, Л.Д. Розробка методик побудови марковської моделі алгоритму поведінки програмно-апаратної системи [Текст] / Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Матеріали 9-ої науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників «Проблеми та перспективи розвитку економіки і підприємництва та комп'ютерних технологій в Україні», Львів, – 2013. – С. 499-503.
48. Volochiy Bogdan, Oleksandr Mulyak, Leonid Ozirkovskyi, Vyacheslav Kharchenko: Automation of Quantitative Requirements Determination to Software Reliability of Safety Critical NPP I&C systems”. In Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life

- Science and Operations Management (SMRLO'16), pp. 337--346 (2016).
49. Rong-Tsorng Wang Reliability Evaluation Techniques // J. Mathew et al. (eds.), Energy-Efficient Fault-Tolerant Systems, DOI 10.1007/978-1-4614-4193-9 2, Springer Science+Business Media New York 2014, pp. 11-97
50. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин // СПб: изд - во «Политехника».- 2000.- 248с.
51. Ericson Clifton A. Hazard Analysis Techniques for System Safety / Clifton A. Ericson // John Wiley & Sons, Inc., Hoboken: New Jersey. - 2005. - 528 p.
52. Кулик І. В. Засоби автоматизованої оцінки показників ефективності стратегій технічного обслуговування і ремонту систем радіоелектронного комплексу : автореф. дис. на здоб. вчен. зв. канд. техн. наук : 05.12.17 / І. В. Кулик; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Л., 2013. - 21 с.
53. Кустов В.Ф. Математичні моделі функційної безпечності та безвідмовності відновлюваних технічних засобів у разі використання мажоритарного резервування «2» із «3» / В.Ф. Кустов // Збірник наукових праць ДонІЗТ. Автоматика, телемеханіка, зв'язок. – 2010. – №23. – С. 5–13.
54. Abdo H. Monte Carlo simulation to solve fuzzy dynamic fault tree // H.Abdo, J-MFlaus / IFAC-PapersOnLine. – Volume 49. – Issue 12. – 2016. – PP. 1886-1891
55. Reece Clothier Determination and Evaluation of UAV Safety Objectives / Reece Clothier, Rodney Walker // In Proceedings 21st International Unmanned Air Vehicle Systems Conference, Bristol, United Kingdom.- 2006, - pages 18.1-18.16
56. А. С. Можаяев, А. А. Нозик, А. В. Струков, “Оценка надежности системы из элементов с тремя состояниями с использованием ПК АРБИТР”, Тр. СПИИРАН, 31 (2013), - С.123–146
57. Тарасюк О.М. Пример комплексного использования формальных методов спецификации требований и анализа надежности компьютерных систем управления / Тарасюк О.М., Горбенко А.В., Харченко В.С., Мотора Ю.В. // Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»/ Обробка інформації в складних технічних системах: науковий вісн. - №8 - 2010 - С.83-89.

58. Рябинин И. А. Логико-вероятностный анализ проблем надежности и безопасности / И.А. Рябинин // Saarbrucken , Deutschland , Palmarium Academic Publishing. - 2012. - 263 p.
59. Бочков К.А. Методы обеспечения безопасности в микропроцессорных системах железнодорожной автоматики и телемеханики/ К.А.Бочков, Харлап С.Н.– Учеб. пособие для студентов транспортных специальностей высших учебных заведений. Гомель: БелГУТ, 2001. – 84 с.
60. Годун Р.Л . Імовірністний аналіз безпеки як інструмент з підвищення рівня безпеки АЕС / Р.Л. Годун, С.В. Кравець // Східно - Європейський журнал передових технологій. - 2011. - №8 (51). - с. 47 - 51.
61. Щербовських С.В. Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності відновлюваних багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження [Текст] / С.В. Щербовських. □ Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. - 296 с.
62. Singiresu S. Rao Reliability-Based Design / Singiresu S. Rao // Mcgraw-Hill - 1992.- p.569.
63. Можаяев А.С. Методические основы оценки надежности и риска электрических систем и сетей / А.С. Можаяев, А.А. Римов // Труды Международной научной школы "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах" (МА БР – 2009), СПб: ГУАП, 2009.- с. 445-452.
64. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем (2 - е издание) / И.А. Рябинин // СПб: Изд - во СПбГУ.- 2007. - 276 с.
65. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: «Питер», 2005. –479 с.
66. Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы расчета надежности структурно-сложных систем / Г.Н. Черкесов, А.С. Можаяев // М.: Знание.- 1991. - 64 с.
67. Можаяева И. А. МЕТОДИКИ СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С СЕТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ/ АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата

технических наук. Специальность: 05.13.01 – "Системный анализ, управление и обработка информации", "Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург – 2015

68. Строгонов А. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем [Электронный ресурс] / А. Строгонов, В. Жаднов, С. Полесский // Компоненты и технологии, 2007. - № 5. - С. 183 - 190. - Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/device/2007_5_183.php. □
28.03.2016 г.
69. SAE ARP 4761. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment// Society of Automotive Engineers, Inc., 1996
70. NUREG-0492 Fault Tree Handbook. // U.S. Nuclear Regulatory Commission, ML100780465, <https://www.nrc.gov/docs/ML1007/ML100780465.pdf>
71. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications// Prepared for NASA Office of Safety and Mission Assurance NASA Headquarters Washington, DC 20546, 2002
https://elibrary.gsfc.nasa.gov/_assets/doclibBidder/tech_docs/25.%20NASA_Fault_Tree_Handbook_with_Aerospace_Applications%20-%20Copy.pdf
72. I. Fițigău Network Communication Reliability Analysis in Terms of Fault Tree// . I. Fițigău, Tomai Nicolae, G. Todorean/Journal of Electrical and Electronics Engineering, Volume 8, Number 1, May 2015, pp 13-16
73. Hora Cristina Fault-tree analysis used in a thermo- electric power plant / Ortmeier Frank, Adriana Catanase, Horea Hora // International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics.- 2004.- p. 22 -26.
74. Jong Chaur-Gong Bayesian Network Based Hydro Power Fault Diagnosis system development by Fault Tree Transformation / Chaur-Gong Jong, Sou- Sen Leu // Journal of Marine Science and Technology .- 2013.- Vol. 21, No.4. - p. 367-379.
75. Abdallah Dabboussi Fault tree analysis for the intelligent vehicular networks/ Abdallah Dabboussi ; Raed Kouta ; Jaafar Gaber ; Maxime Wack ; Bachar El Hassan ; Lina Nachabeh// 2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM), 8-20 April 2018, Jounieh, Lebanon, DOI:

76. Čepin M. Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability / Andrija Volkanovski, Marko Čepin, Borut Mavko // Reliability Engineering & System Safety. - 2009.- Vol. 94, № 6. - P. 1116- 1127.
77. Babczynski T. Time Coordination Of Distance Protection Using Probabilistic Fault Trees With Time Dependencies / Babczynski T., Lukowicz M., Magott J. // IEEE Transactions on Power Delivery.- 2010 - July (3).- P.1402–1409.
78. Maggot J. Timing Analysis Of Safety Properties Using Fault Trees With Time Dependencies And Timed State-Charts / Jan Maggot, Pawel Skrobanek // Reliability Engineering & System Safety. - 2012.- Vol. 97, № 1. - P. 14 - 26.
79. Lukowicz M. Selection Of Minimal Tripping Times For Distance Protection Using Fault Trees With Time Dependencies / M. Lukowicz, J.Magott, P. Skrobanek // Electric Power Systems Research.- 2011.- 81(July).- P.1556–1571.
80. Magott J. Analysis Of Timing Requirements For Intrusion Detection Systems In: Proceedings of the depend ability of computer systems / Magott J., Skrobanek P., Woda M. // DepCoS'07, Szklarska Poreba, Poland:IEEE Computer Society Press,- 2007.- P.278–285.
81. Magott J, Nowakowski T, Skrobanek P, Werbinska S. Analysis Of Possibilities Of Timing Dependencies Modelling - Example Of Logistic Support System / Magott J, Nowakowski T, Skrobanek P, Werbinska S.// Safety, Reliability and Risk Analysis. Theory, methods and applications, ESREL'2008,, - 2008. - vol.2. Leiden: Taylor and Francis.- P.1055–1063.
82. Magott J. Analysis Of Logistic Support System Using Fault Trees With Time Dependencies / Magott J, Nowakowski T, Skrobanek P, Werbinska S. // Archives of Transport .- 2007- Vol. №4.- p.175-182.
83. Contini Sergio Analysis Of Large Fault Trees Based On Functional Decomposition / Sergio Contini, Vaidas Matuzas // Reliability Engineering & System Safety. - 2011. - Vol.96, № 3. - P. - 383 - 390.
84. Merle G. Improving the Efficiency of Dynamic Fault Tree Analysis by Considering Gates FDEP as Static / G. Merle, J.-M. Roussel, J.-J. Lesage // European Safety and

- Reliability Conference (ESREL 2010), Rhodes : Greece.- 2010.- P. 1-7.
85. Lu L. Joint Failure Importance For Noncoherent Fault Trees / Lixuan Lu, Jin Jiang // Reliability, IEEE Trans. on. - 2007. - Vol. 56, № 3. - P. 435 - 443.
86. Mandziy B. Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component / B.Mandziy, O. Lozynsky, S. Shcherbovskykh, // Przegląd Elektrotechniczny. - 2013.- Vol. 89, №11. - P. 244-247.
87. Souza Rodrigo de Queiroz FMEA and FTA Analysis For Application of The Reliability Centered Maintenance Methodology: Case Study on Hydraulic Turbines / Rodrigo de Queiroz Souza, Alberto José Álvares //, ABCM Symposium Series in Mechatronics - Vol. 3 - P. 803-812.
88. Behringer B. Towards Feature-Oriented Fault Tree Analysis / B. Behringer, M. Lehser, S. Rothkugel // Vasteras: IEEE 38th International Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW), 2014.- p. 522-527.
89. Danhua Wang An approach of automatically performing Fault Tree Analysis and failure mode and effect techniques to software processes / Wang Danhua, Pan Jingui // Chengdu: 2nd International Conference on Software Engineering and Data Mining (SEDM), 2010. - p.187-191.
90. Danhua Wang An optimization to automatic Fault Tree Analysis and Failure Mode and Effect Analysis approaches for processes / Wang Danhua, Pan Jingui // Qinhuangdao: International Conference on Computer Design and Applications (ICCCA), 2010. - Vol.3.- p. 153-157.
91. Mhenni F. Automatic fault tree generation from SysML system models / F. Mhenni, Nga Nguyen, J.-Y. Choley // Besacon: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014.- p. 715-720.
92. Sherif Yacoub Automating the Analysis of Voting Systems / Sherif Yacoub, Xiaofan Lin, Steve Simske, John Burns // Software Reliability Engineering. ISSRE. – 2003. – P. 203–214.
93. Kloos J. Risk-Based Testing of Safety-Critical Embedded Systems Driven by Fault Tree Analysis / J. Kloos, T. Hussain, R. Eschbach // Berlin: IEEE Fourth

- International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW), 2011.- p.26-33.
94. Jacques Janssen Semi-Markov Risk Models for Finance, Insurance and Reliability / Janssen Jacques, Manca Raimondo // Springer: New York. - 2007. - 420 p.
95. Маевский Д. А. Влияние вторичных дефектов на надежность динамических информационных систем [Текст] / Д. А. Маевский // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 50(956). – с.54–58
96. Половко А.М. Основы теории надежности. Практикум [Текст] / А.М. Половко, С.В. Гуров. - Санкт-Петербург: БХВ Петербург, 2006. – 557с
97. Robert Collins Markov Models: Theory, Algorithms and Applications / CreateSpace Independent Publishing Platform (December 12, 2017) – 58p.
98. P. A. Rahman Using a specialized Markov chain in the reliability model of disk arrays RAID-10 with data mirroring and striping//MEACS2016 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177 (2017) 012087
99. Deepa Mani Availability Modelling of Fault Tolerant Cloud Computing System /Deepa Mani, Anand Mahendran// International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.10, No.1, 2017.- pp.154-165
100. DeLong T.A. Dependability metrics to assess safety-critical systems / T.A. DeLong, D.T. Smith, B.W. Johnson // IEEE Transactions on Reliability. - Vol.54, Issue.3. - 2005. - p.498 - 505.
101. Hongliang Pan Software safety analysis of 2-out-of-3 redundant architecture system based on Markov model / Pan Hongliang, Tu Jiliang, Zhang Xingyuan, Dong Decun // Guiyang: 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2011.- p. 493-498.
102. Ю.Я. Бобало Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем// Монографія / Ю.Я. Бобало, Б.Ю. Волочій, О.Ю. Лозинський, Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський, Д.В. Федасюк, С.В. Щербовських, В.С. Яковина. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 300 с.
103. Bohdan Volochiy, Bohdan Mandziy, Leonid Ozirkovskyi: Extending the features

- of software for reliability analysis of fault-tolerant systems. In: Computational Problems of Electrical Engineering, Volume 2, number 2, pp. 113-121. Lviv Politechnic National University, Lviv (2012)
104. Озірковський Л.Д., Модель поведінки програмно-апаратних електронних систем/ Озірковський Л.Д., Панський Т.І.// Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Електроніка. – 2013, № 764, с.36-43
105. Волочій Б.Ю. Методика оцінки показників ефективності радіоелектронного комплексу моніторингу повітряного простору / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Шкілюк О.П, Мащак А.В. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2013, № 766, с. 194-203
106. Волочій Б.Ю. Порівняння методів оцінки показників ефективності алгоритмів поведінки радіоелектронних комплексів / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2014, – №59, С. 29-39
107. Мандзій Б.А. Технологія аналітичного моделювання дискретно-неперевних стохастичних систем на основі блок-схем алгоритмів їх поведінки/ Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Вісник Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. – 2008. - № 621: Інформаційні системи та мережі. – С.171-181
108. Богдан Волочій Проектирования эффективных стратегий технического обслуживания. Математические модели, алгоритмы и методики //Монография/ Богдан Волочий, Леонид Озирковский, Игорь Кулык: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015
109. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический поход / Ф. Байхельт, П. Франкен; [Пер. с нем. М.Г. Коновалова]. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
110. Барзилович Е. Ю. Некоторые математические вопросы обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович, В. А. Каштанов. – М: Сов. радио, 1971. – 271 с.
111. Каштанов В. А. Теория надежности сложных систем (теория и практика) /

- В. А. Каштанов, А. И. Медведев. – М.: «Европейский центр по качеству», 2002. – 470 с.
112. В. Volochiy The maintenance strategy optimization of base stations of communication cellular network / В. Volochiy, L. Ozirkovskyy, I. Kulyk, M. Zmysnyi// Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. - 2016. - № 5 (79). – С. 120-129.
113. AC/AMJ No: 25.1309 Federal Aviation Regulations (FAR)/Joint Airworthiness Requirements (JAR), 2002
114. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие / Е. Ю. Барзилович. – М.: Высш. Школа, 1982. – 231 с.
115. Барзилович Е. Ю. Эксплуатация авиационных систем по состоянию / Е. Ю. Барзилович, В. Ф. Воскобоев. – М.: Транспорт, 1981. – 198 с.
116. Волох О. П. Методика обґрунтування раціональних значень параметрів технічного обслуговування машин інженерного озброєння при їх використанні за призначенням: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 20.02.14 «Озброєння і військова техніка» / О. П. Волох. – К., 2007. – 19 с.
117. Мачалин И. А. Математические модели стратегий технического обслуживания современной авионики / И. А. Мачалин // Математичні машини і системи. – 2005. – № 2. – С. 130–139.
118. Меша К. И. Иерархический комплекс моделей для определения параметров системы технического обслуживания и ремонта ИВС АСУ / К. И. Меша, В. А. Пархоменко, Е. А. Фатеева // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – 2010. – С. 85–90.
119. Насыров Р. И. Математические модели надежности и технического обслуживания систем защиты информации: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.13.14 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / Р. И. Насыров. – Казань, 2008. – 17 с.

