НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Волочій Сергій Богданович

УДК 004.052+ 004.94

ДИСЕРТАЦІЯ

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНОГО СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВІДМОВОСТІЙКИХ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

01.05.03 – математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин і систем
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

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

_____ С.Б. Волочій

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –
Федасюк Дмитро Васильович,
д.т.н., професор

Ідентичність всіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:
Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради

/Р.А. Бунь/

Львів – 2018

АНОТАЦІЯ

Волочій С.Б. Математичне та програмне забезпечення для розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.05.03 – математичне і програмне забезпечення обчислювальних машин і систем (05 – Технічні науки). – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2018.

В дисертаційній роботі розв’язано актуальне наукове завдання розроблення математичного забезпечення, в основу якого покладено структурно-автоматну модель, і створення відповідного програмного засобу для автоматизації процесу розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів та переходів.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану методів, моделей та програмних засобів, призначених для розв’язання задачі надійнісного проектування відмовостійких програмно-технічних комплексів. Для надійнісного проектування складних технічних систем є розповсюдженими програмні комплекси: RELEX, RAM Commander (A.L.D., Ізраїль), PTC Windchill Quality Solutions (PTC, США), ReliaSoft Synthesis Master Suite (ReliaSoft США), Item Toolkit (Item Software, США, Великобританія). В склад цих програмних комплексів входить аналітичний модуль марковського аналізу (Markov Analysis). Цей модуль сприймає об'єкт дослідження у вигляді дискретно-неперервної стохастичної системи, яка має бути представлена графом станів і переходів. Однак розроблення саме графа станів покладається на користувача і представляє собою інтелектуальну задачу, розв'язання якої часто називають "ручним", що вимагає великих затрат часу.

Серед відомих методів є метод розроблення графа станів, в основу якого покладено структурно-автоматну модель (САМ) відмовостійкої системи. Структурно-автоматна модель це формалізоване представлення структури і поведінки об'єкта дослідження. Ступінь формалізації методу дозволив автоматизувати його використання в програмному засобі ASNA. Автоматизована побудова графа станів суттєво зменшує витрати часу на побудову нових графів при зміні параметрів об'єкта дослідження. Отже позитивна сторона методу в тому, що покладені інтелектуальні зусилля на розроблення САМ відмовостійкої системи роблять можливим розв’язання задач її надійнісного проектування з мінімальними затратами часу.

В цьому методі безпомилкову побудову моделей у вигляді графа станів забезпечує САМ об'єкта дослідження. Так як розроблення САМ повністю покладено на розробника, який має мати для цього відповідний рівень підготовки, існує деяка ймовірність внесення ним помилок. Тому актуальною постає задача створення методики, яка забезпечить автоматизоване і безпомилкове розроблення САМ.

Під час розроблення САМ відмовостійких програмно-технічних комплексів треба звернути увагу на те, що в реальності у відмовостійких системах, де використовуються процедури контролю, діагностики і перемикання, ймовірності їх успішного виконання є меншими від одиниці. До цього слід додати, що у відновлюваних відмовостійких програмно-технічних комплексів не кожне відновлення є успішним. І відповідно ймовірність успішного виконання процедури відновлення також є меншою від одиниці. Це означає, що в надійнісних моделях відмовостійких систем має бути враховано альтернативне продовження випадкових процесів після закінчення процедур контролю, діагностики, перемикання і відновлення. Як показали проведені дослідження, не врахування в надійнісних моделях відмовостійких програмно-технічних комплексів цих показників призводить до отримання суттєво завищених значень показників їх надійності.

Після побудови моделі у вигляді графа станів та переходів наступним етапом є складання системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Використання такої системи рівнянь накладає відоме обмеження на адекватність моделі, бо проектант має прийняти умову, що тривалість всіх процедур у відмовостійкого програмно-технічного комплексу є випадковими величинами з експоненційним законом розподілу. Однак реальним тривалостям процедур відповідають закони розподілу відмінні від експоненційного. А для певних процедур їх тривалість є фіксованою. Тому достовірність показників надійності, отриманих на моделях з допущенням про експоненційний закон розподілу для тривалостей всіх процдур, є низькою.

Підхід до вирішення цієї проблеми з використанням закону розподілу Ерланга показано в монографіях, авторами яких є: D.R. Koks, V.L. Smit; L. Klejnrok; D. Kjonig, D. Shtojan; K. Rajnshke, I.A. Ushakov. Суть підходу полягає в тому, що будь-які закони розподілу для випадкових тривалостей, які представляють певні процеси і процедури у відмовостійких системах, можна представити сумою експоненційних законів розподілу. Практично це означає, що при представленні поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів і переходів, стани в яких відбувається одна або декілька процедур з тривалостями, які необхідно представити законом розподілу Ерланга, треба замінити ланцюжками фіктивних станів. Тому такий підхід отримав назву «метод фаз Ерланга».

Як показує огляд наукових публікацій, основним об'єктом практичного використання методу фаз Ерланга є системи масового обслуговування. В надійнісному моделюванні відмовостійких систем цей метод використовується рідко. Це пов'язано з великими розмірностями надійнісних моделей відмовостійких систем у вигляді графа станів і переходів (сотні і тисячі станів). Велика трудомісткість методу фаз Ерланга для трансформації графа станів великої розмірності і висока ймовірність внесення в нього

помилок стримує його практичне використання в процесі розв'язання проектних задач аналізу та синтезу. Тому важливим є створення методики розроблення графа станів з використання методу фаз Ерланга і високим ступенем формалізації, яка має бути придатною для її автоматизації.

У другому розділі запропоновано метод розроблення САМ відмовостійких програмно-технічних комплексів з альтернативними продовженнями випадкових процесів, який забезпечує безпомилкову їх побудову і в якому трудомісткі процедури піддаються автоматизації. Новизна методу розроблення САМ полягає в тому, щоб в першу чергу здійснити розроблення опорного графа станів і переходів. А відтак на основі цього графа станів за допомогою запропонованого методу визначаються компоненти САМ. Компонентами САМ є: базові події; формалізований опис всіх ситуацій, в яких може відбуватися базова подія; формули розрахунку інтенсивностей переходів із стану в стан; правила модифікації компонент вектора стану. Останнім етапом розроблення САМ є її валідація.

В основу метода побудови опорного графа станів і переходів покладено базові події поведінки відмовостійкого програмно-технічного комплексу. Компоненту САМ «базова подія» називаємо подію, яка ініціює зміну стану відмовостійкої системи. Тому базовими вважаються події, які представляють момент закінчення процедури, яке може бути успішним або неуспішним. Наприклад, «закінчення процедури контролю». Відповідно в модель вводиться показник ефективності процедури – ймовірність успішного завершення процедури. До базових подій у відмовостійких програмно-технічних комплексах відносимо подію «втрата працездатності» її складових. Для визначення базових подій необхідно прийняти до уваги всі процеси і процедури, які представлені в алгоритмі поведінки відмовостійкої системи.

Для складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких може відбуватися кожна базова подія, необхідно їх виявити. Для виявлення ситуацій використовується опорний граф станів, який представлено

спеціальною таблицею. З таблиці вибираються всі стани, що утворюються після першої базової події з урахуванням всіх альтернативних продовжень процесу, разом із станами що їм передують. Саме ці попередні стани забезпечують складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких відбувається перша базова подія. Такі дії виконуються для всіх наступних базових подій. Слід зауважити, що після отримання формалізованих описів всіх ситуацій, для компактного представлення САМ необхідно розглянути можливість їх об'єднання. Для кожної ситуації компонуються формули розрахунку інтенсивностей переходів із стану в стан та правила модифікації компонент вектора стану.

В основу методу валідації САМ покладено принцип виявлення розбіжностей між тестовим графом і графом, отриманим на основі САМ. В якості тестового графа використовується опорний граф станів. Виявлення і виправлення помилок в САМ здійснюється після кожного етапу звіряння графів: на першому етапі звіряються вектори станів, на другому – звіряються переходи між станами, на третьому – звіряються значення інтенсивностей переходів. Такий порядок виявлення розбіжностей між графами дозволяє прискорити локалізацію помилок і відповідно зменшити затрати часу на їх пошук і виправлення. У роботі розроблено алгоритм, в якому реалізовано запропонований метод валідації САМ.

Наведено приклад використання запропонованих методів для розроблення структурно-автоматної моделі відмовостійкої системи.

В третьому розділі запропоновано метод модифікації компонент САМ відмовостійких систем для автоматизації використання методу фаз Ерланга в процесі формування графа станів і переходів великої розмірності при використанні одного ланцюжка фіктивних станів. Цей метод покладений в основу методики модифікації САМ. В методиці передбачено використання для представлення тривалостей різних процедур об’єкта дослідження по одному ланцюжку фіктивних станів або кількох паралельно включених

ланцюжків фіктивних станів. Паралельне включення кількох ланцюжків фіктивних станів призначене для об’єктів дослідження, в яких є процедури, тривалість яких в моделі треба представити комбінацією кількох законів розподілу Ерланга різних порядків.

Використання методу фаз Ерланга передбачає попереднє розв’язання задачі визначення параметрів ланцюжків фіктивних станів, а саме кількості фіктивних станів та інтенсивності переходів між фіктивними станами.

Запропонований метод модифікації компонент САМ відкрив шлях до створення методики модифікації САМ для автоматизації використання методу фаз Ерланга в процесі формування графа станів і переходів великої розмірності. Методика представлена на прикладі, де об'єктом моделювання є відмовостійка система з мажоритарною структурою {2 із 3}.

У четвертому розділі подано опис розробленого прототипу програмного засобу для побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей у вигляді графа станів та переходів. У розробленому прототипі реалізовано такі основні можливості:

1) введення вхідних даних (набори базових подій, компонент вектора стану, параметрів, що описують систему);
2) відображення математичних та логічних виразів у форматі “LaTex”;
3) автоматизована побудова опорного графа станів та переходів;
4) автоматична побудова структурно-автоматної моделі на основі опорного графа станів та переходів;
5) конфігурування методу фаз Ерланга для структурно-автоматної моделі;
6) побудова графа станів та переходів за структурно-автоматною моделлю;
7) візуалізація графа станів та переходів.

Для розроблення прототипу програмного засобу було використано такі технології: мову програмування TypeScript, платформу Electron, бібліотеки для формування користувацьких інтерфейсів React, Office UI Fabric, архітектурний шаблон Redux, бібліотеки для роботи з математичними

виразами та їх відображенням MathJS, KaTex.

Програмний засіб використано в розробленні дискретно-неперервних стохастичних моделей об’єктів дослідження для:

– методики синтезу показників ефективності складових комплексу охоронної сигналізації на основі сейсмічних датчиків;

– методики надійнісного синтезу бортової навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарату;

– методики оцінки ризику експлуатації критичних програмно-технічних комплексів.

Автоматизоване розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів з врахуванням ймовірностей альтернативного продовження процесів та реальних законів розподілу для тривалостей процедур і інтервалів часу між сусідніми подіями в потоках подій, зробило можливим підвищити достовірність значень показників надійності і при цьому зменшити витрати часу на розв’язання задач їх надійнісного проектування.

Ключові слова: метод простору станів, відмовостійка система, дискретно-неперервна стохастична модель, метод фаз Ерланга, структурно-автоматна модель.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Федасюк, Д.В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей дискретно-неперервних стохастичних систем [Текст] / Д.В. Федасюк, С.Б. Волочій // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", 2016. – № 6 (80). – С. 24 – 34. (eLIBRARY.RU; Index Copernicus; INSPEC).

2. Федасюк, Д.В. Структурно-автоматна модель відмовостійких

систем для автоматизації використання методу фаз Ерланга [Текст] / Д.В. Федасюк, С.Б. Волочій // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут". – 2016. – № 3 (77). – С. 78 – 92. (eLIBRARY.RU; Index Copernicus; INSPEC).

3. Федасюк, Д.В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з альтернативними продовженнями випадкових процесів після процедур контролю, перемикання і відновлення / Д.В. Федасюк, С.Б. Волочій // Вісник національного університету "Львівська політехніка" № 864. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2017. – Львів, Вид-во НУ «Львівська політехніка». – С. 49 – 62.

4. Волочій, С.Б. Синтез показників ефективності складових комплексу охоронної сигналізації на сейсмічних датчиках [Текст] / С.Б. Волочій, В.А. Онищенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – №1 (245). – С. 178 – 185. (Google Scholar; Index Copernicus; РИНЦ; Polish Scholarly Bibliography)

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, Slovakia. – 2016. – Vol. 2. – Issue 2. – pp. 1 – 10.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Fedasyuk, D. Method of developing the behavior models in form of states diagram for complex information systems [Text] / D. Fedasyuk, S. Volochiy // Computer science and information technologies: Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference CSIT 2015. – Lviv, 2015. – P. 5 – 8. (SCOPUS).

7. Volochiy, B. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method [Electronic sourse] / 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. (SCOPUS). Режим доступу: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7432990.

8. Fedasyuk, D. Method of Developing the Structural-Automaton Models of Fault-Tolerant Systems [Text] / Dmytro Fedasyk, Serhiy Volochiy // Proceedings 14th International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)”, 21 – 25 February 2017, Polyana, Ukraine. – P. 22 – 26. (SCOPUS).

9. Pashchuk, Yu. Reliability Synthesis for UAV Flight Control System / Yuriy Pashchuk, Yuriy Salnyk, Serhiy Volochiy // Proceedings of the 13th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, Kyiv, Ukraine, May 15-18, 2017, p. 569 – 582. (SCOPUS).

10. Ozirkovskyy, L. The Automation of the Exploitation Risks Assessment of the Navigation Information System of Air Drones [Text] / L. Ozirkovskyy, Yu. Pashchuk, A. Mashchak, S. Volochiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XIII International Conference TCSET'2016, Februaru 23 – 26. – Lviv, 2016. – P. 140 – 144. (SCOPUS).

11. Volochiy, S. Formalized Development of the State Transition Graphs Using the Erlang Phase Method / Serhiy Volochiy, Dmytro Fedasyuk, Ratibor Chopey // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: Proceedings of the 9th IEEE International Conference, 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania. – P. 1098 – 1101. (SCOPUS).

12. Яковина, В.С. Програмний модуль для розробки моделей поведінки складних технічних систем [Текст] / В.С. Яковина, С.Б. Волочій // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті (CITEM-

2012) : Матеріали ІІІ-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції, 21 листопада 2012, Львів. – Львів, 2012. – С. 234 – 237.

13. Волочій, С.Б. Методика визначення прийнятних для розробника показників ефективності комплексу охоронної сигналізації [Текст] / С.Б. Волочій, В.А. Онищенко // Proceedings Vth International Scientific Practical Conference “Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems” 3–5 November 2016, Chernivtsi, Ukraine, 2016. – P. 64 – 65.

14. Пащук, Ю.М. Обґрунтування вибору відмовостійких конфігурацій для складових бортового комплексу навігації та управління безпілотного літального апарата [Текст] / Ю.М. Пащук, Ю.П. Сальник, С.Б. Волочій // Тринадцята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: тези доповідей, 12 – 13 квітня 2017 року. – Харків: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2017. – С. 143.

15. Onishchenko, V.A. Structural-automaton Models of the RSC Reaction on the MO Crossing TWO Control Zones with Layouts of Seismic Sensors {2+1} and {1+2} [Text] / V.A. Onishchenko, S.B. Volochiy // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 11 – 12 травня 2017 року). – Львів: НАСВ, 2017. – С. 119 – 120.

ABSTRACT

Volochiy S.B. Software and mathematical support for the development of discrete-continuous stochastic models of behavior of fault-tolerant hardware-software complexes. – Qualification scientific paper, manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences on specialty 01.05.03 – «Mathematical and software support of computer machines and systems». - Lviv Polytechnic National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

This dissertation presents a solution for an actual scientific problem of the development of the software and the mathematical support, based on a structural-automaton model approach, for automating the process of development of discrete-continuous stochastic models of behavior of fault-tolerant hardware-software systems behavior.

The first chapter contains the overview of existing methods, models and software for solving the problem of reliability design of fault-tolerant hardware-software systems. There are following software products for this problem: RELEX, RAM Commander (A.L.D., Israel), PTC Windchill Quality Solutions (PTC, USA), ReliaSoft Synthesis Master Suite (ReliaSoft USA), Item Toolkit (Item Software, USA, Great Britain). All these products include Markov Analysis feature, which takes discrete-continuous stochastic model in form of states diagram as an input. But the problem is that the task of the development of the states diagram is completely manual and requires large amount of time. There is an approach, based on a structural-automaton model (formalized representation of system's structure and behavior) of fault-tolerant system. This approach allows to automate the development of states diagram, which significantly reduces an amount of time, required for developing states diagrams for different sets of input parameters. Therefore, the key benefit of structural-automaton-model-based approach is that the efforts spent on the development of structural-automaton model of fault-tolerant system allows to solve the problem of reliability design with a minimal amount of time.

In structural-automaton model based approach the reliability of the modeling results completely depends on the structural-automaton model of an investigating object. As far as development of structural-automaton model is an analytical task, solving of which requires appropriate skills and knowledge, there is a probability of making an errors in the model. Therefore, there is an actual problem of the development of the approach of automated and error-prune development of the structural-automaton model.

While using structural-automaton model based approach, an engineer needs to keep in mind, that the real-world systems, which incorporates the procedures of controls, diagnostics and switches, probabilities of their successful completion are not equal to “1”. Moreover, in systems with abilities of self-repair, repair of system is not always successful as well. That means, that in the models of reliability of fault-tolerant systems it is necessary to consider an alternate flows of stochastic processes after the procedures of control, diagnostic, switch and repair. As investigations shown, ignoring these probabilities in the models of reliability of fault-tolerant software-hardware system leads to significant overestimation of values of reliability indicators.

After the model in form of states diagram is developed, it is possible to build the Chapman–Kolmogorov equations system. As is well-known, using the Chapman–Kolmogorov equations introduces the limitation of resulting model adequacy, because such approach works correctly only if the durations of all procedures in the investigated fault-tolerant software-hardware system are exponentially distributed random values. And, for the real-world system, such assumptions are wrong. For example, some processes have nearly fixed-time duration. Therefore, the correctness of indicators of reliability, calculated from models, developed on such an assumption, is low.

Monographies of D.R. Koks, V.L. Smit; L. Klejnrok; D. Kjonig, D. Shtojan; K. Rajnshke, I.A. Ushakov describes an approach for solving this problem via Erlang distribution law. This approach is based on the fact that any distribution law, that describes random values of durations of different processes and procedures in fault-tolerant systems can be representes as a sum of exponential distributon laws. Practically, that means that in states diagram that is used to represent the behavior of fault-tolerant software-hardware system, states that incorporate procedures, that need to be represented with Erlang distribution law, need to be replaced with fictional chains of states. This approach is called Erlang phase method.

Scientific papers overview shows that Erlang phase method is mostly used for queueing systems modeling, and rarely for reliability design. The reason for that is the size of models of reliability of fault-tolerant systems in form of states diagrams, can be thousands of states. Because of complexity of transformation of such a large graph with Erlang phase method, it's hard to use it for real projects. Therefore, the problem of the development of an approach of the automated development of the states diagrams with Elrang phase method is important.

The second chapter presents the method of the development of the structural-automaton models of fault-tolerant software-hardware systems with alternative flows of stochastic processes taken into account. This method provides an error-prune development, with automations and automatization of sophisticated procedures. The main idea of the method is the following: engineer needs to develop so called "base graph", from which structural-automaton model expressions can be automatically built. Structural-automaton expressions consists of: list of basic events, list of conditions, under which the particular event may occur, formula expression for the transition intensity, expressions for modification of the components of states. The last stage of structural-automaton model development is its validation.