120. Півнєв Д. А. Аналіз наближених методів розрахунку нестационарного коефіцієнта готовності радіоелектронних засобів зенітних ракетних комплексів і їх застосування до вирішення завдань експлуатації / Д. А. Півнєв, Д. С. Калугін, В. П. Попов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Харків: Видавництво Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2009. – № 1(1). – С. 56–58.
121. Сугак Е. В. Надежность технических систем / [Е. В. Сугак, Н. В. Василенко, Г. Г. Назаров и др.]. – Красноярск: МГП «Раско», 2001. – 608 с.
122. Ушаков И. А. Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем / И.А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 132 с.
123. Шантаренко С. Г. Моделирование процессов технического обслуживания локомотивов / С. Г. Шантаренко // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2005. – № 5. – Т. 308. – С. 169-171.
124. Креденцер Б. П. Технічне обслуговування систем з почасовою надмірністю: Навчальний посібник / Креденцер Б. П., Ленков С. В., Міночкін А. І., Могилевич Д. І., Резніков М. І. – К.: Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», 2009. – 172 с
125. Креденцер Б. П. Математична модель технічного обслуговування техніки тривалого зберігання при наявності почасової надмірності / Б. П. Креденцер, В. І. Кривцун // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Вип. №1. – К.: ВІТІ НТУУ «КПІ», 2005. – С. 75–80.
126. Креденцер Б. П., Волох О. П. Модель періодичного технічного обслуговування об'єктів озброєння і військової техніки / Б. П. Креденцер, О. П. Волох // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Вип. №2. – К.: ВІТІ НТУ «КПІ», 2005. – С. 53–56.
127. Креденцер Б. П. Оптимизация параметров технического обслуживания

- систем с временным резервированием / Б.П. Креденцер, В. В. Соколов // Электронное моделирование. – 1989. – №3. – С. 46–49.
128. . Креденцер Б.П. Модель технічного обслуговування за станом машин інженерного озброєння при їх використанні за призначенням / Б. П. Креденцер, О. П. Волох // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2006. – Вип. 12/13. – С. 14–19.
129. Креденцер Б. П. Оценка надежности обслуживаемых систем кратковременного действия при случайном режиме работы / Б. П. Креденцер, В. В. Соколов // Надежность и контроль качества. – 1988. – №5. – С. 29–33.
130. Креденцер Б. П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью / Б. П. Кеденцер. – Киев: Колос, 1978. – 162 с.
131. . Креденцер Б. П. Урахування часової надмірності та неповної інформації щодо безвідмовності техніки тривалого зберігання під час розрахунку періодичності технічного обслуговування / Б. П. Креденцер, В. І. Кривцун // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2005. – Вип. 10/11. – С. 22–26
132. Креденцер Б. П. Вибір стратегії обслуговування об'єктів озброєння та військової техніки на основі вартісного показника функціонування / Б. П. Креденцер, О. П. Волох // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка. – 2010. – № 27. – С. 47–52.
133. Меша К. И. Стратегии технического обслуживания АСУ / К. И. Меша, В. А. Пархоменко, Е. А. Фатеева // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – 2010. – С. 91–94.
134. Погорелов М. Г. Узагальнена модель процесів технічного обслуговування

- та ремонту автотранспортних засобів / М. Г. Погорелов, О. М. Ларін, О. І. Субочев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту, 2010. – № 2(11). – С. 32–36.
135. Чорний М. В. Стратегії технічного обслуговування і ремонту озброєння та військової техніки «за станом» / М. В. Чорний, Р. В. Долгов, Р. Г. Будяну // Військово-технічний збірник Львівського інституту Сухопутних військ Національного університету «Львівська політехніка». – Львів: ЛІСВ, 2009. – Вип. 1. – С. 65–69.
136. Мачалин И. А. Математические модели стратегий технического обслуживания современной авионики / И. А. Мачалин // Математичні машини і системи. – 2005. – № 2. – С. 130–139.
137. Новиков Е. В. Методы анализа надежности сложных технических систем с временной избыточностью инфраструктуры железнодорожного транспорта: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (транспорт)» / Новиков Е. В. – Москва, 2012. – 24 с.
138. . Shuhratjon Hidirov Reliability, availability and maintainability analyses for railway infrastructure management/ Shuhratjon Hidirov, Hakan Guler// Structure and Infrastructure Engineering Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, Volume 15, 2019 - Issue 9, <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1615964>
139. Шантаренко С. Г. Моделирование процессов технического обслуживания локомотивов / С. Г. Шантаренко // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2005. – № 5. – Т. 308. – С. 169-171.
140. Ramesh, A., "Average Probability Calculation Methods for System Safety Analysis," SAE Int. J. Aerosp. 8(2):214-226, 2015, <https://doi.org/10.4271/2015-01-2436>.
141. Kleinrock, Leonard Queueing Systems: Volume I – Theory. New York: Wiley Interscience, 1975.- pp. 417. ISBN 978-0471491101
142. Konig, D., Shtojan, D.: Methoden der Bedienungstheorie [Methods of Queueing

- Theory]. Vieweg, Braunschweig, 128 p. (1976)
143. Kleinrock, Leonard; Gail, Richard (12 April 1996). *Queueing Systems: Problems and Solutions*. Wiley-Interscience. p. 240. ISBN 978-0471555681
144. Абу-Абед Ф. Н. Имитационное моделирование процессов ремонтно-технического обслуживания нефтяных скважин // Программные продукты и системы. – Тверь, 2010. – № 4 (92). – С. 167–171.
145. Абу-Абед Ф. Н. Использование результатов распознавания предаварийных ситуаций для организации снабжения буровых запчастями / Ф. Н. Абу-Абед // Сборник научных трудов первого международного научно-практического симпозиума «Междисциплинарные исследования в науке и образовании». – К.: НЦЗИ ВИТИ НТУУ «КПИ», 2012. – № 1. – С. 58-70.
146. Портнягин А. Л. Совершенствование методов анализа процессов ремонтно-технического обслуживания скважинных систем нефтепромысла: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (нефтегазовая отрасль)» / А. Л. Портнягин. – Тюмень, 2005.– 22 с.
147. Рыбаков В. А. Системы массового обслуживания электрических двигателей на предприятиях агропромышленного комплекса / В.А. Рыбаков // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2011. – № 2/2. – С. 112–117.
148. Рыбаков В. А. Разработка методики планирования ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве на основе математического моделирования их жизненного цикла: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» / В. А. Рыбаков. – Барнаул 2007. – 24 с.
149. Рыбаков В. А. Анализ методов планирования работ по ремонту электрических двигателей на предприятиях агропромышленного комплекса / В. А. Рыбаков // Электронный физико-технический журнал. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2011. – Т. 6. – С. 36–43.
150. Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные

- методи аналізу і забезпечення / Под ред. Харченко В.С. - Министерство образования и науки Украины, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", 2011. - 641 с.
151. Kim Min-Seok Reliability Analysis for Train Control System by Hardware Redundancy Architecture in Fault Tolerance System /Min-Seok Kim, Min-Kyu Kim, Jong-Woo Lee // Journal of International Council on Electrical Engineering. – 2011. –№.2. – P. 140–144.
152. Koren Israel Fault tolerant systems / Israel Koren, C. Mani Krishna // Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 2007. – 378 p.
153. Lala J.H. A Design Approach for Ultra Reliable Real-Time / J.H.Lala, R.B.Harper, L.S.Alger // Systems IEEE Computer. – 1991. – P. 12–22.
154. Sklyar V. Reliability and Availability Analysis of FPGA-based Instrumentation and Control Systems / V.Sklyar, V.Kharchenko, A.Siora, S. Malokhatko, V.Golovir, Yu.Beliy // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM): proceedings of the 11th International Conference CADSM. – 2011. – P. 27–33.
155. Baleani M. Fault-Tolerant Platforms for Automotive Safety-Critical Applications/ M. Baleani, A. Ferrari, L. Mangeruca, A. Sangiovanni-Vincentelli, Maurizio Peri, Saverio Pezzini// Proceedings of the International Conference on Compilers, Architectures and Synthesis for Embedded Systems, CASES 2003, San Jose, California, USA, October 30 - November 1, 2003
156. Flight-Critical Systems Design Assurance. Final Report/ U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2012
157. Кустов В.Ф. Дослідження функційної безпечності системи МПЦ-Д / В.Ф. Кустов, О.В. Давидчук // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. Автоматика та комп'ютерні системи управління рухом поїздів. – 2010, вип. 118. – С. 7–12.
158. Кустов В.Ф. Дослідження функційної безпечності мікропроцесорної системи типу МПЦ-Ц / В.Ф. Кустов, С.В. Осадчий // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. Автоматика та комп'ютерні системи управління рухом поїздів. – 2011, вип. 126. – С. 72–76.

159. Панченко С.В. Дослідження мажоритарної структури системи з відновленням / С.В. Панченко, Н.Г. Панченко, А.А. Меліхов // Науково-технічний журнал «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». – 2010. – №5. – С. 62–68.
160. GEORGE POPOV Comparative Reliability Analysis for TMR «2 out of 3» Fault Tolerance Systems/GEORGE POPOV, TASHO TASHEV Proceedings of the International Conference on Computational and Information Science 2009 Houston, USA April 30-May 2, 2009- Volume II, 2009, pp. 357-360
161. Колос О. Л. Методика організації технічного обслуговування і ремонту техніки підрозділів інженерних військ України у ході виконання завдань у складі міжнародних миротворчих контингентів /О. Л. Колос // Збірник наукових праць / Державна прикордонна служба України, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Б. Хмельницького. – Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2011. – № 55. – С. 92-96
162. Zengkai Liu Reliability Analysis of the Electrical Control System of Subsea Blowout Preventers Using Markov Models/ Zengkai Liu, Yonghong Liu, Baoping Cai//PLOS online Journal, v.9(11); 2014, PMC4237418 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4237418/>
163. Фурман И.А. Новая концепция разработки и структурная организация безопасной системы автоматизированного управления движением поездов на метрополитенах [Электронный ресурс] / И. А. Фурман, М. Л. Малиновский // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. - 2006. - №5. - с. 97–102.
164. Shooman Martin L. Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design / Martin L.Shooman. – John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002. – 528 p.
165. Половко А. М. Основы теории надёжности / Половко А.М., Гуров С.В. // БХВ - Петербург, 2006. – 704 с.
166. Федухин А.В. Моделирование надежности восстанавливаемой резервированной системы со структурой типа «к из n» / Математичні машини і системи. – 2008. – № 4. – С. 189–193.

167. Губинский А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем / А. И. Губинский. – Л.: Наука. – 1982. – 270 с.
168. Куц А. В. Синтез алгоритмов и моделей аналого-цифровых преобразований в системах телеметрического контроля ракетно-космической техники. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, специальность 05.07.07 – «Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем» / Куц Александр Валентинович. – М., 2011. – 22 с.
169. Ашеро́в А. Т., Сажко Г. І. Ергономіка інформаційних технологій: оцінка, проектування, експертиза / А. Т. Ашеро́в, Г. І. Сажко. – Харків: УПА, 2005. – 243 с.
170. Иьуду К. А. Математическое модели отказоустойчивых вычислительных систем / К. А. Иьуду, С. А. Кривошеков. – М.: Изд-во МАИ, 1989. – 144 с.
171. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. / [Ред. совет: В. С. Авдуревский и др.]; Т. 3. Эффективность технических систем [В. У.Торбин, Г. Н. Охотников, Е. С. Егоров и др.]; под общ. ред. В. Ф. Уткина и Ю. В. Крючкова. – М., Машиностроение, 1988. – 328 с.
172. Гриф М. Г. Автоматизация проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе метода последовательной оптимизации / М. Г. Гриф, Е. Б. Цой – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 264 с.
173. Ротштейн О. П. Моделювання та оптимізація надійності багатовимірних алгоритмічних процесів / О. П. Ротштейн, С. Д. Штовба, О. М. Козачко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 211 с.
174. Ротштейн О. П. Нечітке прогнозування надійності алгоритмів з урахуванням помилок різних типів / О. П. Ротштейн, С. Д. Штовба, О. М. Козачко // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2005. – №4 С. 77–85. Сафонов И. В. Надежностный анализ систем с контролем и коррекцией / И. В. Сафонов // Проблемы надежности при проектировании цифровых автоматов. – К.: Знание. – 1972. – С. 23–30.
175. Сафонов И. В. Надежностный анализ систем с контролем и коррекцией / И.

- В. Сафонов // Проблемы надежности при проектировании цифровых автоматов. – К.: Знание. – 1972. – С. 23–30.
176. Сафонов И. В. Надежностное проектирование алгоритмов управления / И.В. Сафонов – Владивосток, ВИНТИ, 1982 – 157 с.
177. Сафонов И. В. Надежностное проектирование структурно-алгоритмических систем / И. В. Сафонов – К.: Знание. – 1975.– 37 с.
178. Сафонов И. В. О формализованном надежностном анализе алгоритмических процессов / И. В. Сафонов // Управляющие системы и машины. – 1973. – № 6. – С. 92–95.
179. Штовба С. Д. Інформаційна технологія забезпечення надійності алгоритмічних процесів в умовах невизначеності: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: спец. 05.13.06 – Інформаційні технології / Штовба Сергій Дмитрович. – Вінниця, 2009. – 32 с.
180. Штовба С. Д. Матричні моделі надійності алгоритмічних процесів за сумісності помилок різних типів / С. Д. Штовба // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2007. – №4 – С. 107–114.
181. Штовба С. Д. Нечіткі моделі надійності алгоритмічних структур / С. Д. Штовба // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2007. – №2. – С. 110–119.
182. Magott J. Timing Analysis of Safety Properties Using Fault Trees with time Dependencies and Timed State-Charts / J. Magott, P. Skrobanek // Reliability Engineering and System Safety. – 2012. – Vol. 97. – P. 14–26.
183. Papadopoulos Y. Analysis and Synthesis of the Behaviour of Complex Programmable Electronic Systems in Conditions of Failure / Y. Papadopoulos, J. McDermid, R. Sasse, G. Heiner // Reliability Engineering and System Safety. – 2001. – Vol. 71. – P. 229–247.
184. Rae A. A Behavior-Based Method for Fault Tree Generation/ Andrew Rae, Peter Lindsay // International System Safety Conference. – 2004. – p. 34–41.
185. Можаяев А. С. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем / А. С. Можаяев, В. Н. Громов. –

- СПб.: ВИТУ, 2000 – 145 с.
186. Мушовец К. В. Логико-вероятностный анализ надежности бортовой информационной телеметрической системы космического аппарата: дис. соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» / Мушовец Константин Владимирович. – Красноярск, 2013. – 115 с.
187. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
188. Joshi A. Behavioral Fault Modeling for Model-Based Safety Analysis / Anjali Joshi, Mats P. E. Heimdahl // Proceedings of 10th IEEE High Assurance Systems Engineering Symposium, 2007.– P. 199–208.
189. . Madala H. R. Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling / Hema R. Madala, A. G. Ivakhnenko. – Boca Raton: CRC Press, Inc., 2000. – 368 p.
190. Svobodová J. Parallel Computing and Neural Networks in Behavioral Modeling. Brno University of Technology : A doctoral thesis ... / Jitka Svobodová. – Brno, 2012. – 62 p.
191. Tehrani A. S. Behavioral Modeling of Radio Frequency Transmitters. Chalmers Reproservice: Thesis for The Degree of Licentiate of Engineering / Ali Soltani Tehrani. – Göteborg, 2009. – 63 p.
192. Vasilyev D. A More Reliable Reduction Algorithm for Behavioral Model Extraction / D. Vasilyev, J. White // Proc. of Int. Conf. on Computer Aided Design. – 2005. – P. 812–819.
193. Bouali M. Backward Reachability of Colored Petri Nets for Systems Diagnosis / M. Bouali, P. Barger, W. Schon // Reliability Engineering and System Safety. – 2012. – Vol. 99. – P. 1–14.
194. Peterson J. L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems / James L. Peterson. – Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc., 1981. – 290 p.
195. Peterson J. L. Petri Nets / James L. Peterson // Computing Surveys. – 1977. – Vol. 9. – No. 3 – P. 223–252.