This method is based on a so-called "basic events" of behavior of fault-tolerant software-hardware system. Basic event – the event, that causes the changes in the state of a fault-tolerant system. In fact, they are the events of completion of the procedure, which can be successful or not, for example "Control Procedure Completion". So, the model will have a parameter of probability of successful procedure completion. To define all the basic events, it is necessary to consider all the processes and procedures, that are parts of the behavior of the system.

For building the expressions of structural-automaton model, it is necessary to detect and define the condition of each basic event occurrence. For the detection of the conditions, base graph is used: for each basic event, it's necessary to select all the states, that are formed after this event (with alternate flows considered) and

all the previous states. Previous states are used for the composition of condition of basic event occurrence. After that, transitions should be grouped by the intensity and the modification expressions.

Structural-automaton model validation method is based on the detection of mismatches between base graph, and the graph, generated from structural-automaton model. The detection and fixing the errors in structural-automaton model is being performed after each graphs matching stage: first stage is for states mismatch detection, second stage – transitions mismatch detection, third stage – transitions intensities mismatch detection. Such order of graph mismatch detection allows to simplify the task of localization of the errors in the structural-automaton model, and, consequently, to reduce the amount of time, required for errors detection and fixing. This dissertation presents an implementation of the method of the validation of the structural-automaton model. Also second chapter contains an example of usage of the presented methods for the development of the structural-automaton model of the fault-tolerant system.

The third chapter presents a method of the modification of the expressions of the structural-automaton model of fault-tolerant systems for automatized usage of Erlang phase method during generation of the states graph. Presented method covers both single and parallel fictional states chain cases. Parallel fictional states chain are used for the procedures, durations of which need to be represented with a combination of multiple Erlang distribution laws.

Usage of Erlang phase method implies that the task of defining the parameters of the fictional states chain is already solved. The parameters of the fictional states chain are the number of states in chain, and the intensity of the transitions between fictional states.

Presented method is illustrated with an example of modeling the fault-tolerant system with majority structure “2 of 3”.

The fourth chapter contains the description of developer software prototype for the development of discrete-continuous stochastic models in form of states

diagram. The developed software contains the following features:

1) Object description input (basic events, state components, investigatable parameters);
2) LaTex representation of mathematical and logical expressions;
3) Automated development of base graph;
4) Automatized development of structural-automaton model;
5) Configuration of Erlang distribution law for processes duration;
6) Automatized development of states diagram, based on a structural-automaton model;
7) States diagram vizualisation

Software prototype was developed using the following technologies: TypeScript programming language, Electron framework, user interface development libraries React, Office Ui Fabric, Redux architectural pattern, libraries for mathematical expressions processing and representation MathJS, KaTex.

Developed software was used for the development of discrete-continuous stochastic models for the following problems:

1) Method of synthesis of the indicators of efficiency of components of intrusion detector, based on seismic accelerometers.
2) Method of synthesis of the reliability design of the monitoring system of an unmanned aerial vehicle.
3) Methods of estimation of the exploitation risks of usage of critical software-hardware systems.

The automated development of the structural-automaton models of fault-tolerant software-hardware systems, with probabilities of alternate flows considered, together with real distribution laws for procedures duration and for itervals between events in events flow, makes it possible to both increase the reliability and the accuracy of the reliability indicators and reduce the amount of time, required for solving the problems or reliability design.

Key words: state space method, fault-tolerant system, discrete-continuous stochastic model, Erlang phase method, structural-automatic model

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

1. Fedasyuk, D.V. Method of the Structural-Automaton Models Development for Discrete-Continuous Stochastic Systems [Text] / D.V. Fedasyuk, S.B. Volochiy // Radioelectronic and Computer Systems. – Kharkov: National aerospace university „Kharkov Aviation Institute", 2016. – № 6 (80). – P. 24 – 34. (eLIBRARY.RU; Index Copernicus; INSPEC).

2. Fedasyuk, D.V. Structural-Automaton Model of Fault-Tolerant Systems for Automated Usage of Erlang Distribution [Text] / D.V. Fedasyuk, S.B. Volochiy // Radioelectronic and Computer Systems. – Kharkov: National aerospace university „Kharkov Aviation Institute", 2016. – № 3 (77). – P. 78 – 92. (eLIBRARY.RU; Index Copernicus; INSPEC).

3. Fedasyuk, D.V. Methods of designing structural-automaton models of fault-tolerant systems with alternative continuation of random processes after control, switching and recovery procedures [Text] / D.V. Fedasyuk, S.B. Volochiy // The Bulletin of Lviv Polytechnic National University № 864. Computer sciences and information technologies. – 2017. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic. – P. 49 – 62.

4. Volochiy, S.B. Synthesis of Measures of Efficiency of Components of Security Alarm System, Based on Seismic Sensors [Text] / S.B. Volochiy, V.A. Onishchenko // Scientific journal Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences. – 2017. – Issue 1, Volume 245. – P. 178 – 185. (Google Scholar; Index Copernicus; РИНЦ; Polish Scholarly Bibliography)

5. Ozirkovskyy L. The Algorithm of Automated Development of Fault Trees for Safety Exploitation Assessment of Complex Technical Systems [Text] / L. Ozirkovskyy, A. Mashchak, O. Shkiliuk, S. Volochiy // Central European Researchers Journal, Slovakia. – 2016. – Vol. 2. – Issue 2. – P. 1 – 10.

Proceedings that certify an approvement of thesis materials:

6. Fedasyuk, D. Method of developing the behavior models in form of states diagram for complex information systems [Text] / D. Fedasyuk, S. Volochiy // Computer science and information technologies: Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference CSIT 2015. – Lviv, 2015. – P. 5 – 8. (SCOPUS).

7. Volochiy, B. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method [Electronic sourse] / 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. (SCOPUS). Режим доступу: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7432990.

8. Fedasyuk, D. Method of Developing the Structural-Automaton Models of Fault-Tolerant Systems [Text] / Dmytro Fedasyk, Serhiy Volochiy // Proceedings 14th International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)”, 21 – 25 February 2017, Polyana, Ukraine. – P. 22 – 26. (SCOPUS).

9. Pashchuk, Yu. Reliability Synthesis for UAV Flight Control System [Text] / Yuriy Pashchuk, Yuriy Salnyk, Serhiy Volochiy // Proceedings of the 13th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, Kyiv, Ukraine, May 15-18, 2017. – P. 569 – 582. (SCOPUS).

10. Ozirkovskyy, L. The Automation of the Exploitation Risks Assessment of the Navigation Information System of Air Drones [Text] / L. Ozirkovskyy, Yu. Pashchuk, A. Mashchak, S. Volochiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XIII International Conference TCSET'2016, Februaru 23 – 26. – Lviv, 2016. – P. 140 – 144. (SCOPUS).

11. Volochiy, S. Formalized Development of the State Transition Graphs Using the Erlang Phase Method [Text] / Serhiy Volochiy, Dmytro Fedasyuk, Ratibor Chopey // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: Proceedings of the 9th IEEE International Conference, 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania. – P. 1098 – 1101. (SCOPUS).

12. Yakovyna, V.S. Software module for developing models of complex technical systems behavior [Text] / V.S. Yakovyna, S.B. Volochiy // Modern Information Technologies in Economics, Management and Education (CITEM-2012): Materials of the Third All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, November 21, 2012, Lviv. – Lviv, 2012. – P. 234 – 237.

13. Volochiy, S.B. Method for determining the parameters of the security alarm system, which are acceptable to the developer [Text] / S.B. Volochiy, V.A. Onishchenko // Proceedings Vth International Scientific Practical Conference “Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems” 3–5 November 2016, Chernivtsi, Ukraine, 2016. – P. 64 – 65.

14. Pashchuk, Yu. M. Justification of the choice of fault-tolerant configurations for the components of the onboard navigation and control unit of an unmanned aerial vehicle [Text] / Yu.M. Pashchuk, Yu.P. Salnyk, S.B. Volochiy // Thirteenth Conference of Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Forces "New Technologies for Airspace Protection": Abstracts of Theses, April 12-13, 2017. - Kh. KhNUPS them. I. Kozhedub, 2017. – P. 143.

15. Onishchenko, V.A. Structural-Automaton Models of the RSC Reaction on the MO Crossing TWO Control Zones with Layouts of Seismic Sensors {2+1} and {1+2} [Text] / V.A. Onishchenko, S.B. Volochiy // Prospects for the Development of Arms and Military Equipment of the Land Forces: A Collection of Abstracts of the International Scientific and Technical Conference (Lviv, May 11-12, 2017). - Lviv: Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy, 2017. – P. 119 – 120.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БП – базова подія

ВКОПР – виявлення і класифікація об’єкта та передавання радіосигналу

ВС – вектор стану

ГСП – граф станів і переходів

ДНСС – дискретно-неперервна стохастична система

ЖЦ – життєвий цикл

КВ – критична відмова

КОС – комплекс охоронної сигналізації

МЯ – модуль ядра

ПАМ – програмно-апаратний модуль

ПВ – процес відновлення

ПЗ – програмне забезпечення

ПМКВС – правило модифікації компонент вектора стану

ПТК – програмно-технічний комплекс

РО – рухомий об’єкт

САМ – структурно-автоматна модель

СД – сейсмічний датчик

СМО – система масового обслуговування

СПВІ – система приймання і відображення інформації

ФРІП – формула розрахунку інтенсивності переходів

ВСТУП

Актуальність теми. В ряді монографій відзначається, що сучасна теорія і практика оцінювання і підтримання на заданому рівні надійності і безпечності програмно-технічних комплексів виділилась в окрему область наукових досліджень 20 - 30 років назад, а тому знаходяться на етапі свого становлення і розвитку. Існують програмні засоби, в яких закладено можливості допомоги проектанту в розробленні дискретно-неперервних стохастичних моделей складних технічних систем та розв'язанні задач надійнісного проектування, а саме RELEX, RAM Commander (A.L.D., Ізраїль), PTC Windchill Quality Solutions (PTC, США), ReliaSoft Synthesis Master Suite (ReliaSoft США), Item Toolkit (Item Software, США, Великобританія). Однак при використанні цих програмних засобів, велика частина роботи з розроблення моделей покладається на проектанта. Це стосується в першу чергу задачі формалізованого представлення об'єкта дослідження, яким може бути граф станів і переходів. Проектант має вручну здійснити розроблення графа, який для відмовостійких програмно-технічних комплексів може мати від кількох сотень до кількох тисяч станів. Ручне розроблення такого графа вимагає великих затрат часу, адже розроблення одної моделі триває від кількох тижнів до кількох місяців і ця тривалість зростає в залежності від кількості варіантів реалізації об'єкта дослідження. Крім цього ручне розроблення графа породжує високу ймовірність внесення помилок, які спотворюють результат надійнісного проектування. Тому поширення отримав підхід, який передбачає укрупнення станів об’єкта дослідження.

Другою проблемою існуючих програмних засобів є необхідність для проектанта прийняти допущення, продиктоване використанням математичного апарату теорії марковських процесів про те, що тривалості перебування у всіх станах представлені експоненційним законом розподілу.

Ці обставини призводять до того, що аналітичні дискретно-неперервні

стохастичні моделі в практиці аналізу надійності відмовостійких програмно-технічних комплексів будують в дуже спрощеному вигляді. Адекватність таких моделей є невисокою, а тому і достовірність отримуваних значень показників надійності є низькою.

Серед відомих методів розроблення графа станів представляє інтерес метод, в основу якого покладено структурно-автоматну модель об’єкта дослідження. Структурно-автоматна модель (САМ) − це формалізоване представлення структури і поведінки об'єкта дослідження, яка дає змогу враховувати всі їх особливості і, відповідно, забезпечити побудову дискретно-неперервної стохастичної моделі з необхідним ступенем адекватності. Рівень формалізації методу дозволив автоматизувати його використання у програмному засобі ASNA. Позитивна сторона методу в тому, що покладені інтелектуальні зусилля на розроблення САМ уможливлюють розв’язання задач синтезу через багатоваріантний аналіз з суттєво меншими витратами часу ніж використання інших відомих методів. У цьому методі відповідальність за безпомилкову побудову моделей у вигляді графа станів лягає на структурно-автоматну модель об'єкта дослідження. Оскільки розроблення САМ повністю покладено на проектанта, який має мати для цього відповідний рівень підготовки, існує деяка ймовірність внесення ним помилок. Тому представляє практичний інтерес створення методики безпомилкового розроблення САМ з урахуванням альтернативного продовження випадкових процесів після закінчення процедур контролю, діагностики, перемикання і відновлення. При цьому методика повинна відповідати вимозі, щоб ступінь формалізації її трудомістких операцій забезпечував можливість їх автоматизованого виконання, а інтелектуальна складова розроблення САМ була зведена до мінімуму.

Актуальність дисертаційної роботи полягає у тому, що підвищення ступеня адекватності аналітичних дискретно-неперервних стохастичних моделей надійності відмовостійких програмно-технічних комплексів

забезпечить отримання достовірних значень показників їх надійності, що дає змогу приймати правильні рішення щодо вибору засобів забезпечення необхідного рівня надійності та безпечності експлуатації відмовостійких програмно-технічних комплексів.

Перелічені вище обставини породили актуальне наукове завдання розроблення математичного забезпечення, в основу якого покладено структурно-автоматну модель, і відповідного програмного засобу для автоматизації процесу розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів та переходів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати представлених досліджень пов'язані з виконанням держбюджетних науково-дослідних робіт, які виконувались на кафедрі програмного забезпечення Національного університету «Львівська політехніка», відповідають науковому напряму та тематиці досліджень кафедри «Програмне і математичне забезпечення автоматизованих систем», а саме: «Розроблення моделей, методів та алгоритмів для автоматизованої оцінки показників надійності радіоелектронних та електромеханічних пристроїв та систем» (№ держреєстрації 0110U001098, 2010–2012); «Розроблення моделей надійності, ризику та безпечності програмно-апаратних технічних систем» (№ держреєстрації 0113U001371, 2013–2015); «Розроблення математичного забезпечення для програмного засобу аналізу функціональної безпечності та надійності програмно-апаратних систем відповідального призначення» (№ держреєстрації 0117U004458, 2017). У рамках перелічених науково-дослідних робіт автор розробив математичне та програмне забезпечення для створення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів .

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення математичного та програмного забезпечення для

автоматизованого створення структурно-автоматних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів, на основі яких формуються графи станів і переходів.

Для досягнення мети було вирішено такі часткові завдання:

1) провести аналіз модулів для марковського аналізу існуючих програмних засобів, призначених для побудови аналітичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів (ПТК);

2) розглянути методи побудови моделей поведінки у вигляді графа станів і переходів та визначити напрямки удосконалення методу розроблення моделей відмовостійких ПТК у вигляді графа станів і переходів на основі структурно-автоматної моделі;

3) розробити формалізований метод визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів та переходів;

4) удосконалити метод побудови опорного графа станів та переходів на основі базових подій, який має враховувати ймовірності альтернативних продовжень процесів (ймовірність успішного контролю, ймовірність успішного перемикання, ймовірність успішного відновлення);

5) удосконалити метод валідації структурно-автоматних моделей поведінки відмовостійких ПТК для зменшення витрат часу на її виконання;

6) удосконалити метод модифікації структурно-автоматних моделей для використання методу фаз Ерланга в побудові дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких ПТК у вигляді графа станів та переходів;

7) на основі запропонованих методів розробити методики та алгоритми для створення програмного засобу, призначеного для розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких ПТК; створити прототип програмного засобу.

Об'єктом дослідження є процес розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних

комплексів.

Предметом дослідження є математичне та програмне забезпечення для розроблення дискретно-неперервних стохастичних марковських і немарковських моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів.

Методи дослідження, що використані в роботі, базуються на теорії системотехнічного проектування радіотехнічних систем та комплексів, теорії моделювання складних систем, теорії марковських випадкових процесів, теорії надійності складних систем. Розроблення моделей алгоритмів поведінки відмовостійких ПТК здійснене з використанням удосконаленої технології аналітичного моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем, у якій використано метод формалізованого представлення об’єктів дослідження у вигляді структурно-автоматної моделі та метод побудови моделей у вигляді графа станів і переходів на основі структурно-автоматної моделі, математичний апарат теорії моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем для побудови математичної моделі у вигляді системи диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена.

Наукова новизна отриманих результатів. Основні результати роботи, які визначають її наукову новизну та виносяться на захист:

Вперше запропоновано метод визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів та переходів, у якому, на відміну від відомого методу, інтелектуальне розв’язання задачі замінено формалізованим за рахунок перенесення інтелектуальної складової в значно меншому об’ємі на розроблення опорного графа станів, що дало змогу сформувати алгоритм та програмне забезпечення для автоматизації побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів і в подальшому проектанту зменшити витрати часу на розроблення моделей для розв’язання задач синтезу алгоритмів поведінки через багатоваріантний аналіз.

Удосконалено метод модифікації структурно-автоматних моделей для використання методу фаз Ерланга в побудові функціональних і надійнісних дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів та переходів, у якому, на відміну від відомого, модифікується кожний логічний вираз опису ситуацій, в яких відбувається базова подія, яка завершує процедуру, тривалість якої необхідно представити законом Ерланга відповідного порядку, що дозволяє автоматизувати процес трансформації графа станів та переходів для дискретно-неперервних стохастичних моделей немарковського типу.

Отримали подальший розвиток:

– метод побудови опорного графа станів та переходів на основі базових подій, в якому, на відміну від відомого, враховано ймовірності альтернативного продовження процесів після базових подій, що дозволяє підвищити ступінь адекватності дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів і відповідно достовірність показників надійності та ефективності;

– метод валідації структурно-автоматних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів, у якому, на відміну від відомого, виявлення і виправлення помилок в структурно-автоматній моделі здійснюється після кожного етапу звіряння тестового графа і графа, отриманого на основі структурно-автоматної моделі, що дозволяє прискорити локалізацію помилок і відповідно зменшити затрати часу на їх пошук і виправлення.

Практичне значення отриманих результатів. Автоматизоване розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких ПТК скорочує витрати часу на виконання проектних завдань та зменшує ймовірність внесення помилок, що дуже важливо, коли таке завдання виконується на етапі системотехнічного проектування.

Підвищення ступеня адекватності дискретно-неперервних

стохастичних моделей відмовостійких ПТК за рахунок врахування реальних законів розподілу для тривалостей процедур та інтервалів часу між сусідніми подіями в потоках подій зробило можливим підняти коректність розв’язання задач синтезу алгоритмів функціональної і надійнісної поведінки ПТК.

Розроблені методики побудови моделей та програмний засіб використано підчас виконання проектних робіт для розвідувально-сигналізаційного комплексу та бортового комплексу навігації та управління безпілотного літального апарата в Науковому центрі сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. Врахування близького до реального закону розподілу для інтервалів часу від моменту появи рухомого об’єкта в зоні контролю до моменту отримання сигналу реакції на нього від сейсмічного датчика, дозволило обґрунтувати зменшення кількості сейсмічних датчиків та автономних систем формування та передавання повідомлень, необхідних для виконання розвідувальної функції. Комплект сейсмічних датчиків та автономних систем формування та передавання повідомлень входять у переносимий вантаж розвідувальної групи. Підвищення ступеня адекватності надійнісних моделей бортових навігаційної і керуючої систем безпілотного літального апарата дало змогу обґрунтувати мінімальне резервування і за рахунок цього збільшити корисне навантаження безпілотного літального апарата.

Результати дисертаційної роботи використано: у 3-х держбюджетних науково-дослідних роботах; у науково-дослідних роботах за шифрами «Бар’єр-СП», «Дрон-СВ» та «Сокіл» у Науковому Центрі Сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного.

Результати роботи впроваджені у навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» в лекційних курсах та практикумах з дисциплін: «Основи теорії надійності програмних систем» на кафедрі «Програмне забезпечення» та «Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем» і «Системотехнічне проектування

телекомунікаційних систем та мереж» на кафедрі «Теоретична радіотехніка та радіовимірювання».