196. Sadou N. Reliability Analysis of Discrete Event Dynamic Systems with Petri Nets / N. Sadou, H. Demmou // Reliability Engineering and System Safety. – 2009. – Vol. 94. – P. 1848–1861.
197. Matsuoka T. An Exact Method for Solving Logical Loops in Reliability Analysis / Takeshi Matsuoka // Reliability Engineering and System Safety. – 2009. – Vol. 94. – P. 1282–1288.
198. Zupei S. A Supplemental Algorithm for the Repairable System in the GO Methodology / Shen Zupei, Dai Xingjian, Huang Xiangrui // Reliability Engineering and System Safety. – 2006. – Vol. 91. – P. 940–944.
199. Zupei S. An Exact Algorithm Dealing with Shared Signals in the GO Methodology / Shen Zupei, Gao Jiab, Huang Xiangrui // Reliability Engineering and System Safety. – 2001. – Vol. 73. – P. 177–181.
200. Бе́ляєв В. П. Моделювання та оцінка ефективності локального радіоелектронного комплексу / В. П. Бе́ляєв, Б. Ю. Волочі́й, А. В. Грабчак, М. В. Міськів, Л.Д. Озірковський // Відбір і обробка інформації. Національна академія наук України. Міжвідомчий збірник наукових праць. – 1999. – Вип. 13 (89). – С. 65–70.
201. Бе́ляєв В. П. Оцінка ефективності методів розрахунку показників зв'язності в структурному аналізі радіоелектронних комплексів / В. П. Бе́ляєв, Б. Ю. Волочі́й, Л. Д. Озірковський, М. В. Павлів // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Теоретична електротехніка». – Львів: Вид-во “Світ”. – 1998. – Вип. 54. – С. 87–93
202. Озірковський Л.Д. Розробка засобів оцінки ефективності алгоритмів пошуку і виявлення цілей прицільних радіоелектронних комплексів: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.12.17 / Озірковський Леонід Деонісійович. – Львів: – 2002. – 154 с.
203. Dabrowski C. Using Markov Chain and Graph Theory Concepts to Analyze Behavior in Complex Distributed Systems / Christopher Dabrowski, Fern Hunt // 23rd European Modeling and Simulation Symposium, Proceedings. – 2011. – P. 659–668

204. E. Dubrova, Fault-Tolerant Design, Springer, New York, USA, 2013
205. Pham H., Handbook of Reliability Engineering / Hoang Pham – London: British Library Cataloguing in Publication Data, 2003. – 696 p.
206. Mandzija B., Woloczia B., Ozirkowskyj L., Ulybin D. Kompleksowe modelowanie systemu informatycznego z rezerwowaniem funkcjonalnym//Prace II Krajowego Sympozjum „Modelowanie i symulacja komputerowa w technice” MiS’2003, Lodz, 2003. - S. 133 – 136
207. Волочий Б.Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Волочий Б.Ю. – Львів: НУЛП, 2004. – 220с
208. Волочий Б. Ю. Марковська модель як засіб комплексного моделювання інформаційних систем з функціональним резервуванням / Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озірковський, Д. О. Улибін // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2003. – №470. – С. 101–109.
209. Саркисян Х. В. Использование «деревьев» поиска состояний для поддержки принятия решений при комплексной оперативной оценке бортовых систем космического аппарата / Х. В. Саркисян, М. М. Матюшин // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – №5. – С. 1–11.
210. Надійність техніки. Методи розрахунків показників надійності. Загальні вимоги: ДСТУ 2862-94. [Затверджено і введено в дію: наказ Держспоживстандарт № 310 від 08.12.1994 р.]. – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 38 с.
211. Райншке К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райншке, И.А. Ушаков; [Под ред. И.А. Ушакова]. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
212. Madhu Jain Markovian analysis of unreliable multi-components redundant fault tolerant system with working vacation and F-policy /Madhu Jain and Rakesh Kumar Meena// Jain & Meena, Cogent Mathematics (2017), 4: 1306961 <http://dx.doi.org/10.1080/23311835.2017.1306961>

213. Omid NOROUZIFAR Developing a New Weighted Voting Algorithm based on Markov Model/ Omid NOROUZIFAR , Manouchehr KAZEMI,* , Mahdieh Nadi SENEJANI// Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, Vol. 86, special edition, 2017, p. 528 – 534
214. Vasilyev D. A More Reliable Reduction Algorithm for Behavioral Model Extraction / D. Vasilyev, J. White // Proc. of Int. Conf. on Computer Aided Design. – 2005. – P. 812–819.
215. Robert Collins Markov Models: Theory, Algorithms and Applications / CreateSpace Independent Publishing Platform (December 12, 2017) – 58p.
216. Thangamani Gurunathan Availability Analysis of Regenerator System Using Markov Process Approach// American Journal of Computational and Applied Mathematics, 2017; 7(3): pp. 65-70
217. B. Volochiy The maintenance strategy optimization of base stations of communication cellular network / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, I. Kulyk, M. Zmysnyi// Радіоелектронні і комп'ютерні системи. - 2016. - № 5 (79). – С. 120-129.
218. Hongbin Li A cut/tie set method for reliability evaluation of control systems/Hongbin Li, Qing Zhao //Proceedings of the American Control Conference, June 8-10, 2005. Portland, OR, USA
219. <https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com>
220. Rong-Tsorng Wang Chapter 2 Reliability Evaluation Techniques Rong-Tsorng Wang//J. Mathew et al. (eds.), Energy-Efficient Fault-Tolerant Systems, Springer Science+Business Media New York 2014 pp.11-97
221. Ajit Kumar Verma Reliability and Safety Engineering /Ajit Kumar Verma, Srividya Ajit, Durga Rao Karanki, Ajit Kumar Verma, Srividya Ajit, Durga Rao Karanki, Springer Science & Business Media, 2010. - 577 p.
222. Fengchan Wang Study of Uncontained Turbine Engine Rotor Failure airworthiness compliance Verification Method / Wang Fengchan, Sun Youchao, Zeng Haijun // Procedia Engineering 17.- 2011.- p. 531-541
223. US Armed Forces Military Procedures document: MIL-P-1629.- 678 p.

224. Block Sim. RBDs, fault trees and Markov diagrams.
<https://www.reliasoft.com/products/reliability-analysis/blocksim>
225. Волочій Б.Ю. Оцінка ефективності використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 48. – С. 117 – 125.
226. Креденцер Б. П. Вибір стратегії обслуговування об'єктів озброєння та військової техніки на основі вартісного показника функціонування / Б. П. Креденцер, О. П. Волох // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка. – 2010. – № 27. – С. 47–52.
227. Креденцер Б. П. Математична модель середнього ремонту з багатоетапним виконанням робіт / Б.П. Креденцер, М.І. Рєзніков, О.В. Буяло, В.І. Тхоржевський // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2003. – Вип. 5/7. – С. 67-70
228. . Креденцер Б. П. Математична модель середнього ремонту сучасних зразків радіоелектронних засобів озброєння при незнецінюючих відмовах / Б.П. Креденцер, М.І. Рєзніков, О.В. Буяло, І.В. Пампуха // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2006. – Вип. 12/13. – С. 60–63
229. Креденцер Б.П. Оптимізація періодичності контролю технічного стану пристроїв військового призначення за відсутністю самостійного прояву відмов / Б. П. Креденцер, О. П. Волох, В. І. Кривцун // Збірник наукових праць Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військовий інститут. – Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2006. – Вип. 2. – С. 77-82
230. Креденцер Б.П. Оптимізація періодичності контролю технічного стану

- пристроїв військового призначення за відсутністю самостійного прояву відмов / Б. П. Креденцер, О. П. Волох, В. І. Кривцун // Збірник наукових праць Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військовий інститут. – Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2006. – Вип. 2. – С. 77-82
231. Волочій Б. Ю. Удосконалення технології моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем з використанням методу фаз Ерланга / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, І. В. Кулик // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ. – 2012. – С. 159–167.
232. Волочій Б. Ю. Метод побудови моделей поведінки складних систем немарковського типу у вигляді графа станів і переходів / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, І. В. Кулик // Міжнародний науковий журнал "Комп'ютинг". – Тернопіль: Науково-дослідний інститут інтелектуальних комп'ютерних систем. Тернопільський Національний економічний університет, 2012. – том 11. – випуск №3. – С. 262–271
233. Мандзій Б. А. Визначення параметрів стратегії аварійного відновлення для відмовостійких систем на основі мажоритарної структури / Б. А. Мандзій, Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, М. М. Змисний, І. В. Кулик // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. «Радіотехніка та телекомунікації». – Львів: Вид-во національного університету “Львівська політехніка”, 2011. – №705. – С. 216–224
234. Харченко В.С., Скляр В.В., Брежнев Е.В. Безопасность информационно-управляющих систем и инфраструктур: модели, методы и технологии. Germany, Palmarium Academic Publishing, 2013. – 528 p
235. Арсеньев Ю.Н. Проектирование систем логического управления на микропроцессорных средствах / Ю. Н. Арсеньев, В. М. Журавлев. – Москва: Высшая школа, 1991. – 319 с.
236. Padmanabhan Balasubramanian Majority and Minority Voted Redundancy Scheme for Safety-Critical Applications with Error/No-Error Signaling Logic/

- Padmanabhan Balasubramanian , Douglas Maskell and Nikos Mastorakis//
Electronics 2018, 7, 272; doi:10.3390/electronics7110272
237. Adeosun Olajide O. Hybrid Modular Redundancy Network for Critical Systems /
Olajide O.Adeosun, Wasiu O. Ismaila, Iyabo O. Omotoso, Titilayo H. Adeosun //
International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2012.
– P. 490–497.
238. Biernat Janusz The Effect of Compensating Faults Models on NMR System
Reliability / Biernat Janusz // IEEE Transactions on reliability. – 1994. – vol. 43,
No. 2. – P. 294–300.
239. Lombardi F. Modeling the Dependability of N-Modular Redundancy on Demand
under Malicious Agreement / Lombardi F., Park N., Al-Hashimi, M., Pu H.H. //
Dependable Computing, 2001. – 2001. – P. 68–75.
240. Федухин А.В. Моделирование надежности невосстанавливаемой системы
со структурой типа «к из n» с реконфигурацией / А.В. Федухин, Н.В. Сеспедес-
Гарсия // Відмовостійкі системи. – 2009. – №7. – С. 82–84.
241. 4.12. Lo H.-Y. General version of reconfiguration N modular redundancy system./
Lo H.-Y., Ju L.-P., Su, C.-C.// Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings. –
1990. – P. 1-4.
242. Чуканов В.О. Надежность программного обеспечения и аппаратных средств
систем передачи данных атомных электростанций / В.О. Чуканов.– М.:
МИФИ, 2008. – 168 с.
243. Yeh Y.C. Safety critical avionics for the primary flight controls system. Digital
Avionics Systems/ Yeh Y.C. // DASC. 20th Conference. –2001, vol.1. – P. 1C2/1–
1C2/11.
244. T.J. van Beek , T. Tomiyama Requirements for Complex Systems
Modeling//Proceeding CIRP Design Conference 2008
245. Волочій Б.Ю. Модель цифрової системи комутації вузла телекомунікаційної
мережі / Волочій Б.Ю., Матічин О.В., Озірковський Л.Д., Стецюк С.О., Улибін
Д.О. // Вісник Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, № 508, Радіоелектроніка та

- телекомунікації, Львів. – Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2004. – С. 144 – 152
246. Б.Ю. Волочій Оцінка ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарату / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Ю.М. Пашук, А.В., Машчак, В.А. Онищенко// Військово-технічний збірник : зб. наук. пр. / Акад. сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного. – 2015. - Вип. 13. - С. 77 - 87.
247. Мандзій Б.А. Методи оцінювання структурної живучості ієрархічних інформаційних мереж регіональних радіоелектронних комплексів/ Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Міжвідомчий збірник наукових праць “Відбір і обробка інформації”. - Львів: Вид-во ФМІ НАНУ.- 2009, вип. 30, - с. 104-112
248. B. Volochiy Technique of Construction Models of Behavior Algorithms of Radio Electronic Complex System using the Scheme of Paths Method / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyi, Oleksandr Shkiliuk, Andriy Mashchak // International Journal of Computing, Vol. 13, Issue 3, 2014, pp. 183-190.
249. Mustafa Ayoob Fault Detection and Correction in Processing AES Encryption Algorithm/ Mustafa Ayoob ; Wael Adi// Sixth International Conference on Emerging Security Technologies (EST), 3-5 Sept. 2015, Braunschweig, Germany
250. Д. С. Викторов, Алгоритм обеспечения отказоустойчивости бортовых вычислительных систем со структурно-временной избыточностью / Информационно-Управляющие Системы, № 6, 2011, с. 30-35
251. Труханов, В.М., Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытаний опытных образцов, М.: Машиностроение, 2003, 320 с.
252. Волочій Б.Ю. Метод аналізу ефективності алгоритмів поведінки радіоелектронних комплексів відповідального призначення / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Шкілюк О.П, Машчак А.В. // Науково-технічний журнал «Радіоелектронні і комп'ютерні системи». – 2014, №6 (70), С. 130 – 134.

253. Волочій Б.Ю. Моделі відмовостійкої системи з використанням трьох мажоритарних структур, вкладених у мажоритарну структуру, для розв'язання задач надійнісного проектування/ Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Змисний М.М., Муляк О.В. // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2012. – №738. – С. 223–230.

ДОДАТОК А СТРУКТУРНО-АВТОМАТНІ МОДЕЛІ ВІДМОВОСТІЙКИХ РЕСВП З МАЖОРИТАРНОЮ СТРУКТУРОЮ

Таблиця 1. Структурно-автоматна модель відмовостійкої РЕСВП з процедурою
реконфігурації мажоритарної структури

Базові події	Умови та обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
1. Відмова модуля в ядрі МС.	$(V1 > 0) \text{ AND } (V7 = 0)$	$V1 * \lambda_n$	1	$V1 := V1 - 1;$ $V2 := V2 + 1;$ $V7 := 1$
2. Закінчення процедури підключення модуля з гарячого резерву в ядро МС.	$(V2 > 0) \text{ AND } (V3 = 1) \text{ AND } (V7 = 1)$	$1/T_h$	P_h	$V1 := V1 + 1;$ $V2 := V2 - 1;$ $V3 := 0; V7 := 0$
	$(V2 > 0) \text{ AND } (V3 = 0) \text{ AND } (V7 = 1)$		$1 - P_h$	$V2 := V2 - 1; V7 := 0$
			1	$V2 := V2 - 1; V7 := 0$
3. Закінчення процедури переведення модуля з холодного резерву в гарячий резерв.	$(V3 = 0) \text{ AND } (V4 > 0) \text{ AND } (V7 = 0)$	$1/T_c$	P_c	$V3 := 1; V4 := V4 - 1$
			$1 - P_c$	$V4 := V4 - 1$
4. Відмова резервного модуля (гарячий резерв).	$(V3 = 1)$	λ_n	1	$V3 := 0$
5. Закінчення процедури реконфігурації МС.	$(V1 = V6) \text{ AND } (V1 \geq 3) \text{ AND } (V2 = 0) \text{ AND } (V3 = 0) \text{ AND } (V8 = 1)$	$1/T_{rec}$	P_{rec}	$V1 := V1 - 1;$ $V3 := 1; V6 := V6 - 2$
			$1 - P_{rec}$	$V1 := V1 - 1;$ $V2 := V2 + 1;$ $V7 := 1$
	P_{rec}		$V1 := V1 - 1;$ $V4 := V4 + 1;$	

Базові події	Умови та обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
	(V2=0) AND (V3=1) AND (V8=1)			V6:=V6-2
			1-P _{rec}	V1:=V1-1; V2:=V2+1; V7:=1
Критерій аварійної ситуації: (V1<V5)				

Таблиця 2. Структурно-автоматна модель відмовостійкої РЕСВП з використанням дворівневих мажоритарних структур, яка втрачає працездатність після критичної відмови 2-х ядер

Умови та обставини	ФРІБ П	ПМКВС
1. Базова подія «Відмова модуля в ядрі №1»		
(V1=3) AND (V2=0)	$V1 \cdot \lambda_n$	V1:=V1-1
(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=3) AND (V5=3)		V1:=0; V2:=1; V7:=V7+1
(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V5=3)		V1:=0; V2:=1; V3:=3
(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=3) AND (V5=2)		V1:=0; V2:=1; V5:=3
(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V5=2)		V1:=0; V2:=1; V3:=3
(V1=2) AND (V2=0) AND ((V4=0) AND (V6>0)) OR ((V4>0) AND (V6=0))		V1:=1; V2:=1
2. Базова подія «Відмова модуля в ядрі №2»		
(V3=3) AND (V4=0)	$V3 \cdot \lambda_n$	V3:=2
(V3=2) AND (V4=0) AND (V1=3) AND (V5=3)		V3:=0; V4:=1; V7:=V7+1
(V3=2) AND (V4=0) AND (V1=2) AND (V5=3)		V3:=0; V4:=1; V1:=3
(V3=2) AND (V4=0) AND (V1=3) AND (V5=2)		V3:=0; V4:=1; V5:=3