Використання та впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. У друкованих працях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: [1, 4, 6] – метод визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів та переходів, метод побудови опорного графа станів та переходів на основі базових подій; [2, 8, 11] – метод модифікації структурно-автоматних моделей для використання методу фаз Ерланга в побудові функціональних і надійнісних стохастичних моделей радіоелектронних інформаційних систем; [3, 13, 15] – участь у розробленні структурно-автоматних моделей процесу перетину рухомим об'єктом двох зон контролю з різними схемами розміщення сейсмічних датчиків, призначених для методики синтезу показників ефективності складових та структури розвідувально-сигналізаційного комплексу; [5, 7] – структурно-автоматні моделі для побудови графів станів і переходів, з яких визначаються мінімальні січення; [9, 10, 14] – участь у розробленні структурно-автоматних моделей відмовостійких конфігурацій для складових бортового комплексу навігації та управління безпілотного літального апарата, призначених для методики їх надійнісного синтезу; [12] – розроблення архітектури програмного модуля, написання програмного коду.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися:

на 10 міжнародних наукових конференціях: X International Scientific and Technical Conference CSIT 2015 (Lviv, 2015); 11th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications ICTERI 2015 (Lviv, 2015); The Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management SMRLO 2016 (Israel, Beer Sheva, 2016); International Scientific Technical Conference “DEpendable

Systems, SERvices and Technologies CYBER FORUM DESSERT B2S-S2B" (Kharkiv-Kyiv-Chernivtsi, 2016); 14th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)" (Polyana, 2017); 13th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (Kyiv, 2017); XIII International Conference TCSET'2016 "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (Slavsko, 2016); 9th IEEE International Conference "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications" IDAACS'2017 (Bucharest, Romania, 2017); Vth International Scientific Practical Conference "Physical and Technological Problems of Transmission, Processing and Storage of Information in Infocommunication Systems" (Chernivtsi, 2016); Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ» (Львів, 2017);

на 2 науково-технічних конференціях України: ІІІ-я Всеукраїнська науково-практична конференція "Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті" (СІТЕМ-2012) (Львів, 2012); Тринадцята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (Харків, 2017);

на Всеукраїнському науково-технічному семінарі КриКТехС «Критичні комп'ютерні технології і системи» (Харків, 2018).

Публікації. За результатами досліджень, які викладено в дисертаційній роботі, опубліковано 15 наукових праць, серед яких 4 статті [1 – 4] у наукових фахових виданнях України, 1 стаття [5] у закордонному виданні, 6 публікацій [6 – 11] у збірниках праць міжнародних конференцій, які внесені в міжнародну наукометричну базу SCOPUS та 4 публікації [12 – 15] у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 173 найменувань та чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 199 сторінок, з них 124 сторінки основного тексту, 27 рисунків та 21 таблиця.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СТАНУ МАТЕМАТИЧНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОБУДОВИ АНАЛІТИЧНИХ ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНИХ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДІНКИ ВІДМОВОСТІЙКИХ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

При розв'язанні задачі синтезу відмовостійких програмно-технічних комплексів необхідно отримати показники надійності для багатьох варіантів реалізації структури і надійнісної поведінки.

Як відомо дискретно-неперервні стохастичні моделі надійнісної та функціональної поведінки дають можливість визначати статистичні показники їх надійності та ефективності. Розроблення моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів є етапом в технології побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки, в основу якої покладено метод простору станів [164]. Використання математичного подання алгоритму поведінки об’єкта дослідження у вигляді дискретно-неперервної стохастичної моделі має таке обґрунтування. Узагальнену статистичну картину процесу функціонування об’єкта дослідження можна зобразити набором всіх можливих станів і всіма можливими варіантами переходів із стану в стан. Варіанти переходів із стану в стан відображають конкретний алгоритм поведінки об’єкта дослідження, який має бути заданим. Тривалість перебування об’єкта дослідження в кожному стані траба розглядати як випадкову величину.

В розділі показано стан математичного і програмного забезпечення в області автоматизації побудови аналітичних моделей поведінки складних технічних систем, для яких є прийнятним математичне представлення у вигляді дискретно-неперервної стохастичної системи, а також визначено напрями досліджень.

1.1 Актуальність проблеми технологічності процесу моделювання алгоритмів поведінки програмно-технічних комплексів

В практиці проектування складних технічних систем знайшли широке використання дискретно-неперервні стохастичні системи. Дискретно-неперервна стохастична система представляє собою математичну модель складної технічної системи, поведінка якої має бути представлена двома або більше дискретно-неперервними випадковими процесами. В якості складних технічних систем в дисертації розглядаються відмовостійкі програмно-технічні комплекси.

При побудові математичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів (ПТК) прийнято розглядати їх структуру і поведінку. Поведінка ПТК має два аспекти: функціональний і надійнісний. Модель функціональної і надійнісної поведінки ПТК може бути представлена у вигляді системи масового обслуговування. При великій складності надійнісної поведінки її виділяють як окремий об'єкт моделювання і представляють відмовостійкою системою. Математичною базою для розв'язання задач дослідження (проектування) ПТК, які можна представити у вигляді систем масового обслуговування, служить теорія масового обслуговування. Математичне забезпечення для розв'язання задач дослідження (проектування) відмовостійких ПТК створюється в рамках теорії надійності.

В теорії надійності є напрацьовані надійнісні моделі відмовостійких систем, які використовують в галузевих стандартах для оцінки надійності радіоелектронних засобів. Але практика проектування ПТК породжує нові конфігурації відмовостійких систем, для яких відсутні надійнісні моделі, а отже і можливості повноцінного системотехнічного проектування.

Багатьма науковцями вівся пошук підходів до автоматизації розв'язання задач надійнісного проектування відмовостійких систем. У 80-х роках була реалізована концепція побудови універсальної аналітичної

надійнісної моделі мікропроцесорних інформаційно-вимірювальних систем з врахуванням відомих на той час засобів забезпечення відмовостійкості [153]. Вибором значень параметрів моделі інженер-проектувальник "настроював" універсальну надійнісну модель на своє технічне рішення побудови відмовостійкої системи. Подальша процедура визначення показників надійності системи була автоматизована. Недолік цієї концепції був в тому, що коли з'являлось нове технічне рішення відмовостійкої системи, яке виходило за межі можливостей універсальної моделі, інженер-проектувальник повинен повертатися до традиційної технології моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем.

Останнім часом розвивається ще одна технологія моделювання згідно якої об'єкт дослідження представляється статичною системою [108 – 111]. В цій технології використовуються моделі типу «вхід-вихід». Для моделювання статичних систем застосовують методи інтервального аналізу. Особливість цих методів полягає в множинному представленні оцінок параметрів моделі «вхід-вихід», побудованої за результатами експерименту, в якому вихідні змінні отримані у інтервальному вигляді. В результаті застосування методів інтервального аналізу, замість однієї моделі «вхід-вихід», отримують множину рівнозначних інтервальних моделей статичної системи. Властивості отриманих моделей залежать від обраного методу множинного оцінювання параметрів об'єкта дослідження. Множини оцінок параметрів представляють геометричною моделлю у вигляді многогранника, багатовимірного еліпсоїда чи прямокутного паралелепіпеда, які задають інтервали значень параметрів. В монографії [108] преставлено теоретичні засади побудови інтервальних моделей для різного типу статичних систем за умов невизначеності. Теоретичні засади покладені в основу розроблення алгоритмічного і програмного забезпечення побудови математичних моделей «вхід-вихід» статичних систем за умов інтервального представлення вихідних змінних. Використання такого підходу для розроблення моделей

поведінки відмовостійких ПТК потребує додаткових досліджень. До цього слід зауважити, що проведення експериментальних досліджень на етапі системотехнічного проектування є практично недоступним.

Традиційна технологія розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей для представлених вище об’єктів проектування є складною і для практичного використання на етапі системотехнічного проектування ПТК є недоступною. Потрібна формалізована технологія моделювання, а відтак і програмні засоби для автоматизації побудови моделей та їх аналізу.

Актуальність проблеми технологічності процесу моделювання алгоритмів функціональної та надійнісної поведінки ПТК та їх систем породжена [77]:

високим рівнем відповідальності проектанта за рішення, прийняті на етапі системотехнічного проектування ПТК;

потребою мати можливість здійснювати розроблення адекватних моделей складних технічних систем, математичним представленням яких є дискретно-неперервна стохастична система (ДНСС).

При цьому технологічність процесу моделювання повинна забезпечувати рішення задач багатоваріантного аналізу і евристичного синтезу в обмежені терміни тривалості етапу системотехнічного проектування ПТК [77, с. 27]. Отже, потрібна технологія моделювання для розв'язання задач системотехнічного проектування ПТК та їх систем, в яких трудомісткий процес створення моделей об’єктів проектування та їх аналізу є автоматизованим. Займаючись проблемою технологічності процесу моделювання слід тримати в полі зору два важливих аспекти [77, с. 28]:

по-перше: методологічну складову технології як науки, яка займається виявленням закономірностей, застосування яких на практиці дозволяє знаходити найбільш ефективні і економічні способи моделювання систем на комп’ютерах;

по-друге: прикладну мету і завдання технології як мистецтва, майстерності, вміння досягати в ході комп’ютерного моделювання складних технічних систем корисних для практики результатів.

1.2 Використання дискретно-неперервних стохастичних моделей надійності в існуючих програмних комплексах і спосіб їх представлення

Для надійнісного проектування складних технічних сисем є розповсюдженими програмні комплекси: RELEX (Relex software Corporation, США) [81; 143; 149; 163]; ITEM Software (Великобританія) [150]; A.L.D. Group (Ізраїль) [151]; ISOGRAPH (Великобританія) [152]. В склад цих програмних комплексів входить аналітичний модуль марковського аналізу (Markov Analysis). Цей модуль сприймає об'єкт дослідження у вигляді дискретно-неперервної стохастичної системи марковського типу, яка має бути представлена графом станів і переходів.

Модуль Markov Analysis програмного комплексу Relex reliability studio 2007 оснащений графічним редактором, за допомогою якого на екрані комп'ютера формується граф станів і переходів. Для кожної вершини і дуги графа задається інформація для їх зображення і дані для обчислень. Інформація для зображення вершин і дуг включає в себе: колір, форму і розмір вершин; товщину, стиль і колір дуги; текст і формат надписів. Для обчислень вводяться такі дані: для вершин – тип стану (працездатний, непрацездатний, деградація), початковий стан (0 або 1), прибуток (або збитки) за одиницю часу перебування в даному стані; для дуг – інтенсивність переходу і прибуток (або збитки) за перехід в стан.

В деяких програмних комплексах для введення графа станів використовується заповнення інфінітезимальної матриці (*матриця інтенсивностей переходів однорідного в часі марковського процесу*).

Однак розроблення саме графа станів покладається на користувача і представляє собою інтелектуальну (не формалізовану) задачу, розв'язання якої часто називають "ручним" і вона вимагає великих витрат часу.

Наприклад, коли модель поведінки відмовостійкого ПТК сягає 200 станів, то витрати часу на розроблення графа станів і переходів становлять не менше 100 годин. При цьому існує висока ймовірність внесення помилок в розроблений граф.

Методику побудови моделі об'єкта дослідження з використанням методу простору станів представлено в роботі [20]. Згідно даної методики, у створеному авторами програмному забезпеченні реалізовано такі етапи. На першому етапі будуються моделі елементів системи. На другому етапі даної методики встановлюються стани, в яких відображаються небезпечні та працездатні стани системи. На третьому етапі здійснюється побудова взаємозв'язків між елементами, встановлення стратегії обслуговування та ремонту системи. На основі отриманої моделі у вигляді графа станів в автоматизованому режимі формується система лінійних диференціальних рівнянь. В результаті розв'язання системи лінійних диференціальних рівнянь отримується показник безпечності – ймовірність виникнення небезпечної відмови за годину та функція готовності системи. Автори роботи проводять аналіз безпечності об’єкта дослідження на трьох рівнях: на системному рівні; на рівні підсистем; на рівні окремого елемента. У зв'язку з необхідністю врахування великої кількості станів, автори спрощують модель, що знижує достовірність отриманих результатів. Також дана методика не є придатною для багатоваріантного аналізу, оскільки вимагає побудови та аналізу моделі для кожного варіанту реалізації системи.

1.3 Відомі методики розроблення моделей поведінки у вигляді графа станів і переходів

Методика розроблення графа станів за допомогою вербального представлення його станів і переходів. У розробників складних технічних систем склалася і існує традиція, що розроблення моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів ведеться через вербальне представлення його станів [79; 80; 118; 130]. Встановлення переходів між ними здійснюється на основі

розуміння проектантом (розробником) можливих напрямків перебігу випадкових дискретно-неперервних процесів.

В статті [79] описано процес розроблення моделі процесу експлуатації корабельної радіолокаційної станції у вигляді графа станів і переходів. На основі логічного аналізу вербальної моделі процесу експлуатації корабельної радіолокаційної станції автори складають опис станів і можливих переходів між станами.

В роботі [80] описана методика побудови математичної моделі оцінки готовності однокамерних суднохідних шлюзів у вигляді графа станів. Цікаво (інформативно) представлений перший пункт методики: "Виявлення можливих ознак виділення станів, визначення їх змісту на основі концептуальної моделі функціонування суднохідних шлюзів".

В книжці [130, с. 76-78, с. 108-110, с. 127-130, с. 142-144] описано процес розроблення моделей технічного обслуговування систем різного призначення з почасовою надмірністю у вигляді графа станів.

В книжці [118, с. 283-285, с. 312-314] описано процес розроблення моделей стратегій обслуговування систем без врахування їх структури і з урахуванням структури, яка складається з довільної кількості послідовно з'єднаних елементів (блоків, підсистем).

В практиці методика розроблення графа станів на основі вербального представлення його станів і переходів використовується для об'єктів дослідження з кількістю станів до 10 – 20.

Методика розроблення графа станів, в основу якої покладено принцип фрагментації. Для складних об'єктів, у яких кількість станів сягає кількох сотень, в монографії [162, с. 275-345] запропоновано методику побудови графа на основі принципу фрагментації. Згідно принципу фрагментації на першому етапі із всієї сукупності станів виділяються типові групи станів (фрагмента генерального (головного) графа станів). Для кожної типової групи станів є характерним: перебіг локальних процесів, переходи в іншу

типову групу або інші типові групи станів і багатократне повторення типової групи в генеральному (головному) графі станів. Для кожної групи здійснюється розроблення графа станів, який є фрагментом генерального (головного) графа станів.

Треба зазначити, що ця методика розроблення графа станів не передбачає автоматизації його побудови. Так як процес побудови графа станів є "ручним", то він вимагає великих витрат часу і існує велика ймовірність внесення помилок. При розв'язанні задач синтезу алгоритмів поведінки складних інформаційних систем треба будувати багато варіантів моделі у вигляді графа станів. Цей процес має велику працеємність.

Методика розроблення графа станів, в основу якого покладено комбінаторний підхід. Комбінаторний підхід для побудови графа станів використовує векторне представлення станів [145; 146; 172]. Цей підхід не враховує надійнісної поведінки відмовостійкої системи, створює стани об'єкта дослідження, які в реальності не існують.

Методика розроблення графа станів на основі структурно-автоматної моделі об'єкта дослідження. В монографії [91, с. 59 – 93] описано методику побудови графа станів на основі структурно-автоматної моделі (САМ). Структурно-автоматна модель це формалізоване представлення структури і поведінки об'єкта дослідження. Достоїнством методики є можливість автоматизувати побудову графа станів, що суттєво зменшує витрати часу на його побудову при зміні параметрів об'єкта дослідження. Це дуже важливо при розв'язанні задач структурного і параметричного синтезу відмовостійких систем і систем масового обслуговування через багатоваріантний аналіз. В цьому методі відповідальність за безпомилкову побудову моделей у вигляді графа станів лягає на САМ об'єкта дослідження.

Розроблення САМ є інтелектуальною задачею. Вхідними даними є: векторне представлення стану, базові події, ймовірності успішного

завершення процедур, інтенсивності базових подій. Розроблення САМ розпочинається з вибору параметрів об'єкта дослідження, які мають бути відображені в моделі. Наступними кроками має бути:

1) обґрунтування компонент вектора, який має представляти стан об'єкта дослідження;

2) визначення базових подій в алгоритмі поведінки об'єкта дослідження;

3) складання формалізованого опису ситуацій, в яких відбувається базова подія (цей пункт виконується для кожної базової події);

4) компонування формул розрахунку інтенсивності базової події (для кожної ситуації);

5) складання правил модифікації компонент вектора стану (для кожної ситуації).

6) формування умови попадання в поглинаючий стан, якщо він є актуальним. Наприклад, для відмовостійких систем ми розрізняємо стан "відмовостійка система є працездатною при наявності несправних елементів" і стан "відмовостійка система є непрацездатною, після того як відбулася критична відмова". Тоді стан, коли "відмовостійка система є непрацездатною", треба представити як поглинаючий.

Ключовими моментами, які визначають ступінь адекватності САМ є: вибір параметрів об'єкта дослідження, які мають бути відображені в моделі; кількість компонент вектора стану; деталізація ситуацій, в яких відбуваються базові події.

Для виявлення і виправлення можливих помилок в САМ, має бути передбачена процедура валідації. Так як згідно методу побудови графа станів на основі САМ результатом має бути модель об'єкта дослідження у вигляді графа станів, то для проведення процедури валідації необхідно мати тестову модель. Розроблення тестової моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів здійснюється за допомогою методики побудови графа на основі базових подій [173].

Методика розроблення графа станів на основі САМ є дуже зручною для розв'язання задач параметричного та структурного синтезу відмовостійких систем [62; 94; 95], систем масового обслуговування [96], систем охоронної сигналізації [63] та інших складних технічних систем.

1.4 Огляд наукових публікацій, в яких запропоновані удосконалення математичного забезпечення технології моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем

Наукові публікації, в яких розв'язуються задачі моделювання алгоритмів поведінки ПТК та його систем, розглянуті за таким планом:

1) Стан проблеми аналітичного моделювання алгоритмів надійнісної поведінки відмовостійких систем, розроблених в рамках теорії надійності.

2) Огляд методів аналітичного моделювання алгоритмів функціональної поведінки систем, розроблених в рамках теорії марковських процесів і теорії масового обслуговування.

3) Стан проблеми комплексного моделювання алгоритмів функціональної та надійнісної поведінки систем.

При проведенні огляду публікацій особливо нас цікавило застосування методів аналізу поведінки ПТК, в основу яких покладено марковську дискретно-неперервну стохастичну модель. І зокрема проблема „формалізації та автоматизації процесу побудови марковських дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки ПТК”. Ця проблема є спільною для задач моделювання алгоритмів надійнісної та функціональної поведінки ПТК. Тому при пошуку використовуваних підходів до її вирішення розглядалися публікації присвячені моделюванню алгоритмів як надійнісної так і функціональної поведінки.

Як показав розгляд публікацій, присвячених розв'язанню задач функціонального та надійнісного системотехнічного проектування ПТК та їх систем для математичного представлення їх поведінки багато авторів використовують ДНСС марковського і немарковського типів. В даному

розгляді публікації згруповані і представляють два напрямки досліджень. Один напрямок складають роботи, які мають математичний характер. В них аналізуються можливості існуючих моделей ДНСС і пропонуються нові моделі. В цих роботах технологія моделювання представляється на другому плані, або не розглядається зовсім. Другий напрямок складають роботи, які мають прикладний характер. В таких роботах представлені технічні задачі дослідження (проектування) інформаційних систем, для розв'язання яких доцільно використати модель у вигляді ДНСС. Ці роботи показують на якому рівні використовуються можливості моделювання, а також обмеження, які має проектант працюючи з існуючими технологіями моделювання.