Умови та обставини	ФРІБ П	ПМКВС
(V3=2) AND (V4=0) AND (V1=2) AND (V5=2)		V3:=0; V4:=1; V1:=3
(V3=2) AND (V4=0) AND ((V2=0) AND (V6>0)) OR ((V2>0) AND (V6=0))		V3:=1; V4:=1
3. Базова подія «Відмова модуля в ядрі №3»		
(V5=3) AND (V6=0)		V5:=2
(V5=2) AND (V6=0) AND (V1=3) AND (V3=3)	V5·λ _n	V5:=0; V6:=1; V7:=V7+1
(V5=2) AND (V6=0) AND (V1=2) AND (V3=3)		V5:=0; V6:=1; V1:=3
(V5=2) AND (V6=0) AND (V1=3) AND (V3=2)		V5:=0; V6:=1; V3:=3
(V5=2) AND (V6=0) AND (V1=2) AND (V3=2)		V5:=0; V6:=1; V1:=3
(V5=2) AND (V6=0) AND ((V2=0) AND (V4>0)) OR ((V2>0) AND (V4=0))		V5:=1; V6:=1
4. Базова подія «Відмова МЕ №1»		
(V2=0) AND (V3=3) AND (V5=3)	λ _{me}	V7:=V7+V1; V1:=0; V2:=2
(V1=3) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V5=3)		V1:=0; V2:=2; V3:=3; V7:=V7+2
(V1=3) AND (V2=0) AND (V3=3) AND (V5=2)		V1:=0; V2:=2; V5:=3; V7:=V7+2
(V1=3) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V5=2)		V1:=0; V2:=2; V3:=3; V5:=3; V7:=V7+1
(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V5=3)		V1:=0; V2:=2; V3:=3; V7:=V7+1
(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=3) AND (V5=2)		V1:=0; V2:=2; V5:=3; V7:=V7+1
(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V5=2)		V1:=0; V2:=2; V3:=3; V5:=3
(V2=0) AND ((V4=0) AND (V6>0)) OR ((V4>0) AND (V6=0))		V2:=2
5. Базова подія «Відмова МЕ №2»		

Умови та обставини	ФРІБ П	ПМКВС
$(V4=0) \text{ AND } (V1=3) \text{ AND } (V5=3)$	λ_{me}	$V7:=V7+V3; V3:=0;$ $V4:=2$
$(V3=3) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V1=2) \text{ AND } (V5=3)$		$V3:=0; V4:=2; V1:=3;$ $V7:=V7+2$
$(V3=3) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V1=3) \text{ AND } (V5=2)$		$V3:=0; V4:=2; V5:=3;$ $V7:=V7+2$
$(V3=3) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V1=2) \text{ AND } (V5=2)$		$V3:=0; V4:=2; V1:=3;$ $V5:=3; V7:=V7+1$
$(V3=2) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V1=2) \text{ AND } (V5=3)$		$V3:=0; V4:=2; V1:=3;$ $V7:=V7+1$
$(V3=2) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V1=3) \text{ AND } (V5=2)$		$V3:=0; V4:=2; V5:=3;$ $V7:=V7+1$
$(V3=2) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V1=2) \text{ AND } (V5=2)$		$V3:=0; V4:=2; V1:=3;$ $V5:=3$
$(V4=0) \text{ AND } ((V2=0) \text{ AND } (V6>0)) \text{ OR } ((V2>0) \text{ AND } (V6=0))$		$V4:=2$
6. Базова подія «Відмова МЕ №3»		
$(V6=0) \text{ AND } (V1=3) \text{ AND } (V3=3)$	λ_{me}	$V7:=V7+V5; V5:=0;$ $V6:=2$
$(V5=3) \text{ AND } (V6=0) \text{ AND } (V1=2) \text{ AND } (V3=3)$		$V5:=0; V6:=2; V1:=3;$ $V7:=V7+2$
$(V5=3) \text{ AND } (V6=0) \text{ AND } (V1=3) \text{ AND } (V3=2)$		$V5:=0; V6:=2; V3:=3;$ $V7:=V7+2$
$(V5=3) \text{ AND } (V6=0) \text{ AND } (V1=2) \text{ AND } (V3=2)$		$V5:=0; V6:=2; V1:=3;$ $V3:=3; V7:=V7+1$
$(V5=2) \text{ AND } (V6=0) \text{ AND } (V1=2) \text{ AND } (V3=3)$		$V5:=0; V6:=2; V1:=3;$ $V7:=V7+1$
$(V5=2) \text{ AND } (V6=0) \text{ AND } (V1=3) \text{ AND } (V3=2)$		$V5:=0; V6:=2; V3:=3;$ $V7:=V7+1$
$(V5=2) \text{ AND } (V6=0) \text{ AND } (V1=2) \text{ AND } (V3=2)$		$V5:=0; V6:=2; V1:=3;$ $V3:=3$
$(V6=0) \text{ AND } ((V2=0) \text{ AND } (V4>0)) \text{ OR } ((V2>0) \text{ AND } (V4=0))$		$V6:=2$
7. Базова подія «Підключення модуля з ковзного резерву в ядро»		

Умови та обставини	ФРІБ П	ПМКВС
$(V7 > 0) \text{ AND } (V1 = 2) \text{ AND } (V3 = 3) \text{ AND } (V6 > 0)$	1/T	$V1 := 3; V7 := V7 - 1$
$(V7 > 0) \text{ AND } (V1 = 3) \text{ AND } (V3 = 2) \text{ AND } (V6 > 0)$		$V3 := 3; V7 := V7 - 1$
$(V7 = 1) \text{ AND } (V1 = 2) \text{ AND } (V3 = 2) \text{ AND } (V6 > 0)$		$V1 := 3; V7 := V7 - 1$
$(V7 \geq 2) \text{ AND } (V1 = 2) \text{ AND } (V3 = 2) \text{ AND } (V6 > 0)$		$V1 := 3; V3 := 3; V7 := V7 - 2$
$(V7 > 0) \text{ AND } (V1 = 2) \text{ AND } (V5 = 3) \text{ AND } (V4 > 0)$		$V1 := 3; V7 := V7 - 1$
$(V7 > 0) \text{ AND } (V1 = 3) \text{ AND } (V5 = 2) \text{ AND } (V4 > 0)$		$V5 := 3; V7 := V7 - 1$
$(V7 = 1) \text{ AND } (V1 = 2) \text{ AND } (V5 = 2) \text{ AND } (V4 > 0)$		$V1 := 3; V7 := V7 - 1$
$(V7 \geq 2) \text{ AND } (V1 = 2) \text{ AND } (V5 = 2) \text{ AND } (V4 > 0)$		$V1 := 3; V5 := 3; V7 := V7 - 2$
$(V7 > 0) \text{ AND } (V3 = 2) \text{ AND } (V5 = 3) \text{ AND } (V2 > 0)$		$V3 := 3; V7 := V7 - 1$
$(V7 > 0) \text{ AND } (V3 = 3) \text{ AND } (V5 = 2) \text{ AND } (V2 > 0)$		$V5 := 3; V7 := V7 - 1$
$(V7 = 1) \text{ AND } (V3 = 2) \text{ AND } (V5 = 2) \text{ AND } (V2 > 0)$		$V3 := 3; V7 := V7 - 1$
$(V7 \geq 2) \text{ AND } (V3 = 2) \text{ AND } (V5 = 2) \text{ AND } (V2 > 0)$		$V3 := 3; V5 := 3; V7 := V7 - 2$
<p align="center">Критерій аварійної ситуації:</p> $((V2 > 0) \text{ AND } (V4 > 0)) \text{ OR } ((V2 > 0) \text{ AND } (V6 > 0)) \text{ OR } ((V4 > 0) \text{ AND } (V6 > 0))$		

Структурно-автоматна модель відмовостійкої РЕСВП з врахуванням технічного обслуговування

Базові події	Умови і обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
1. Відмова модуля в ядрі МС.	$(V1 \leq ((n+1)/2))$ AND $(V6=0)$ AND $(V7=K)$	$V1 * \lambda_n$	1	$V1 := V1 - 1;$ $V2 := V2 + 1;$ $V6 := V6 + 1;$
2. Закінчення процедури підключення модуля з холодного резерву в ядро МС.	$(V2 > 0)$ AND $(V3 > 0)$ AND $(V6 = 1)$ AND $(V7 = K)$	$1/T_c$	P_c	$V1 := V1 + 1;$ $V2 := V2 - 1;$ $V3 := V3 - 1;$ $V4 := V4 + 1;$ $V6 := 0$
			$1 - P_c$	$V2 := V2 - 1;$ $V4 := V4 + 1;$ $V6 := 0$
	$(V2 > 0)$ AND $(V3 = 0)$ AND $(V6 = 1)$ AND $(V7 = K)$	1	$V2 := V2 - 1;$ $V4 := V4 + 1;$ $V6 := 0$	
3. Закінчення ремонту (заміни) несправних модулів.	$(V1 < n)$ AND $(V1 \geq ((n+1)/2))$ AND $(V2 = 0)$ AND $(V3 = 0)$ AND $(V4 > 0)$ $(V4 \leq V5)$ AND $(V5 > 0)$ AND $(V7 > 1)$	$K / (V4 * T_{rem} + T_p)$	1	$V7 := V7 - 1$
	$(V1 < n)$ AND $(V1 \geq ((n+1)/2))$ AND $(V2 = 0)$ AND $(V3 = 0)$ AND $(V4 > 0)$ AND $(V4 \leq V5)$ AND $(V5 > 0)$ AND $(V7 = 1)$		1	$V1 := n; V3 := m;$ $V5 := V5 - V4;$ $V4 = 0; V7 := K$
	$(V1 < n)$ AND $(V1 \geq ((n+1)/2))$ AND $(V2 = 0)$ AND $(V3 = 0)$ AND	$K / (V5 * T_{rem} + T_p)$	1	$V7 := V7 - 1$

Базові події	Умови і обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
	(V4>0) AND (V4>V5) AND (V4<=(n-V1)) AND (V5>0) AND (V7>1)			
	(V1<n) AND (V1>=((n+1)/2)) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4>0) AND (V4>V5) AND (V4<=(n-V1)) AND (V5>0) AND (V7=1)		1	V1:=V1+V5; V4:=V4-V5; V5:=0; V3:=0; V7:=K
	(V1<n) AND (V1>=((n+1)/2)) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4>0) AND (V4>V5) AND (V4>(n-V1)) AND (V5<=(n-V1)) AND (V5>0) AND (V7>1)		1	V7:=V7-1
	(V1<n) AND (V1>=((n+1)/2)) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4>0) AND (V4>V5) AND (V4>(n-V1)) AND (V5<=(n-V1)) AND (V5>0) AND (V7=1)		1	V1:=V1+V5; V4:=V4-V5; V5:=0; V3:=0; V7:=K
	(V1<n) AND (V1>=((n+1)/2)) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4>0) AND (V4>V5) AND		1	V7:=V7-1

Базові події	Умови і обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
	$(V4 > (n - V1)) \text{ AND}$ $(V5 > (n - V1)) \text{ AND}$ $(V5 > 0) \text{ AND}$ $(V7 > 1)$			
	$(V1 < n) \text{ AND}$ $(V1 \geq ((n+1)/2))$ $\text{AND } (V2 = 0) \text{ AND}$ $(V3 = 0) \text{ AND}$ $(V4 > 0) \text{ AND}$ $(V4 > V5) \text{ AND}$ $(V4 > (n - V1)) \text{ AND}$ $(V5 > (n - V1)) \text{ AND}$ $(V5 > 0) \text{ AND}$ $(V7 = 1)$		1	$V3 := V5 - (n - V1);$ $V1 := n;$ $V4 := V4 - V5;$ $V5 := 0; V7 := K$
Критерій аварійної ситуації: $(V1 < ((n+1)/2))$				

ДОДАТОК Б АЛГОРИТМ ВТОМАТИЗАЦІЇ СИНТЕЗУ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Розроблений алгоритм передбачає виконання наступних кроків:

Крок 1. Зчитування даних про інтенсивності переходів із стану в стан із сформованого програмним модулем ASNA файлу “Intensities.xls”. На основі зчитаних даних формується матриця **A**, яка складається з чотирьох стовпців та **KP** рядків, де **KP** це кількість переходів в графі станів та переходів. В стовпцях матриці **A** міститься наступна інформація: стовпець №1 – початкові значення ймовірності перебування системи в кожному стані; стовпець №2 – номер стану системи в який здійснюється перехід; стовпець №3 – номер стану системи з якого здійснюється перехід; стовпець №4 – значення інтенсивності переходів між станами.

Крок 2. Формування набору станів, які відображають перебування системи на відповідному етапі обслуговування.

Для розрахунку функції готовності, аварійності та простою необхідно здійснити формування відповідних масивів куди записуються номери станів, які відображають перебування ремонтної бригади на відповідному етапі ТО:

$V_m=[]$ – стани, в яких ремонтна бригада перебуває на першому етапі проведення ППО, в яких відбувається моніторинг прихованих відмов;

$V_{ppo}=[]$ – стани, в яких ремонтна бригада здійснює ППО РЕСВП;

$V_{avr}=[]$ – стани, в яких ремонтна бригада здійснює АВР РЕСВП;

$V_p=[]$ – стани в яких всі РЕСВП є працездатними.

Крок 3. Формування квадратної матриці інтенсивностей переходів

Для того щоб здійснити формування квадратної матриці інтенсивностей та виділити в ній промаркований параметр, відносно якого буде здійснюватись дослідження необхідно задати значення промаркованого параметру, яке

вводилося в програмний модуль ASNA при побудові графа $X=100000$. Також необхідно задати новий масив значень XU параметра “X” відносно якого буде проводитись дослідження. Для кожного значення масиву XU необхідно здійснити формування матриці інтенсивності, в якій значення параметра “X” буде замінене відповідним значенням з масиву XU .

Формування матриці інтенсивностей здійснюється в два етапи. На першому етапі здійснюється заповнення всіх елементів матриці інтенсивностей крім діагональних. На основі інформації, яка знаходиться в матриці A формується квадратна матриця інтенсивностей HH . Константі C присвоюється значення, яке відповідає кількості рядків матриці A . Змінній k почергово присвоюються значення від 1 до C . З k -го рядка 2-го стовпця матриці A вибирається номер стану, в який здійснюється перехід, а з k -го рядка 3-го стовпця номер стану, з якого здійснюється перехід. Якщо значення k -го рядка 2-го стовпця матриці A співпадає з значенням k -го рядка 3-го стовпця (що свідчить про заповнення діагонального елемента) то значення матриці інтенсивностей $HH(A(k,2),A(k,3))=0$ (Блок 6). Таким чином здійснюється обнулення всіх діагональних елементів матриці інтенсивностей.

Формування недіагональних елементів відбувається наступним чином. Якщо значення інтенсивності, яке знаходиться в k -му рядку 4-го стовпця матриці A більше 0 $A(k,4)>0$ (Блок 7) то здійснюється перевірка чи це значення не є промарковане. Якщо $A(k,4)>(X/10)$ (Блок 8) то це означає, що дана інтенсивність переходу містить в собі промаркований параметр. Виділення цього параметру та його заміна значенням з масиву XU відбувається за допомогою наступного виразу (Блок 9):

$$HH(A(k,2),A(k,3))=A(k,4)-X+1/(XU(jX)). \quad (3.14)$$

В іншому випадку в відповідний елемент матриці HH записується значення інтенсивності переходу (Блок 10):

$$HH(A(k,2),A(k,3))=A(k,4). \quad (3.15)$$

Якщо $A(k,4)<(-X/10)$ то це означає, що дана інтенсивність переходу містить в собі промаркований параметр. Виділення цього параметру та його заміна

значенням з масиву ХУ відбувається за допомогою наступного виразу (Блок 13):

$$HH(A(k,2),A(k,3))=A(k,4)+XX-1/(X*24*30). \quad (3.16)$$

В іншому випадку в відповідний елемент матриці НН записується значення інтенсивності переходу (Блок 14):

$$HH(A(k,2),A(k,3))=A(k,4). \quad (3.17)$$

Після формування всіх недіагональних елементів матриці НН проводимо формування її діагональних елементів. Формування діагонального елемента кожного стовпця здійснюється шляхом сумування всіх недіагональних елементів в цьому стовпці. Після цього отриманим сумама присвоюється від'ємне значення. Таке формування матриці інтенсивності здійснюється для кожного значення з масиву ХУ.

Крок 4. На основі сформованих масивів значень, для кожного значення з масиву ХУ проводиться розрахунок коефіцієнтів K_i шляхом сумування ймовірностей перебування системи в тих станах, номери яких знаходяться в відповідному масиві. Також шляхом сумування ймовірностей перебування системи в працездатних станах розраховується функція готовності мережі $K(t)$.

Розрахунок відповідних коефіцієнтів K_i здійснюється за наступним принципом. Визначається розмір кожного сформованого масиву значень V_i і присвоюється відповідній константі $SizeV_i$. Змінній Nv по чергово присвоюються значення від 1 до $SizeV_i$. Після цього з матриці стовпця, в якій містяться результати розв'язання системи рівнянь (3.17) вибираються і додаються ті рядки номери яких записані в відповідній матриці V_i .

Крок 5. На основі отриманих значень тривалостей простою РЕСВП, які мають місце при виконанні ремонтною бригадою АВР та розрахованих значень коефіцієнтів K_i згідно формули (3.10) здійснюється розрахунок функції простою, яка впливає на готовність РЕСВП в початкових моментах часу.

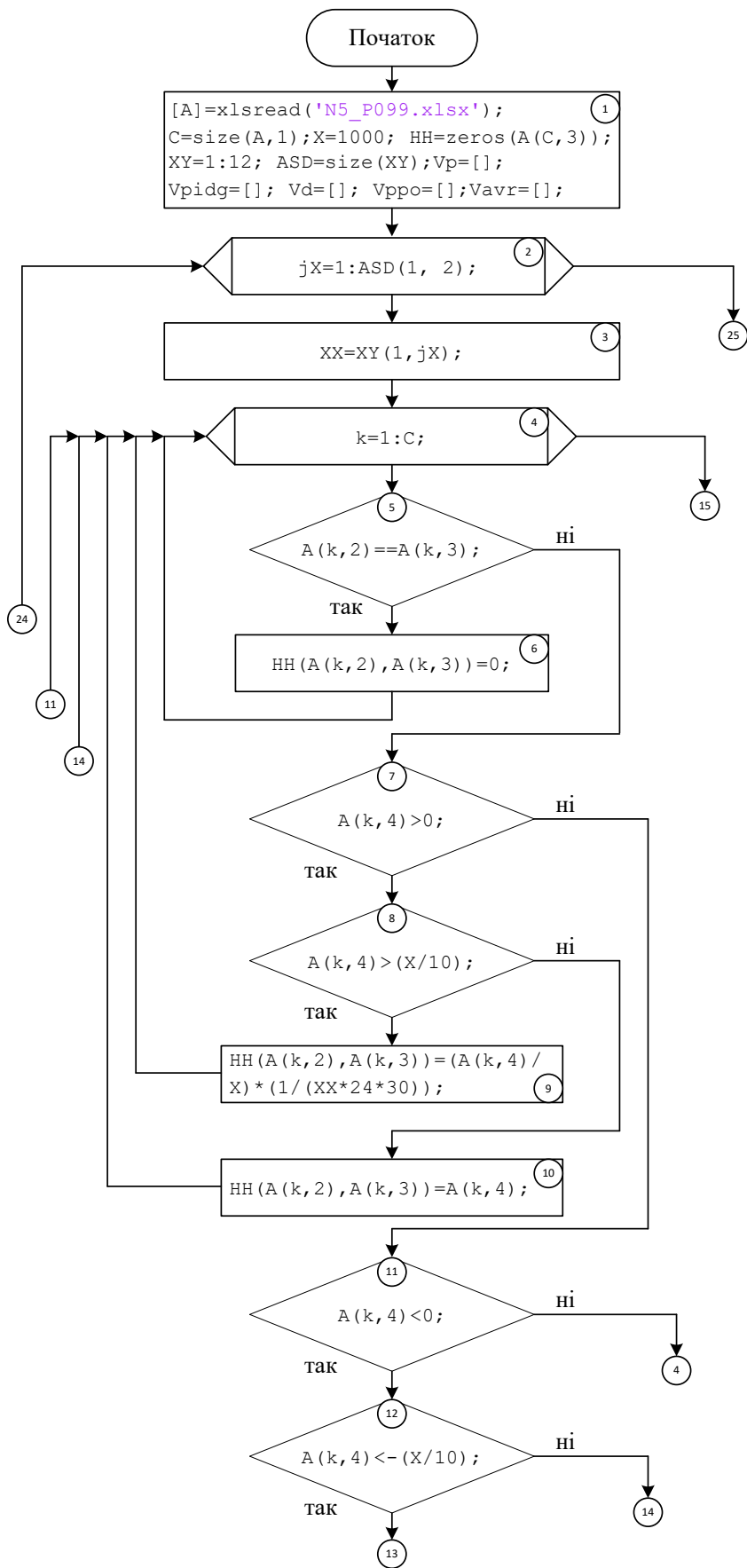


Рис. 3.13. Блок-схема алгоритму автоматизції розв'язання задач синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування

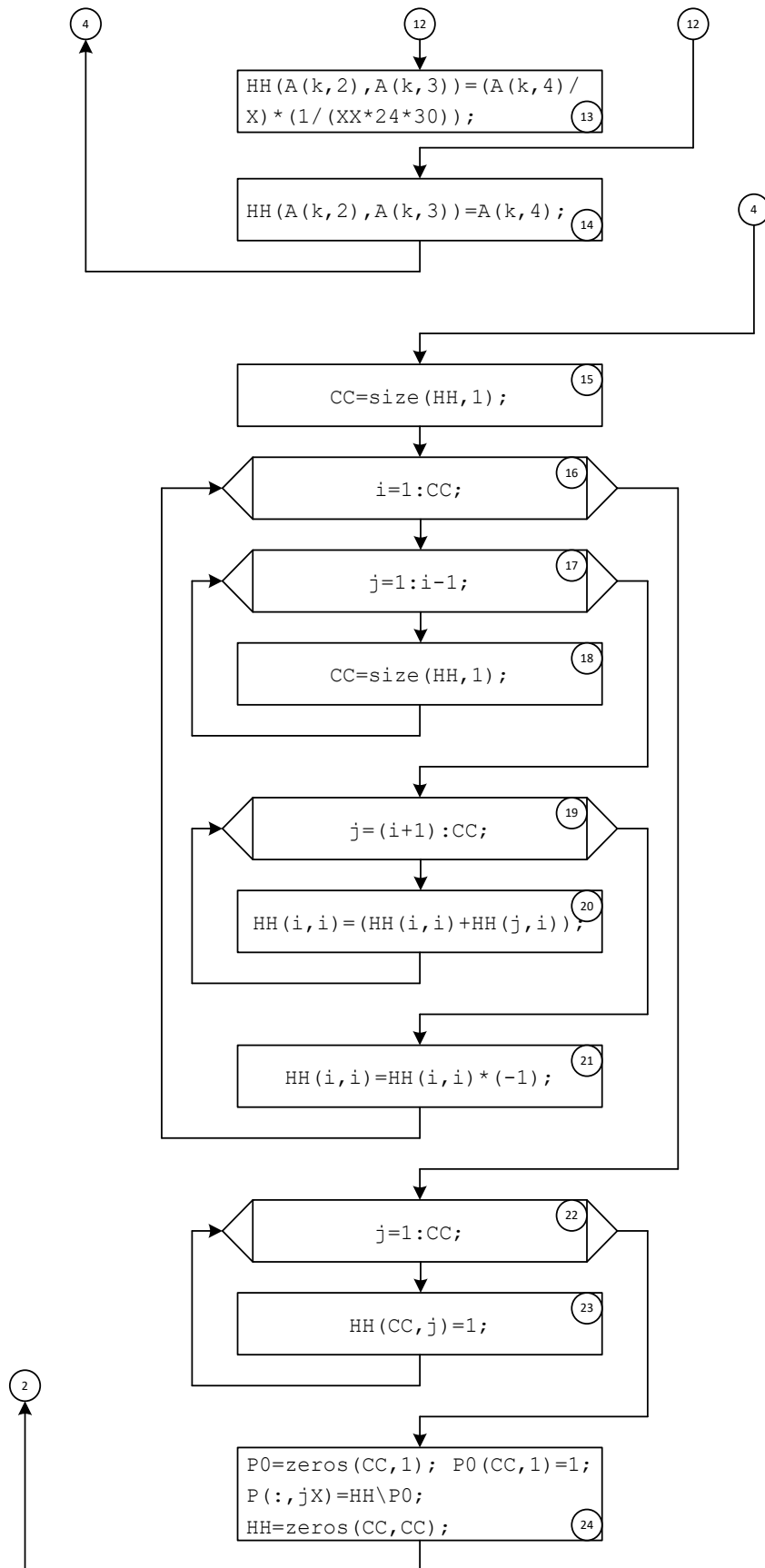


Рис. 3.13. (Продовження). Блок-схема алгоритму синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування

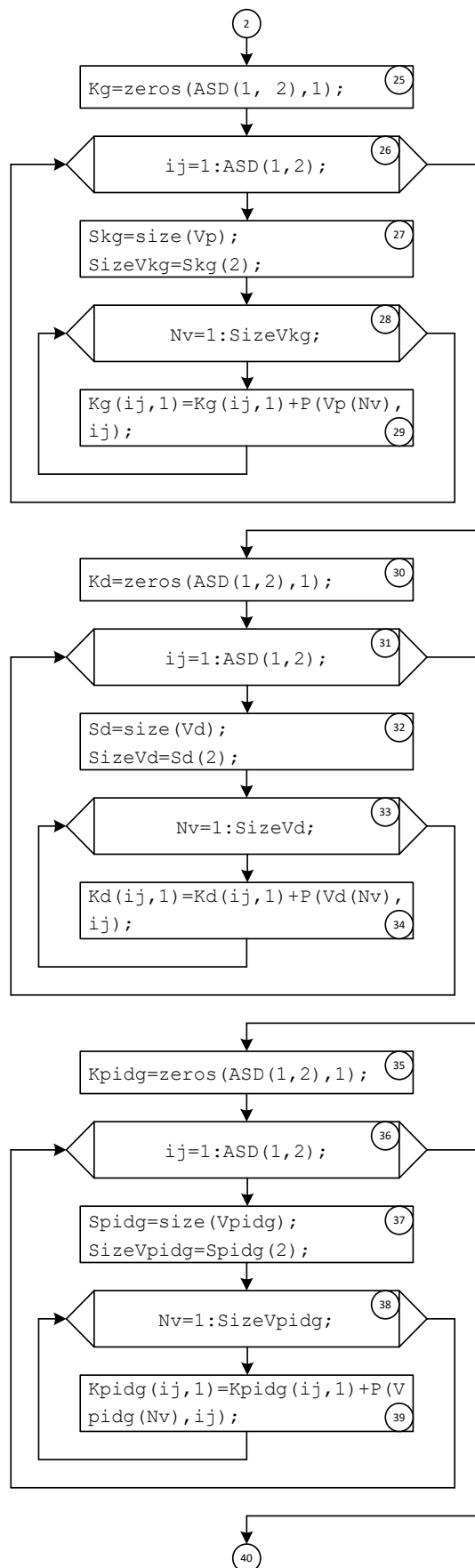


Рис. 3.13. (Продовження). Блок-схема алгоритму синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування

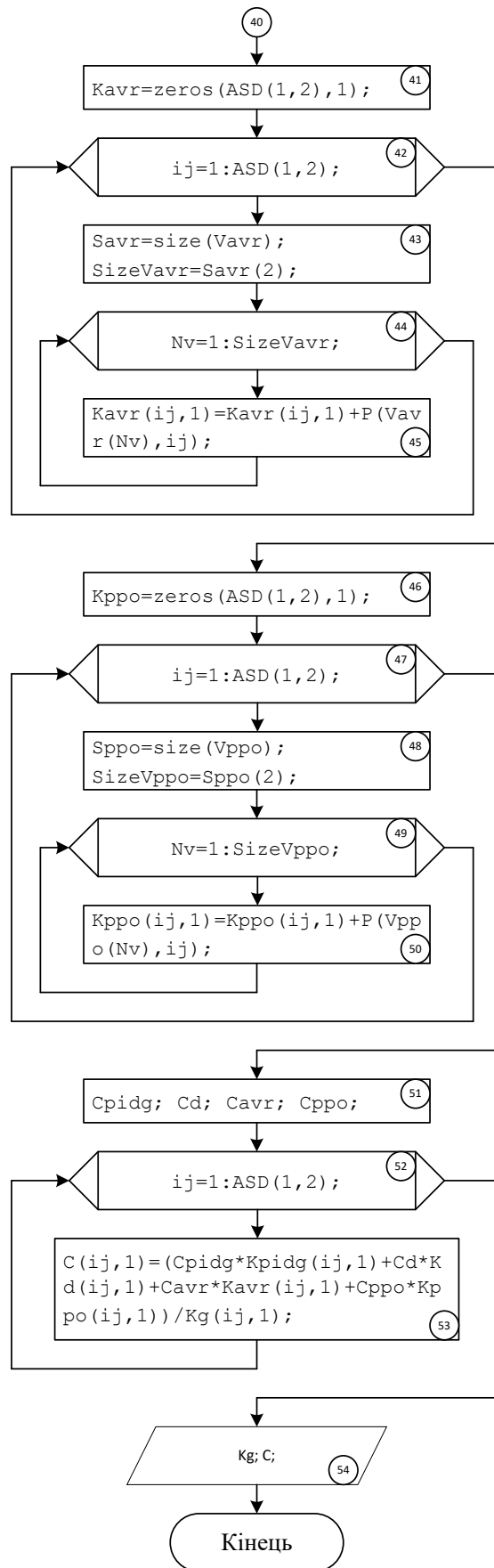


Рис. 3.13. (Закінчення). Блок-схема алгоритму синтезу показників ефективності стратегії технічного обслуговування

ДОДАТОК В. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Заступник начальника Національної академії
сухопутних військ імені гетьмана Петра
Сагайдачного з наукової роботи
доктор історичних наук, доцент



А. СЛЮСАРЕНКО

2020 року

про використання результатів докторської дисертаційної роботи
Озірковського Леоніда Деонісійовича, доцента, к.т.н.,
доцента кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань
Національного університету «Львівська політехніка»

Комісія у складі голови – начальника Наукового центру Сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного д.т.н., полковника Грабчака В.І., членів комісії – провідного наукового співробітника НДВ д.т.н. Ванкевича П.І., провідного наукового співробітника НДВ д.т.н. Зубкова А.М., провідного наукового співробітника НДВ к.т.н. Онищенко В.А. склала дійсний акт про те, що результати дисертаційної роботи Озірковського Леоніда Деонісійовича, поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук використані у науково-дослідних роботах за шифрами «Дрон-СВ» (реєстраційний № 0101U001952) та «Інтерфейс» (реєстраційний № 0118U000048т).

Зокрема Озірковським Л.Д. розроблена методологія проектування безпечних алгоритмів поведінки радіоелектронних систем відповідального призначення. Застосування даної методології дає змогу синтезувати алгоритми функціонування, зокрема безпілотного літального апарата та розвідувально-сигналізаційного комплексу із заданим рівнем безпечності і при цьому не завищувати структурну надлишковість, що для систем відповідального призначення даного класу є критичним. Складовою розробленої методології є методика перевірки достовірності результату моделювання, в основі якої лежить метод схеми шляхів. Використання даної методики забезпечило достовірні результати синтезу на етапі проектування, що дозволило скоротити об'єм натурних випробувань.

Голова комісії:

Начальник Наукового центру Сухопутних
військ Національної академії сухопутних військ
імені гетьмана Петра Сагайдачного
д.т.н., старший науковий співробітник
полковник

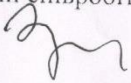
В. ГРАБЧАК

Члени комісії:

Провідний науковий співробітник НДВ
д.т.н., старший науковий співробітник

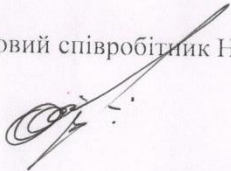
П. ВАНКЕВИЧ

Провідний науковий співробітник НДВ
д.т.н., старший науковий співробітник



А. ЗУБКОВ

Провідний науковий співробітник НДВ
к.т.н.




В. ОНИЩЕНКО



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор приватного підприємства «Поліном-стиль»

 Заяць І. О.

«07» 02 2013 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи

Озірковського Леоніда Деонісійовича

Результати дисертаційної роботи Озірковського Леоніда Деонісійовича, поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, використані у діяльності Приватного підприємства «Поліном-стиль» у рамках розробки декларації безпеки об'єкта підвищеної небезпеки для Товариства із обмеженою відповідальністю «Карпатнафтохім». Зокрема, Озірковським Л.Д. за допомогою засобів автоматизованої побудови розроблена модель об'єкта у вигляді дерева відмов для аналізу рівня надійності і безпечності та модель технічного обслуговування. Показники, визначені за такою моделлю, використані під час розробки регламентів експлуатації та технічного обслуговування щодо зниження ймовірності виникнення аварії на об'єкті підвищеної небезпеки. Зокрема коефіцієнт рівня ризику виникнення аварійної ситуації (RPN) знижено з 96 до 32.

Інженер-проектувальник



Антикало А.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «МС-Зв'язок»

Лимарь Л.В.



2012 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи

Озірковського Леоніда Деонісійовича

Результати дисертаційної роботи Озірковського Леоніда Деонісійовича, поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, використані у діяльності компанії «Київстар» у рамках розробки регламентів на профілактичне та аварійне технічне обслуговування об'єктів телекомунікаційної мережі. Зокрема, Озірковським Л.Д. за допомогою засобів автоматизованої побудови розроблена модель технічного обслуговування, яка дала змогу врахувати неекспоненційні розподіли процедур технічного обслуговування. Показники, визначені за такою моделлю, використані під час розробки регламентів експлуатації та технічного обслуговування об'єктів телекомунікаційної мережі щодо забезпечення заданого рівня якості її функціонування при мінімальних матеріальних затратах. Зокрема дослідження дозволили обґрунтовано збільшити період профілактичного періодичного обслуговування для групи об'єктів телекомунікаційної мережі на 26%.