1.4.1 Можливості аналітичного моделювання алгоритмів поведінки програмно-технічних комплексів, як дискретно-неперервних стохастичних систем

Як було сказано вище, в системному аналізі є популярною технологія побудови аналітичних моделей алгоритмів поведінки складних технічних систем у вигляді ДНСС. Технологія побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей, поведінку яких можна відображати однорідним марковським дискретно-неперервним випадковим процесом докладно розглянута в багатьох роботах, наприклад [88; 121; 154, с.137–211; 155, с.167 – 206; 164].

Традиційна технологія побудови таких моделей передбачає такі етапи:

1) встановлення відповідності між об'єктом дослідження і ДНСС та формування вектора станів;

2) розроблення моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів і переходів;

3) формування та розв'язання системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена;

4) виведення формул для визначення показників ефективності об'єкта дослідження на основі розподілу ймовірностей перебування в станах.

У традиційній технології проблемним є розроблення моделі у вигляді графа станів і переходів, який повинен адекватно відобразити структуру і поведінку ПТК. Ця модель виконує функцію посередника, за допомогою якого здійснюється формування аналітичної моделі ПТК у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена.

Використання такої системи рівнянь накладає відоме обмеження на адекватність моделі. Так проектант має прийняти умову, що тривалість перебування у всіх станах графа є випадковою величиною з експоненційним законом розподілу. Однак в практиці проектування реальних систем тривалостям перебування в станах відповідають закони розподілу, відмінні від експоненційного. А в деяких випадках тривалості є фіксованими. Тому достовірність показників надійності, отриманих з допущенням про експоненційний закон розподілу для тривалостей перебування в усіх станах, є низькою.

У зв'язку з цим представляють практичний інтерес роботи, в яких розробляються і досліджуються підходи до побудови моделей, в яких враховується реальний або близький до нього закон розподілу ймовірностей для тривалостей перебування в станах. В підрозділі представлені результати досліджень саме в цьому напрямі.

Для побудови моделей ПТК, поведінку яких не можна відображати однорідним марковським дискретно-неперервним випадковим процесом, існує ряд підходів розглянутих в роботах [75; 112; 115; 124; 127; 129; 131; 139; 154]. В роботі [112] приведена методологія побудови немарковських моделей методом фаз Ерланга, методом вкладених ланцюгів Маркова та за допомогою напівмарковських випадкових процесів. Зауважимо, що в теорії систем "метод фаз Ерланга" [119, с. 29; 155, с. 195] називають або "метод етапів" [121, с. 137; 125, с. 136; 132, с. 26] або "метод стадій" [126, с. 24 – 25].

В роботах [115; 117; 128] для побудови моделей немарковського типу пропонується застосовувати напівмарковські випадкові процеси. В роботах

[75; 127] вказується, що серед різних методів дослідження немарковських випадкових процесів найбільш поширеними є метод вкладених ланцюгів Маркова та метод стадій. У роботі [129] приводиться аналіз можливостей методів побудови математичних моделей немарковських систем, а саме метод фаз Ерланга, метод внесення додаткової змінної, метод вкладених ланцюгів Маркова, узагальнений метод фаз Ерланга. В якості об'єкта дослідження автор використовує систему масового обслуговування з одним вхідним потоком заявок, з одною чергою і з одноканальним та однофазним обслуговуванням в порядку надходження заявок. Властивості марковського процесу не виконуються у вхідного потоку заявок або у процесу обслуговування заявок.

Метод внесення додаткової змінної – це спосіб приведення немарковського процесу до марковського щляхом доповнення неповноти інформації про процес за допомогою додаткової змінної. Мова йде про час, що минув від моменту останньої події. Цей підхід був запропонований Кендаллом і розвинутий Коксом [131]. Цей метод розглядається в монографіях [119; 131; 155, с.199].

Метод вкладених ланцюгів Маркова дозволяє позбутися ефекту післядії у випадкових процесах, що протікають в стохастичній системі. Для цього передбачено розгляд системи тільки в певні моменти. Ці моменти називають точками регенерації. Але необхідність представлення процесу точками регенерації буде вносити помилку в результат аналізу. Цей метод розглядається в монографіях [119; 121, с.195; 129].

Інформації про використання напівмарковських процесів, методу внесення додаткової змінної, методу вкладених ланцюгів Маркова в засобах автоматизації побудови моделей немарковських систем не знайдено.

В роботах [36; 43; 44] використовується ще один спосіб побудови розширених однорідних марковських надійнісних моделей, який базується на допоміжних матричних перетвореннях та геометричному процесі. Однак

автори цих робіт не показують технологію побудови таких надійнісних моделей. Відсутнє порівняння показників надійності об’єкта, для якого сформована надійнісна модель цим та іншими способами.

В роботах [7; 8; 17; 22; 23; 31; 32; 37; 47; 48; 49; 54; 67; 84] представлені методи, що передбачають ще один підхід до розроблення неоднорідної марковської надійнісної моделі поведінки відмовостійкої системи. Граф станів і переходів для неоднорідної марковської надійнісної моделі поведінки формується аналогічно, як і для однорідної марковської надійнісної моделі поведінки. Але функції інтенсивності переходів залежать від часу і їх необхідно виразити через параметри елементів відмовостійкої системи. В публікаціях виявлено кілька способів наближеного розв’язання такої задачі.

У роботах [17; 48; 49; 54; 55; 67] запропоновано в першому наближенні як функцію інтенсивності переходів використовувати функцію інтенсивності відмов і функцію інтенсивності відновлення. Неоднорідні марковські надійнісні моделі, в яких функції інтенсивностей переходів визначені таким способом, мають низький ступінь адекватності, на що звернуто увагу в роботі [37]. При роботі з надійнісними моделями такого типу виникають проблеми під час вибору кроку для чисельного інтегрування.

У роботах [7; 31; 47] функцію інтенсивності переходу запропоновано визначати, розраховуючи так звану матрицю ядер, яку формують виходячи з припущення про напівмарковський характер випадкових процесів. У наукових публікаціях немає підтвердження, що такий спосіб визначення функцій інтенсивностей переходів є коректним для будь-яких законів розподілу властивих випадковим процесам, які протікають в об’єктах дослідження. Прямий розрахунок вказаної матриці ядер складний, оскільки її члени є складні згорткові вирази. В роботі [47] запропоновано алгоритм, який дозволяє наближено обчислити члени матриці ядер на основі розрахунку рекурентного розкладу в ряд. В роботі [7] показано, як можна

спростити розрахунок цієї матриці, коли необхідно визначити стаціонарний коефіцієнт готовності відмовостійкої системи.

У роботах [8; 22; 23; 32; 84] використовується підхід, в якому функція інтенсивності переходу визначається на основі аналізу спеціальної допоміжної однорідної марковської моделі відповідного випадкового процесу. Цей підхід передбачає розрахунок за допоміжною моделлю еквівалентних функції розподілу ймовірності і густини розподілу ймовірності, а вже на їх основі визначають еквівалентну функцію інтенсивності, яку використовують в неоднорідній марковській надійнісні моделі об’єкта дослідження. В публікаціях розрізняють декілька способів реалізації такого підходу для визначення функцій інтенсивності переходу.

У роботі [5] запропонована теорема, застосування якої дозволяє представити неоднорідну марковську надійнісну модель двома однорідними марковськими надійнісними моделями. Розрахунок коефіцієнта готовності об’єкта дослідження з використанням цих надійнісних моделей дає оцінку його верхнього та нижнього значення. Для отриманих граничних значень необхідно розраховувати довірчі ймовірності, які залежно від закону розподілу визначаються виразами високої складності.

У роботах [28; 29; 30] функцію інтенсивності переходу автори визначають шляхом моделювання відповідного випадкового процесу методом Монте-Карло. Така технологія моделювання поєднує розроблення аналітичної моделі у вигляді неоднорідної марковської надійнісної моделі та статистичної надійнісної моделі на основі методу Монте-Карло. Розроблена за такою технологією надійнісна модель має високий ступінь адекватності, проте її використання в практиці проектування обмежує велика працеємність.

Використання методу фаз Ерланга в побудові моделей статистичного представлення процесу експлуатації відмовостійких систем.

В теорії ймовірностей [89, с. 531 – 532] показано формування закону розподілу Ерланга для неперервної випадкової величини, як прорідження найпростішого потоку подій. Це означає, що послідовність випадкових величин з показниковим законом розподілу формує випадкову величину, якій відповідає закон розподілу Ерланга. Закон розподілу Ерланга в залежності від порядку (кількості пропущених подій) має властивість змінювати свою форму, що є корисним для апроксимації емпіричних розподілів. В граничних представленнях порядку для k = 1 цей закон відповідає випадковій величині з експоненційним законом розподілу. А із зростанням порядку до безмежності тривалість випадкової величини прямує до константи, яка дорівнює її середньому значенню [89, с. 533; 121, с.142 – 143]. Для відмовостійких систем, у яких процедура відновлення має постійну (фіксовану) тривалість, метод фаз Ерланга дає змогу підвищувати достовірність визначених показників їх надійності.

В монографії [119, с. 36] сказано, що випадкову величину, якій відповідає закон Ерланга k-го порядку з параметром μ, можна представити у вигляді суми k незалежних *однаково* експоненційно розподілених випадкових величин ξ_i з параметром μ. Наприклад, в системі масового обслуговування (СМО) тривалість процедури обслуговування має розподіл Ерланга k-го порядку. Цю тривалість обслуговування можна розглядати (представити) як послідовність k стохастично незалежних фаз, тривалості яких мають *однаковий* експоненційний розподіл. В монографії [155, с. 195-199] ця ідея поширена на представлення випадкових процесів у вигляді графа станів і переходів.

Метод фаз Ерланга є корисним у випадках, коли за відсутності інформації про реальні закони розподілу ймовірності для тривалостей процедур і інтервалів часу між сусідніми подіями процесів у відмовостійкій системі, визначення показників надійності проводиться за допомогою ДНСС марковського типу. І як сказано в монографії [136, с. 58 – 59], визначені

таким методом значення показників представляють їх верхню або нижню оцінку. Але не завжди можна сказати яким саме є це значення, верхнім чи нижнім. Тому визначення показників з введеним в надійнісну модель відмовостійкої системи для випадкових величин закону розподілу Ерланга довільного порядку дозволяє отримати відповідь на поставлене питання.