Головний інженер

Браславець М.Г.



«Затверджую»

Проректор з наукової роботи
Національного університету
Львівська політехніка

д.т.н. І.В. Демидов
07 2020 р.

про використання результатів докторської дисертаційної роботи Озірковського Леоніда Деонісійовича «Розвиток теоретичних засад оцінювання показників функціональної безпеки радіоелектронних систем відповідального призначення».

Комісія у складі

- начальника науково-дослідної частини, к.т.н., Небесного Р.В.,
- завідувача відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н., Лазько Г.В.
- заступника начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М.,
- завідувача кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювання, к.т.н., доц. Кіселичника М.Д.,

склала цей акт про те, що у держбюджетних науково-дослідних роботах ДБ Вербаль (2004 – 2006) «Розробка комп'ютерних моделей відмовостійких радіоелектронних засобів», № держ. реєстрації 0104U002291; ДБ КРОКІТ (2007 – 2009) «Розробка комп'ютерних макромоделей радіоелектронних систем та їх функціональних вузлів, адаптованих до задач надійнісного проєктування», № держреєстрації 0107U000836; ДБ ПНРЛ (2010 – 2012) «Розроблення моделей, методів та алгоритмів для автоматизованої оцінки показників надійності радіоелектронних та електромеханічних пристроїв та систем», № держреєстрації 0110U001098; ДБ Трикаф (2013 – 2014) «Розроблення моделей надійності, ризи-ку та безпеки програмно-апаратних технічних систем», № держреєстрації 0113U001371; ДБ/Ризик (2017 – 2018) «Розробка математичного забезпечення для програмного засобу аналізу функціональної безпеки та надійності програмно-апаратних систем відповідального призначення», № держреєстрації 0117U004458 використані наступні результати дисертаційної роботи Озірковського Леоніда Деонісійовича на тему «Розвиток теоретичних засад оцінювання показників функціональної безпеки радіоелектронних систем відповідального призначення»:

- розроблена методологія синтезу безпечних алгоритмів поведінки радіоелектронних систем відповідального призначення;
- метод визначення функції аварійності на підставі розділення простору непрацездатних станів на непрацездатні безпечні, критичні та катастрофічні;
- методика синтезу відмовостійких радіоелектронних систем мажоритарного типу із заданим рівнем надійності та безпеки;
- методики синтезу стратегій технічного обслуговування із врахуванням прихованих відмов та аварійних ситуацій.

Перелічені засоби (моделі, методи, методики та алгоритми) дають змогу провести синтез відмовостійкої радіоелектронної системи відповідального призначення із мажоритарною структурою, синтезувати безпечний алгоритм її поведінки та розробити стратегію технічного обслуговування.

Члени комісії:

Начальник НДЧ

Небесний Р.В.

Завідувач відділу НОСНД

Лазько Г.В.

Заст. начальника ПФВ

Чулой Т.В.

Завідувач каф. ТРР

Кіселичник М.Д.

«Затверджую»

Проректор з наукової-педагогічної
роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

доц. О.Р. Давидчак
2020 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи Озірковського Леоніда Деонісійовича на тему «Розвиток теоретичних засад оцінювання показників функціональної безпечності радіоелектронних систем відповідального призначення», у навчальному процесі кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань.

Даний акт складений комісією у складі:

- д.т.н., доц. Стрихалюк Б.М., директор Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- к.т.н., доц., Фаст В.М., заступник декана магістратури Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- к.т.н., доц. Кіселичник М.Д., завідувач кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань

про те, що в навчальному процесі кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань використовуються результати дисертаційної роботи Озірковського Л.Д. «Розвиток теоретичних засад оцінювання показників функціональної безпечності радіоелектронних систем відповідального призначення», а саме:

- розроблено новий розділ лекційного курсу «Надійнісне проектування телекомунікаційних систем та мереж», що стосується проведення оцінювання функціональної безпечності ТК систем за допомогою методології FMEA/FMECA, в якій визначаються функції аварійності, для студентів-магістрів спеціальності – 172 Телекомунікації та радіотехніка;
- розроблено цикл лекцій для курсу «Інформаційні системи та мережі», в якому представлено методи аналізу та синтезу стратегій технічного обслуговування ТК систем і мереж, для студентів-бакалаврів спеціальності – 172 Телекомунікації та радіотехніка;
- розроблено цикл лекцій для курсу «Системотехнічне проектування ТК систем і мереж», в якому вивчаються методи синтезу через багатоваріантний аналіз безпечних алгоритмів поведінки ТК систем і мереж, для студентів-магістрів спеціальності – 172 Телекомунікації та радіотехніка;

Члени комісії:

Директор ІТРЕ

Стрихалюк Б.М.

Заст. декана магістратури ІТРЕ

Фаст В.М.

Завідувач кафедри ТРР

Кіселичник М.Д.



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **126099** (13) **U**
(51) МПК (2018.01)
H02J 1/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2017 12061**
(22) Дата подання заявки: **07.12.2017**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **11.06.2018**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **11.06.2018, Бюл.№ 11**

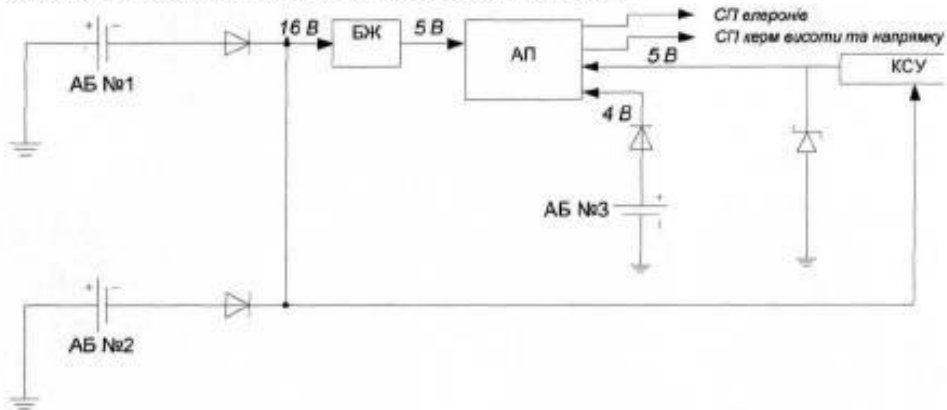
(72) Винахідник(и):
**Пашук Юрій Михайлович (UA),
Корольов Володимир Миколайович (UA),
Озірковський Леонід Деонісович (UA),
Васінович Валерій Юрійович (UA),
Сальник Юрій Павлович (UA)**

(73) Власник(и):
**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ СУХОПУТНИХ
ВІЙСЬК ІМЕНІ ГЕТЬМАНА ПЕТРА
САГАЙДАЧНОГО,
вул. Героїв Майдану, 32, м. Львів, 79012
(UA)**

(54) СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

(57) Реферат:

Система електропостачання малогабаритного безпілотного літального апарата виконана з можливістю забезпечення безперервного електроживлення силової установки та інших бортових систем. В системі використовують дві паралельно з'єднані акумуляторні батареї. Додатково система має аварійну акумуляторну батарею з пониженою напругою 4 В та шину електроживлення авіоплота від контролера силової установки.



UA 126099 U

Корисна модель належить до категорії обладнання літальних апаратів, зокрема до систем електропостачання.

5 Одним із найбільш розповсюджених видів силових установок малогабаритних безпілотних літальних апаратів (БлЛА) є електрична, тому під час польоту таких апаратів для безперерйного електроживлення електричних двигунів та інших важливих бортових систем необхідно забезпечити високий рівень надійності систем електропостачання.

10 До складу типової системи електропостачання, яку встановлюють на малогабаритні БлЛА типу X-UAV Talon EPO 1718mm, входить акумуляторна батарея з робочою напругою 16 В як основне джерело електроенергії. Головним недоліком такої системи є те, що у разі відмови акумуляторної батареї припиняється виконання польотного завдання та існують загрози безпеці польотів.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення надійності системи електропостачання.

15 Поставлена задача вирішується в системі електропостачання малогабаритного безпілотного літального апарата, яка забезпечує гарантоване безперерйне електроживлення силової установки та інших важливих бортових систем, згідно корисної моделі, у її складі замість однієї основної акумуляторної батареї з робочою напругою 16 В використовують дві паралельно з'єднані батареї, а також додатково вводять аварійну акумуляторну батарею з пониженою напругою 4 В та шину електроживлення автопілота від контролера силової установки.

20 Суть корисної моделі пояснюється кресленням, на якому зображено узагальнену електричну схему системи електропостачання малогабаритного безпілотного літального апарата, на якій використано такі позначення:

АБ - акумуляторна батарея;

АП - автопілот;

25 КСУ - контролер силової установки;

БЖ - блок живлення автопілота;

СП - сервопривід.

Відмовостійкість удосконаленої системи електропостачання забезпечують введенням наступної структурної надлишковості:

30 1. однократного роздільного резервування основної акумуляторної батареї з робочою напругою 16 В: замість однієї АБ встановлюють дві паралельно з'єднані батареї (АБ №1 та АБ №2);

2. додаткової батареї АБ №3 з напругою 4 В для живлення найбільш важливих бортових систем, перш за все автопілота, у випадку відмови батарей АБ №1 та АБ №2 з метою 35 забезпечення продовження виконання завдання, повернення БлЛА у визначений район і його безпечної посадки (приземлення);

3. однократного резервування підсистеми електроживлення автопілота, що забезпечують введенням до електросхеми додаткової шини постійного струму від КСУ та стабілітрона для захисту від перенапруги

40 (https://pixhawk.org/users/tutorials/pixhawk_6s_mod).

Удосконалення типової системи електропостачання малогабаритного БлЛА дозволяє:

45 1. при відмові однієї з двох основних акумуляторних батарей забезпечити електроживлення автопілота та контролера силової установки від справної батареї і тим самим - повернення БлЛА у визначений район і його безпечну посадку (приземлення);

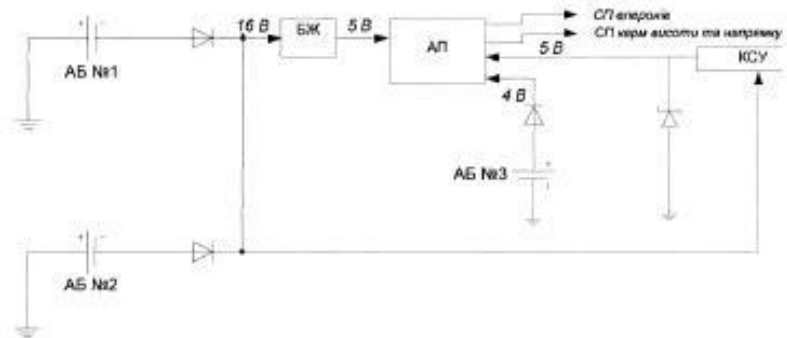
2. у разі відмови двох основних акумуляторних батарей здійснювати електроживлення автопілота від додаткової батареї АБ №3 для безпечної посадки (приземлення) БлЛА;

3. при відмові основної підсистеми електроживлення автопілота забезпечити його електропостачання від контролера силової установки для безпечної посадки (приземлення) безпілотного літального апарата.

50 Упровадження даної корисної моделі дає змогу підвищити надійність малогабаритних безпілотних літальних апаратів, їх безпеку та ефективність застосування.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

55 Система електропостачання малогабаритного безпілотного літального апарата, яка виконана з можливістю забезпечення безперерйного електроживлення силової установки та інших бортових систем, яка **відрізняється** тим, що використовують дві паралельно з'єднані акумуляторні батареї, при цьому додатково вводять аварійну акумуляторну батарею з пониженою напругою 4 В та шину електроживлення автопілота від контролера силової 60 установки.



Комп'ютерна верстка А. Крулевський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

ДОДАТОК Г. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії

1. Ю.Я. Бобало Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем// Монографія / Ю.Я. Бобало, Б.Ю. Волочий, О.Ю. Лозинський, Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський, Д.В. Федасюк, С.В. Щербовських, В.С. Яковина. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. - 300 с. ISBN 978-617-607-468-7
2. Богдан Волочий Проектирования эффективных стратегий технического обслуживания. Математические модели, алгоритмы и методики //Монография/ Богдан Волочий, Леонид Озірковський, Игорь Кулык/ LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2015. – 160 с. ISBN 978-3-659-63366-9

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати

дисертації:

3. Патент на винахід № 126099 Україна, МПК (2006): H02J 1/00. Система електропостачання малогабаритного безпілотного літального апарата / Пащук Ю. М., Корольов В.М., Озірковський Л.Д., Васинович В.Ю., Саль-ник Ю.П. (Україна); заявник – Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. – № u201712061; заявл. 07.12.2017; опубл. 11.06.2018, бюл. № 11/2018.// <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=248043>

Статті у періодичних фахових виданнях:

4. Volochiy B. The New Method of Building a Safety Model for Quantitative Risk Assessment of Complex Technical Systems for Critical Application / B. Volochiy,

- B. Mandziy, L. Ozirkovsky // Communications in Computer and Information Science. – 2016. - Vol. 594. – P. 56-70. (іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN: 1865-0929 (print), SCOPUS)
5. Ozirkovsky L., The Algorithm of Automated Development of Fault Trees for Safety Exploitation Assessment of Complex Technical Systems// L. Ozirkovsky, A. Mashchak, O. Shkiliuk, S. Volochiy/ Central European Researchers Journal, Volume 2, Issue 2, 2016, pp. 1 – 10 (іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN: 2453-7314, Infobase Index, Academic Resource Index)
 6. Volochiy Bohdan Improvement of fidelity of moving objects classification in guard signaling complexes with seismic sensors/Mykhailo Zmysnyi , Leonid Ozirkovsky , Volodymyr Onyschchenko , Yuriy Salnyk//Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 8(4), 2018, pp. 36-39 (іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN: 2391-6761 (Online) DOI: 10.35784, Index Copernicus)
 7. Ozirkovsky Leonid Adequacy Increase of Assessment of Minimal Cut Sets Considering Latent Failures /Leonid Ozirkovsky, Bohdan Volochiy, Andriy Mashchak, Ihor Kulyk/ Central European Researchers Journal, Vol.5 Issue 2, 2019, pp. 58-66 (іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN: 2453-7314, Infobase Index, Academic Resource Index)
 8. Ozirkovsky Leonid Synthesis of safe behavior algorithms of radioelectronic systems for critical applications// Leonid Ozirkovsky, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Oleksandr Shkiliuk/ Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce I Ochronie Środowiska, volume 10 №1, 2020, pp. 28 – 31 (іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN: 2391-6761 (Online) DOI: 10.35784, Index Copernicus)
 9. B. Volochiy The maintenance strategy optimization of base stations of communication cellular network/ B. Volochiy, L. Ozirkovsky, I. Kulyk, M. Zmysnyi //Радіоелектронні і комп'ютерні системи. - 2016. - № 5 (79). – С. 120-129. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN: 2663-2012, РІНЦ, Index Copernicus)

10. Volochiy B. Designing of fault-tolerant radio electronic systems with complex majority structures/ B. Volochiy, L. Ozirkovkyu, M. Zmysnyi, I. Kulyk // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. - 2016. - № 6 (80). – С. 43-53. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN: 2663-2012, РІНЦ, Index Copernicus)
11. Мандзій Б.А. Технологія аналітичного моделювання дискретно-неперевних стохастичних систем на основі блок-схем алгоритмів їх поведінки/ Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Вісник Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. – 2008. - № 621: Інформаційні системи та мережі. – С.171-181 (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)
12. Волочій Б.Ю. Методика побудови дерева відмов складної технічної системи на основі графу станів і переходів / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, А.В. Мащак, О.П. Шкілюк // Вісник академії митної служби України, серія "Технічні науки". – 2014. – №1(51), С. 10 - 19., (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 2310-9645)
13. Волочій Б.Ю. Оцінка ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарату / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Ю.М. Пащук, А.В. Мащак, В.А. Онищенко// Військово-технічний збірник : зб. наук. пр. / Акад. сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного. – 2015. - Вип. 13. - С. 77 - 87. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN: 2312-4458)
14. Волочій Б.Ю. Метод аналізу ефективності алгоритмів поведінки радіоелектронних комплексів відповідального призначення / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Шкілюк О.П, Мащак А.В. // Науково-технічний журнал «Радіоелектронні і комп'ютерні системи». – 2014, №6 (70), С. 130 – 134. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 1814-4225)
15. Волочій Б.Ю. Оцінка надійності програмно-апаратних систем за допомогою моделі їх поведінки / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Чопей Р.С., Мащак А.В., Шкілюк О.П. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2014, № 796, С. 222-231. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

16. Волочій Б.Ю. Порівняння методів оцінки показників ефективності алгоритмів поведінки радіоелектронних комплексів / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2014, – №59, С. 29-39. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 2310-0389)
17. B. Volochiy Technique of Construction Models of Behavior Algorithms of Radio Electronic Complex System using the Scheme of Paths Method / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyi, Oleksandr Shkiliuk, Andriy Mashchak // International Journal of Computing, Vol. 13, Issue 3, 2014, pp. 183-190. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 1727-6209)
18. Мандзій Б. А. Оцінка ефективності комбінованої стратегії технічного обслуговування мережі коміркового зв'язку / Б. А. Мандзій, Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, С. І. Гнатів, І. В. Кулик // Східно-Європейський журнал передових технологій. Інформаційно-керуючі системи. – Том 1, № 9 (61), 2013. – С. 40–44. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, SSN 1729-3774)
19. Мандзій Б. А. Дослідження впливу профілактичного технічного обслуговування на надійність відмовостійкого джерела безперебійного електроживлення / Б. А. Мандзій, Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, Д. С. Кузнєцов, І. В. Кулик // Східно-Європейський журнал передових технологій. Енергозберігаючі технології та обладнання. – Том 1, №8 (61), 2013. – С. 8–12. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, SSN 1729-3774)
20. Волочій Б. Ю. Методика розрахунку мінімальних січень для відмово стійких систем на основі структурно-автоматної моделі / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, А. В. Мащак, О. П. Шкілюк, І. В. Кулик // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ. – 2013. вип.. 52 – С. 38-45. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 2310-0389)
21. Волочій Б.Ю. Надійнісна модель відмовостійкої багатопроекторної систем з відновленням працездатності програмного забезпечення / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.В. Муляк, М.М. Змисний, Т.І. Панський // Вісник НТУУ

- «КПШ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – № 54. – с. 33-43.
(наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 2310-0389)
- 22.Мандзій Б.А. Оцінка економічної ефективності технічного обслуговування та ремонту систем регіональних радіоелектронних комплексів / Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, С.І. Гнатів, Л.Д. Озірковський, І.В. Кулик // Вісник НТУУ «КПШ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – № 54. – с. 160-170. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 2310-0389)
- 23.Волочій Б.Ю. Методика визначення показників надійності відмовостійких програмно-апаратних радіоелектронних систем / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Т.І. Панський, О.В. Муляк // Вісник НТУУ «КПШ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – № 55. – с. 71-79. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 2310-0389)
- 24.Волочій Б.Ю. Надійнісна модель відмовостійкої програмно-апаратної системи на основі мажоритарної структури з ковзним резервуванням та автоматичним перезавантаженням програмного забезпечення / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.В. Муляк, М.М. Змисний // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – №5 (64). – С. 221 – 226. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 1814-4225)
- 25.Волочій Б.Ю. Методика оцінки показників ефективності радіоелектронного комплексу моніторингу повітряного простору / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Шкілюк О.П, Мащак А.В. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2013, № 766, С. 194-203. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)
- 26.Озірковський Л.Д., Модель поведінки програмно-апаратних електронних систем/ Озірковський Л.Д., Панський Т.І.// Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Електроніка. – 2013, № 764, с.36-43 (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)
- 27.Волочій Б.Ю. Визначення впливу оновлення програмного забезпечення на показники надійності відмовостійкої багатопроцесорної системи/ Б.Ю. Волочій, В.-М.В. Міськів, О.В. Муляк, Л.Д. Озірковський // Восточно-

- Европейский журнал передовых технологий. – 2013, № 3/9 (63), с. 55 – 59
(наукове фахове видання, МНБ ICI, SSN 1729-3774)
- 28.Мандзій Б.А. Автоматизація побудови моделей надійності резервованих та відновлюваних складних технічних систем/ Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013, № 2/4 (62), с. 44 – 49 (наукове фахове видання, МНБ ICI, SSN 1729-3774)
- 29.Mandziy Bohdan Analytical Reliability Model of a Redundant Repairable System with Limited Number of Restorations/ Bohdan Mandziy, Leonid Ozirkovsky// Computational Problems Of Electrical Engineering. – 2013 – Vol. 3, No. 2, p. 54-60 (наукове фахове видання, МНБ ICI, ISSN 2224-0977)
- 30.Мандзій Б.А. Порівняльна оцінка надійності трьох конфігурацій відмовостійкої системи з мажоритарною структурою / Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, О.В. Муляк // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2012. – №2. – С. 44 – 50. (наукове фахове видання, МНБ ICI, ISSN 1607-3274)
- 31.Волочій Б.Ю. Оцінка ефективності використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 48. – с. 117-125. (наукове фахове видання, МНБ ICI, ISSN 2310-0389)
- 32.Volochiy Bohdan Extending The Features of Software For Reliability Analysis of Fault-tolerant Systems / Bohdan Volochiy, Bohdan Mandziy, Leonid Ozirkovsky// Computational Problems of Electrical Engineering, Lviv Politechnic National University, 2012. - Volume 2, number 1. - p. 113-121 (наукове фахове видання, МНБ ICI, ISSN 2224-0977)
- 33.Волочій Б.Ю. Метод побудови моделей поведінки складних систем немарковського типу у вигляді графа станів і переходів / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Кулик І.В., // Міжнародний науковий журнал "Комп'ютеринг" Науково-дослідний інститут Інтелектуальних комп'ютерних

- систем. Тернопільський Національний Економічний Університет, том 11, випуск №3. Тернопіль. – 2012.– С. 262-271. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 1727-6209)
- 34.Волочій Б.Ю. Формалізація побудови моделей дискретно-неперервних стохастичних систем з використанням методу фаз Ерланга / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Кулик І.В. // Відбір і обробка інформації. Національна академія наук України. Міжвідомчий збірник наукових праць. Вип. №36 (112). – Львів: 2012. – С. 39-47. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0474-8662)
- 35.Озірковський Л. Д. Оцінка показників надійності та безпечності інформаційно-керуючої системи RTP 3000 з використанням RAM Commander / Л. Д. Озірковський, Т. І. Панський, О. В. Сидорчук, І. В. Кулик // Східно-Європейський журнал передових технологій. Радіотехнічні інформаційні засоби. – Том 6, № 11(60), 2012. – С. 37–40. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, SSN 1729-3774)
- 36.Волочій Б.Ю. Марковська модель як засіб комплексного моделювання інформаційних систем з функціональним резервуванням/ Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Улибін Д.О. // Вісник Нац. ун-ту „Львівська політехніка” №470. Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. - Львів. – Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2003. – с. 101-109 (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)
- 37.Мандзій Б.А., Визначення параметрів стратегії аварійного відновлення для відмовостійких систем на основі мажоритарної структури/ Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, І.В. Кулик // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2011. –№705. – С. 216–224. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN: ISSN 0321-0499)
- 38.Волочій Б.Ю. Моделі відмовостійкої системи з використанням трьох мажоритарних структур, вкладених у мажоритарну структуру, для розв’язання задач надійнісного проектування/ Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Змисний М.М., Муляк О.В. // Вісник НУ «Львівська політехніка».

- Радіотехніка та телекомунікації. – 2012. – №738. – С. 223–230. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)
- 39.Озірковський Л.Д. Оцінка імовірності простою резервованих систем з технічним обслуговуванням / Л.Д. Озірковський, Т.І. Панський, О.В. Сидорчук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 49. – с. 151-156. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 2310-0389)
- 40.Волочій Б.Ю. Удосконалення технології моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем з використанням методу фаз Ерланга / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, І.В. Кулик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 48. – с. 159-167. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 2310-0389)
- 41.Волочій Б.Ю. Модель цифрової системи комутації вузла телекомунікаційної мережі / Волочій Б.Ю., Матічин О.В., Озірковський Л.Д., Стецюк С.О., Улибін Д.О. // Вісник Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, № 508, Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів. – Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2004. – С. 144 - 152 (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN: ISSN 0321-0499)
- 42.Мандзій Б.А. Програмні моделі для інтерактивного проектування відмовостійких систем з комбінованим структурним резервуванням/ Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Міжнар. наук.-техн. ж-л “Комп’ютинг”. - 2008. - Т.7. - Вип.1. – С.153-160 (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 1727-6209)
- 43.Мандзій Б. А. Моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем у задачах дослідження їх відмово стійкості/ Мандзій Б. А., Волочій Б. Ю., Озірковський Л. Д. // Міжвідомчий збірник наукових праць “Відбір і обробка інформації”. - Львів: Вид-во ФМІ НАНУ.- 2008, вип. 28, - с. 39-47 с. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0474-8662)
- 44.Мандзій Б.А. Методи оцінювання структурної живучості ієрархічних інформаційних мереж регіональних радіоелектронних комплексів/ Мандзій

Б.А., Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Міжвідомчий збірник наукових праць “Відбір і обробка інформації”. - Львів: Вид-во ФМІ НАНУ.- 2009, вип. 30, - с. 104-112 (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0474-8662)

45.Волочій, Л.Д. Моделі для надійнісного проектування вузла пам'яті сервера та джерела безперебійного живлення/ Волочій, Л.Д. Озірковський, О.В. Муляк, В.Д. Гила // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2011. –№680. – С. 206–216. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

46.Leonid Ozirkovskyu Increasement of Functional Safety of the Behavior Algorithms of Radio Electronic Safety-Critical Systems Leonid Ozirkovskyu, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Oleksandr Shkiliuk/ Proceedings 15 th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020, Lviv-Slavsko, Ukrain, February 25 – 29, 2020 (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)

47.Leonid Ozirkovskyu Methodology of Defining the Accident Rate Function for Fault Tolerant System with High Responsibility Purpose// Leonid Ozirkovskyu, Bohdan Volochiy, Mykhailo Zmysnyi, Andriy Maschak/ Proceedings of 15th International Conference ICTERI-2019, 5th International Workshop on Theory of Reliability and Markov Modeling for Information Technologies (TheRMIT 2019), Kherson, Ukraine, June 12-15, 2019, pp. 778-793 (Scopus) (очна участь із доповіддю)

48.Озірковський Л.Д. Методика синтезу безпечних алгоритмів поведінки радіоелектронних систем відповідального призначення// Озірковський Л.Д., Волочій Б.Ю., Змисний М.М., Шкілюк О.П./ Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції, 8 – 10 листопада 2019. – Чернівці: «Місто», 2019. – С. 60 – 61. (очна участь із доповіддю)

49. Ozirkovsky, L., Analysis of the maintenance strategy effectiveness based on the reliability/cost ratio / Ozirkovsky, L., Kulyk, I., Mazur, A., Petryshyn, N., Malynovska, Y. // Proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018 (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
50. Volochiy, B. Research of efficiency indexes of radio telemetry system with short-term use / B. Volochiy, L. Ozirkovsky, O. Shkiliuk, V.-M. Miskiv // Proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018 – (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
51. Volochiy, B. Method of developing unified model for estimating safety and reliability of complex systems for critical application / B. Volochiy, L. Ozirkovsky // Proceedings 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018 (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
52. Volochiy, B. The scheme of paths method based technique for evaluating of the behavior algorithms efficiency / B. Volochiy, L. Ozirkovsky, O. Shkiliuk, V. Kharchenko // Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018 (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
53. Ozirkovsky L. The Automation of the Exploitation Risks Assessment of the Navigation Information System of Air Drones / L. Ozirkovsky, Yu. Pashchuk, A. Mashchak, S. Volochiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science: proc. of the XIIIth Intern. Conf. TCSET'2016, Lviv-Slavsko, Ukrain, February 23 – 26, 2016. – P. 140-144. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
54. Volochiy Bohdan Automation of Quantitative Requirements Determination to Software Reliability of Safety Critical NPP I&C Systems [Electronic source] / Bohdan Volochiy, (Oleksandr Mulyak), Leonid Ozirkovskyi, Vyacheslav Kharchenko // Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic

- Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management, SMRLO 2016, 15 – 18 February 2016, Israel, Beer Sheva. - IEEE, 2016. – P. 337 – 346. (SCOPUS) (заочна участь, доповідь співавтора)
55. Volochiy B. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method [Electronic source] / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyi, (Oleksandr Mulyak, **Sergiy Volochiy) // Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management, SMRLO 2016, 15 – 18 February, 2016, Israel, Beer Sheva. - IEEE, 2016. – P. 347 - 356. (SCOPUS) (заочна участь, доповідь співавтора)
56. Volochiy, B. Automation of Building the Safety Models of Complex Technical Systems for Critical Application / B. Volochiy, B. Mandziy, L. Ozirkovsky // ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer: proc. of the 11th Intern. Conf. ICTERI 2015, Lviv, Ukraine, May 14-16, 2015. - Lviv, 2015. - P. 550-565. - CEUR-WS.org, online (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
57. Volochiy B. Minimal Cut Sets Determination for Renewable Systems with Limited Repairs / B. Volochiy, L. Ozirkovsky, A. Mashchak, O. Shkiliuk // Матеріали 12-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії TCSET-2014», Львів - Славсько, 2014. – С. 216-218. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
58. Волочій Б.Ю. Отримання мінімальних січень, котрі призводять до втрати працездатності телекомунікаційної системи / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д, Мащак А.В., Шкілюк О.П. // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій СПТЕЛ-2013», Львів, – 2013. – С. 263-266. (очна участь із доповіддю)
59. Bobalo Y. Reliability Analysis of Technical Systems without Redundancy with Limited Number of Repairs / Yuriy Bobalo, Bohdan Mandziy, Bohdan Volochiy, Leonid Osirkovsky // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій,

- комп'ютерної інженерії: матеріали XI Міжнар. конф. TCSET'2012, 21 – 24 лют. 2012, Львів-Славське, Україна / Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2012. – С. 83 – 84. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
60. Мандзий Б. А. Определение параметров стратегии аварийного восстановления для отказоустойчивых систем на основе мажоритарной структуры / Б. А. Мандзий, Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озирковский, М. М. Змысний, И. В. Кулык // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Под ред. Н.К. Юркова. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, Россия, 2011, Т.2. – С. 52–57. (заочно-дистанційна участь із доповіддю)
61. Волочий Б.Ю. Розрахунок мінімальних січень для відмовостійких систем на основі структурно-автоматної моделі / Волочий Б.Ю., Озирковський Л.Д., Мащак А.В., Шкілюк О.П., Кулик І.В. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи РТПСАС-2013», Київ, – 2013. – С. 160-161. (очна участь із доповіддю)
62. Волочий Б.Ю. Оцінка ефективності використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури / Б.Ю. Волочий, Л.Д. Озирковський, М.М. Змысний // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта): матеріали конференції. – Київ. – 2012. – С. 39–40. (очна участь із доповіддю)
63. Мандзий Б.А. Отказоустойчивая система с адаптивной мажоритарной структурой / Б.А. Мандзий, Б.Ю. Волочий, Л.Д. Озирковский, М.М. Змысний // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». Под ред. Н.К. Юркова. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, Россия. – 2012, Т.1. – С. 351–353. (заочно-дистанційна участь із доповіддю)
64. Volochiy B. Models of Fault-Tolerant Systems with Reconfiguration of the Core of Structure of «K of N» / B. Volochiy, L. Ozirkovsky, M. Zmysnyi // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: proceedings of the XI-th. International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavsko,

- Ukraine.: Publishing National University «Lviv Politechnic». – 2012. – pp. 89 – 90. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
65. Volochiy B. Estimation of Indexes of Efficiency of Radioelectronic Hardware-Software Systems Based on the Algorithm of Behavior /B. Volochiy, L. Ozirkovskyu, O. Shkiliuk, A. Mashchak // Матеріали 11-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії TCSET-2012», Львів - Славсько, 2012. – С. 322-323. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
66. Волочій Б. Ю. Розробка надійніших моделей відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, М. М. Змисний, І. В. Кулик // V міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування СПРТП-2011.: Вінниця. – 2011. – С. 51–52. (очна участь із доповіддю)
67. Мандзій Б.А. Визначення ефективності стратегії технічного обслуговування керуючої системи з мажоритарною структурою/ Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, І.В. Кулик //Матеріали XVIII Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика - 2011», 28-30 вересня 2011 р, Львів. – с. 154-155 (очна участь із доповіддю)
68. Mandzija B. Kompleksowe modelowanie systemu informatycznego z rezerwowaniem funkcjonalnym/ Mandzija B., Woloczija B., Ozirkowskij L., Ulybin D. //Prace II Krajowego Sympozjum „Modelowanie i symulacja komputerowa w technice” MiS'2003, Lodz, 2003. – pp. 133 – 136. (заочна участь, виступ співавтора із доповіддю)
69. Мандзій Б.А. Концепция программного модуля для моделирования структуры и поведения информационных систем/ Мандзій Б.А., Волочій Б.Ю., Матичин А., Озірковський Л.Д. //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», Пенза, 2006. – с.13-15 (заочно-дистанційна участь)
70. Volochiy B. Designing of Fault-Tolerant Radioelectronic Systems with Majority Structure/ Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyu, Mykhailo Zmysnyi, Ihor Kulyk

// Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2010 , February 23 – 27, 2010, Lviv–Slavsko, Ukraine. – pp. 35 – 39 (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)

71. Волочій, Б.Ю. Підвищення достовірності класифікації рухомих об'єктів в охоронних системах на сейсмічних датчиках / Б.Ю. Волочій, М.М. Змисний, Л.Д. Озірковський, В.А. Онищенко, Ю.П. Сальник // Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції, 8 – 10 листопада 2018. – Чернівці: «Місто», 2018. – С. 60 – 61. (очна участь із доповіддю)
72. Волочій, Б.Ю. Оцінка безпечності та надійності складних систем відповідального призначення на основі єдиної моделі у вигляді графа станів без побудови дерева відмов / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський // Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях: Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції (I Міжнародний симпозиум). – Чернівці: «Місто», 2017. – С. 15 – 16. (очна участь із доповіддю)
73. Волочій, Б.Ю. Синтез відмовостійкої інформаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарату з урахуванням ризику її експлуатації / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, І.Н. Прудіус, М.В. Міськів // The Second Int. IEEE Conference UkrMiCo'2017 on Information and Telecommunication Technologies: 12 – 15 September 12-15, 2017. (очна участь із доповіддю)
74. Волочій Б.Ю. Порівняння методів оцінки показників ефективності алгоритмів поведінки радіоелектронних комплексів / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д, Шкілюк О.П., Машак А.В. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи РТПСАС-2014», Київ, – 2014. – С. 189-191. (очна участь із доповіддю)
75. Волочій Б.Ю. Автоматизація побудови дерева відмов для оцінки надійності та безпечності відмовостійких систем з відновленням / Волочій Б.Ю.,

- Озірковський Л.Д., Мащак А.В., Шкілюк О.П. // Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», Запоріжжя, – 2014, – С. 268-269. (очна участь із доповіддю)
76. Волочій Б.Ю. Алгоритм автоматизованої побудови дерева відмов для оцінки безпечності експлуатації телекомунікаційних систем / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Мащак А.В., Шкілюк О.П. // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій СПТЕЛ-2014», Львів, – 2014. – С. 88-91. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
77. Волочій Б.Ю. Автоматизація побудови дерева відмов для оцінки безпечності експлуатації складних технічних систем / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Мащак А.В., Шкілюк О.П. // Тези IV Міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки PREDT-2014», Чернівці, – 2014. – С. 102-103. (очна участь із доповіддю)
78. Мандзій Б. А. Математична модель для оцінки економічної ефективності технічного обслуговування та ремонту систем регіональних радіоелектронних комплексів / Б. А. Мандзій, Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, С. І. Гнатів, І. В. Кулик // Міжнародна науково-технічна конференція "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта): матеріали конференції – Київ. – 2013. – С. 43–44. (очна участь із доповіддю)
79. Волочій Б. Ю. Удосконалення технології моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем з використанням методу фаз Ерланга / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, І. В. Кулик // Міжнародна науково-технічна конференція "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта): матеріали конференції – Київ. – 2012. – С. 37–38. (очна участь із доповіддю)
80. Волочій Б. Ю. Моделювання процесу технічного обслуговування мереж

- коміркового зв'язку / Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озірковський, І. В. Кулик // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2012: Науково-методична конференція, Львів. – 2012. – С. 48–50. (очна участь із доповіддю)
- 81.Мандзій Б. А. Визначення вимог до технічного обслуговування джерел безперебійного електроживлення телекомунікаційних систем / Б. А. Мандзій, Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озірковський, Д. С. Кузнецов, І. В. Кулик, Л. Д. Озірковський // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції, Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – С. 90–92. (очна участь із доповіддю)
- 82.Мандзій Б. А. Оцінка ефективності комбінованої стратегії технічного обслуговування мережі коміркового зв'язку / Б. А. Мандзій, Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озірковський, С. І. Гнатів, І. В. Кулик // 2-га міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки», Чернівці. – 2012. – С. 28–29. (очна участь із доповіддю)
- 83.Мандзий Б. А. Автоматизация построения моделей поведения систем немарковского типа с использованием метода фаз Эрланга / Б. А. Мандзий, Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озирковский, И. В. Кулик // Труды международного симпозиума “Надежность и качество”. Под ред. Н.К. Юркова. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, Россия. –2012, Т.1. – С. 354–357. (заочно-дистанційна участь із доповіддю)
- 84.Volochiy B. Modelsof Automation of Building of Behavior models of The Non-Markov Discrete-Continuous Stochastic Systems by the Medhodo of Erlang Phases / B.Volochiy, L.Ozirkovskyu, I. Kulyk// Modern problems of radioengineering, telecommunications and computer science: proceedings of the XI-th. International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavsko, Ukraine.: Publishing National University “Lviv Politechnic”. – 2012. – P. 105–106. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
- 85.Volochiy B. Models of Fault-Tolerant Systems with Reconfiguration of the Core

- of Structure of «K of N» / B. Volochiy, L. Ozirkovsky, M. Zmysnyi // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: proceedings of the XI-th. International Conference TCSET'2012, Lviv-Slavsko, Ukraine.: Publishing National University «Lviv Politechnic». – 2012. – P. 89-90. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
86. Ozirkovsky L., Models for estimation downtime of a systems with redundancy and maintenance/ Ozirkovsky L., Panskyi, T., Sydoruk, A. // Матеріали 11-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії TCSET-2012», Львів - Славсько, 2012. – С. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
87. Мандзій Б.А. Моделі для порівняння трьох конфігурацій відмовостійкої системи з мажоритарною структурою / Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, О.В. Муляк // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції, Запоріжжя: ЗНТУ. – 2012. – С. 88–90. (очна участь із доповіддю)
88. Озірковський Л.Д. Оцінка показників надійності та безпечності інформаційно-керуючої системи відповідального призначення RTP 3000 за допомогою RAM COMMANDER / Озірковський Д.Д., Панський Т.І., Сидорчук О.В. // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки: матеріали II Міжнарод. наук.-практ. конф., 25-27 жовтня 2012 р., Чернівці, Україна. - С. 122. (очна участь із доповіддю)
89. Озірковський Л.Д. Оцінка імовірності простою резервованих систем з технічним обслуговуванням / Озірковський Л.Д., Панський Т.І., Сидорчук О.В. // Міжнарод. наук.-техн. конф. «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта)»: матеріали конф., 22 – 29 лютого 2012 р., Київ. – Київ, 2012. – С. 71-72. (очна участь із доповіддю)
90. Волочій Б.Ю Розробка моделі питомих витрат на технічне обслуговування систем радіоелектронного комплексу / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, С.І.

Гнатів, І.В. Кулик // Проблеми та перспективи розвитку економіки і підприємництва та комп'ютерних технологій в Україні: збірник матеріалів ІХ науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників та студентів, 15-20 квітня 2013 р. / Інститут підприємництва та перспективних технологій Національного університету «Львівська політехніка». – Львів: Видавничий відділ Навчально-наукового інституту підприємництва та перспективних технологій Національного університету «Львівська політехніка», Т. 1. – 2013. – С. 41–45. (очна участь із доповіддю)

91. Волочій Б. Ю. Надійнісна модель відмовостійкої багатопроцесорної системи з відновленням працездатності програмного забезпечення / Б. Ю. Волочій, О. В. Муляк, Л. Д. Озірковський, М. М. Змисний, Т. І. Панський // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи». Київ, 11–15 березня 2013 р.: матеріали конференції. – 2013. – С. 144–145. (очна участь із доповіддю)

92. Озірковський Л.Д. Розробка методики побудови марковської моделі алгоритму поведінки програмно-апаратної системи / Озірковський Л.Д., Шкілюк О.П., Мащак А.В. // Матеріали 9-ої науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників «Проблеми та перспективи розвитку економіки і підприємництва та комп'ютерних технологій в Україні», Львів, – 2013. – С. 499-503. (очна участь із доповіддю)

93. Волочій Б.Ю. Формалізоване представлення алгоритму поведінки радіоелектронної структурно-алгоритмічної системи / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Шкілюк О.П., Мащак А.В. // Тези ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки PREDT-2013», Чернівці, – 2013. – С. 36-37. (очна участь із доповіддю)

94. Volochiy B. Defining Minimal Cut Sets Based On Markov Model / Volochiy B.Yu., Ozirkovskyi L.D., Mashchak A.V., Shkiliuk O.P. // Матеріали 6-ої Міжнародної конференції молодих вчених «Computer Science & Engineering

- CSE-2013» в рамках 4-го міжнародного фестивалю науки «LITTERIS ET ARTIBUS», Львів, – 2013. – С. 90-91. (очна участь із доповіддю)
95. Volochiy B. Technical Efficiency Maintenance of the Fault-Tolerant System/ Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyu, Oleksandr Mulyak, Ihor Kulyk //The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2011) XIth International Conference CADSM 2011 – P. 10, Lviv-Polyana, 2011. (очна участь із доповіддю)
96. Volochiy B. Reliability designing of hardware and software systems based on majority structure / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyu, Mykhailo Zmysnyi, Ihor Kulyk //The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2011) XIth International Conference CADSM 2011 – P. 11. , Lviv-Polyana, 2011. (очна участь із доповіддю)
97. Мандзій Б.А. Дослідження граничних варіантів стратегії технічного обслуговування телекомунікаційних систем зі сталим резервуванням/ Б.А. Мандзій, Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, М.М. Змисний, І.В. Кулик //Матеріали науково-методичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2011», 27-30 жовтня 2011 р, Львів. –с. 6 – 8 (очна участь із доповіддю)
98. Volochiy B. The software for the analysis of reliability of fault-tolerant radio-electronic systems/ Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyu, Phillip Klochko // Uradzenia I systemy radioelektroniczne UiSR'09, III Konferencja naukowa, Sochewka 23-25 wresnia, 2009, Polska. (очна участь із доповіддю)
99. Volochiy B. Models Of The Fault-Tolerant Systems, Build From The Same Type Of Modules With Sliding And General Redundancy/ Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyu, Oleksandr Mulyak, Vasyl Gyla // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2010 , February 23-27 2010, Lviv-Slavsko, Ukraine. - P.24(очна участь із доповіддю)
100. Volochiy B. Designing of Fault-Tolerant Radioelectronic Systems with Majority Structure/ Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyu, Mykhailo Zmysnyi, Ihor Kulyk

- // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2010 , February 23-27 2010, Lviv-Slavsko, Ukraine. - P.35 (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
- 101.Ozirkovsky L. Design of Model of Optical Circles of Telecommunications Network/ L. Ozirkovsky, O. Mulyak, M. Zmysnyi // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2008 , February 19-23 2008, Lviv-Slavsko, Ukraine. - P.483-484 (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
- 102.Mandziy B. Research of Strategies of Maintenance of Fault-Tolerant System with Majority Structure and Sliding Redundancy of its Modules /. Mandziy, B. Volochiy, L. Ozirkovsky // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2008 , February 19-23 2008, Lviv-Slavsko, Ukraine. - P.516-517 (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
- 103.Ozirkovsky L. Research of the Indexes of Reliability of Telecommunications System with Including of Control Means, Diagnostics and Maintenance Works/ L.Ozirkovsky, I. Kulyk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2008 , February 19-23 2008, Lviv-Slavsko, Ukraine. - P.541(SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
- 104.Мандзій Б.А. Метод формализованного описания дискретно-непрерывных стохастических систем для автоматизации их анализа/ Мандзій Б.А., Волочий Б.Ю., Озірковський Л.Д. // Надежность и качество: Труды международного симпозиума . – Россия, Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. – С. 22-30 (заочно-дистанційна участь із доповіддю)
- 105.Мандзій Б.А. Новые возможности для исследования эффективности стратегий технического обслуживания отказоустойчивых систем с комбинированным резервированием/ Мандзій Б.А., Волочий Б.Ю., Озірковський Л.Д. //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», Пенза, 2007. – с.18-27 (заочно-дистанційна участь із доповіддю)

106. Volochiy B. Specialized Module for Forming the program Models of Behavior Algorithms of Information System/ Bohdan Volochiy, Oleksandr Matichyn, Leonid Ozirkovsky // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції TCSET 2006 „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії”, Львів. – Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2006. – С. 181 – 182. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
107. Volochiy B. Modeling of Fault-Tolerant System with Mixed Structural Redundance on the Basis of Iterative Principle of construction/Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovsky, Andriy Makhovsky // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції TCSET 2006 „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії”, Львів. – Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2006. – С. 189 – 190. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
108. Озирковский Л. Моделирование поведения отказоустойчивых систем с итерационным принципом построения // Материалы международной школы-конференции по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы». – Москва: МИЭТ, 2005 – с. 55 (заочно-дистанційна участь із доповіддю)
109. Volochiy B. Means of analysis of the efficiency of the digital commutation system ES-11 using the LAPD protocol (Засоби аналізу ефективності цифрової системи комутації ЄС-11 при використанні протоколу LAPD)/ Volochiy B., Matichyn O., Ozirkovskiy L., Stetsyuk S., Ulybin D. // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції TCSET 2004 „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії”, Львів. – Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2004. – С. 587 – 591. (SCOPUS) (очна участь із доповіддю)
110. Мандзий Б.А. Модель системы межстанционной сигнализации DSS-1 цифровой системы коммутации ЕС-11/ Мандзий Б.А., Волочий Б.Ю., Матичин А.В., Озирковский Л.Д., Стецюк С.А., Улыбин Д.А. // Надежность и качество. Труды международного симпозиума / Под ред. Н.К. Юркова. –

- Россия, Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – С. 211 – 217 (заочно-дистанційна участь із доповіддю)
111. Volochiy B. Mathematical software for creation of fault-tolerant systems program models/ B.Volochiy, L.Ozirkovskyy, O.Matichin // Proceedings of the VIIIth International Conference CADSM 2005 – P. 372. (очна участь із доповіддю)
112. Озірковський Л.Д. Розробка і дослідження моделі мікропроцесорної системи зі змішаним структурним резервуванням на основі ітеративного принципу побудови // Матеріали міжвузівської науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників.- Львів: Вид-во ІППТ, 2006. – с.212-213. (очна участь із доповіддю)
113. Озірковський Л.Д. Построение математической модели оптического кольца сети передачи для исследования стратегий ее технического обслуживания/ Озірковський Л.Д., Муляк О.В., Змыслин М.М. // Матеріали второй международной научной конференции «Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития», 2-5 октября 2007, Харьков-Туапсе, с.51-52. (очна участь із доповіддю)
114. Волочій Б.Ю. Удосконалення технології аналітичного моделювання систем масового обслуговування/ Волочій Ю.Ю., Озірковський Л.Д. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми інформаційних технологій, економіки і права», 23-24 лютого 2011 р, Чернівці, 2011. – с. 26-27 (очна участь із доповіддю)
115. Озірковський Л.Д. Розробка методики формалізації методу фаз Ерланга при побудові моделей програмно-апаратних систем немарковського типу/ Озірковський Л.Д., Кулик І.В., // Збірник матеріалів VII науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників та студентів «Проблеми та перспективи розвитку економіки і підприємництва та комп'ютерних технологій в Україні», 21-25 березня 2011 р., Львів, - т.1, - с.305-306 (очна участь із доповіддю)
116. Volochiy B. Markovian model as a means of complex modeling of information systems with functional redundancy/ Volochiy B., Ozirkovskiy L., Ulybin D. //

Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції CADSM 2003 „Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці”, Львів. – Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2003. – С. 127 – 128. (очна участь із доповіддю)

117.Мандзий Б.А. Моделирование функционального поведения информационных систем с учетом ненадежности аппаратных средств/ Мандзий Б.А., Волочий Б.Ю., Озирковский Л.Д., Улыбин Д.А. // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество 2003», Пенза, 2003. – С. 29-36 (заочно-дистанційна участь із доповіддю)

118.Ozirkovsky L., Research of influencing of areas of Frenel at the different heights of aeriels/ L. Ozirkovsky, M. Pelishok, V. Pelishok // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2008 , February 19-23 2008, Lviv-Slavsko, Ukraine. - P.360-361(очна участь із доповіддю)