Метод фаз Ерланга використовується для розроблення аналітичних стохастичних моделей функціональної і надійнісної поведінки технічних систем. Використання методу фаз Ерланга для розроблення моделей надійнісної поведінки технічних систем розглядається в роботах [126; 155]. Використання методу фаз Ерланга для розроблення моделей функціональної поведінки технічних систем, які відносяться до класу СМО розглядається в роботах [119; 121, с. 137 – 144; 126, с. 136 – 143; 147].

В статті [147] представлено використання методу фаз Ерланга для розроблення моделей СМО з ерланговськими і гіперекспоненціальними розподілами для вхідних потоків заявок (для тривалостей між сусідніми заявками вхідного потоку) і тривалостями їх обслуговування. До СМО додається фіктивний приймальний пристрій, який для вхідних потоків з ерланговським розподілом r-го порядку для тривалостей між сусідніми заявками з параметром λ, представляє перебування кожної заявки на r фіктивних фазах. Тривалість перебування на кожній фазі має експоненційний розподіл з параметром λ. Після проходження цього фіктивного приймального пристрою заявка надходить в буфер системи або на обслуговування. Для вхідних потоків з гіперекспоненціальним розподілом k-го порядку з параметрами a_i і λ_i, i ϵ 1 ... k, до СМО додається фіктивний приймальний пристрій з k паралельними фіктивними фазами. З ймовірністю a_i заявка проходить і-у фазу в буфер системи або на обслуговування. Аналогічним є представлення тривалостей обслуговування заявок. Представлені 4 графи станів, розроблення яких проведено в ручному режимі. Кількість станів відповідно 10, 10, 12, 8. Після таких перетворень, граф станів

СМО відповідає ДНСС марковського типу і модель СМО представлена системою диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. В обґрунтуванні використаного підходу до розв'язання задачі автори статті відзначають, що відомі методи розв'язання задач для моделей СМО виду G/G/1/N/∞/Fifo базуються на використанні вкладених ланцюгів Маркова. До цього додають, що використання методу вкладених ланцюгів Маркова супроводжується труднощами отримання матриці перехідних ймовірностей і обчислення її елементів.

В статтях [98; 99] представлена структурно-автоматна модель СМО з обмеженою чергою, одноканальним, однофазним і ненадійним обслуговуванням та з ерланговським вхідним потоком заявок. Метод фаз Ерланга використано для представлення вхідного потоку заявок. Дослідженню підлягають втрати заявок за рахунок відсутності місць в черзі. Показано різницю між значеннями ймовірності втрат заявок, визначених з використанням і без використанням методу фаз Ерланга.

Приклади використання фіктивних станів при дослідженні надійності найпростіших систем (граф має два стани) з відновленням подано в довідниках [124, с. 405 – 406; 139, с. 472 – 474]. В цих довідниках показані надійнісні моделі системи у вигляді графа станів, який має два стани і до яких додано 1 або 2 фіктивних стани. Ці моделі дають змогу досліджувати функцію готовності системи з зростаючою чи спадаючою інтенсивністю відмов.

Ряд авторів, які проводили дослідження методу фаз Ерланга [119, с. 37; 155, с. 197], вказують як недолік значне зростання простору (кількості) станів, а відповідно і зростання розмірності системи диференціальних рівнянь. Але автоматизація процесу використання методу фаз Ерланга робить цю обставину несуттєвою.

Перетворення (трансформація) надійнісної моделі відмовостійкої системи у вигляді графа станів з використанням методу фаз Ерланга

оригінально показано в монографії [155, с. 195 – 199]. На рисунку 1.1 показано фрагмент графа станів, який є реальною моделлю об'єкта дослідження. В станах A, B, C, D, E, F, G відбуваються процедури, які передбачені алгоритмом поведінки об'єкта дослідження. Тривалості цих процедур є неперервними випадковими величинами, для яких є справедливою математична модель у вигляді експоненційного закону розподілу ймовірності. Закінчення цих процедур спричиняє перехід в інший стан. Кожний перехід характеризується параметром експоненційного закону розподілу, який інтерпретується як середнє значення кількості переходів в одиницю часу. Цей параметр називають інтенсивністю переходу з стану в стан. Для інтенсивностей переходу із стану в стан використані такі позначення: μ_{AB}, λ_{DA}, $\lambda_{CA,}$ $\lambda_{BE,}$ λ_{BF}, λ_{BG}. В цьому графі є стан A (див. рис. 1.1), в якому відбувається процедура, реальний закон розподілу тривалості якої є відомим і він суттєво відрізняється від експоненційного.

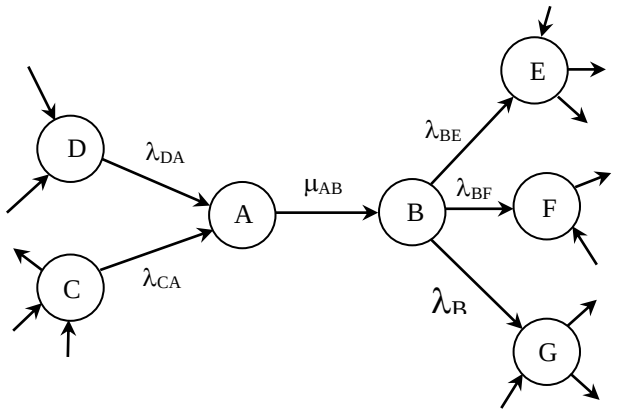

Рисунок 1.1 − Фрагмент графа станів, який є частиною моделі реального об'єкта дослідження

В монографіях [119, с. 10 – 11, с. 36 – 37; 155, с. 196] сказано, що будь-який реальний закон розподілу випадкової величини (в даному розгляді тривалість відновлення $t_в$) можна апроксимувати "сумішшю" законів розподілу Ерланга $p_i(t_в)$:

$$p(t_в) = \sum_{i=1}^{k} q_i p_i(t_в) \quad для \quad t_в \geq 0 \ , \tag{1.1}$$

де q_i – вагові коефіцієнти, які визначають питому вагу кожного закону розподілу Ерланга залученого до формування реального закону розподілу

(для коефіцієнтів обов'язковим є виконання умови, що їх сума має дорівнювати 1).

Строге обґрунтування можливості апроксимації довільного розподілу комбінаціями експоненційних розподілів подано в монографії [126, с. 25 – 27].

Якщо тривалостям перебування в стані A відповідає густина розподілу ймовірності (1.1), то цей стан можна замінити k ланцюжками фіктивних станів (рис. 1.2). Кількість фаз в кожному ланцюжку відповідає значенню n_i (p, r, ..., s). Фіктивні стани $A_1^{(1)} \ldots A_p^{(1)}$, $A_1^{(2)} \ldots A_r^{(2)}$, ... , $A_1^{(k)} \ldots A_s^{(k)}$ разом з відповідними переходами представляють модель тривалості процедури, яка відбувається в стані A (див. рис. 1.2). Інтерпретація такого фрагмента графа станів буде такою:

а) в стані C або D закінчуються процедури, які ініціюють перехід в стан A з відповідною інтенсивністю (λ_{CA} або λ_{DA});

б) коефіцієнтами q_i цей перехід розподіляється між ланцюжками, кожен з яких представлено певною кількістю фаз (фіктивних станів);

в) тривалість перебування в кожному фіктивному стані представлена експоненційним законом розподілу з параметром μ_i .

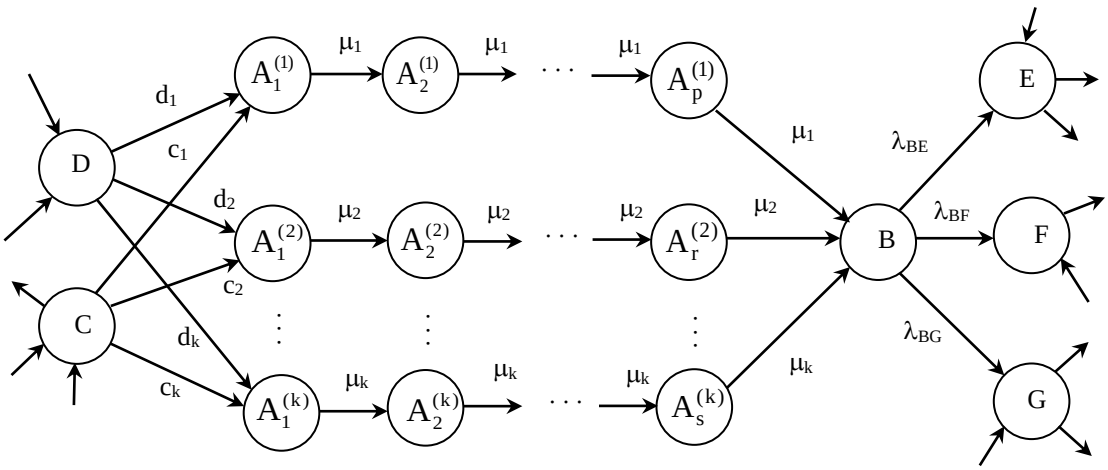

Рисунок 1.2 – Фрагмент графа станів з використанням кількох ланцюжків фіктивних станів. На рисунку використані такі позначення: $d_1 = q_1\lambda_{DA}$; $d_2 = q_2\lambda_{DA}$; $d_k = q_k\lambda_{DA}$; $c_1 = q_1\lambda_{CA}$; $c_2 = q_2\lambda_{CA}$; $c_k = q_k\lambda_{CA}$

Апроксимацію не експоненційно розподіленої тривалості перебування

в стані А функцією виду (1.1) можна використовувати, якщо з стану А існує перехід в один стан В (див. рис. 1.1). Ця обставина обмежує використання методу фаз Ерланга (методу етапів) для розроблення надійнісних моделей відмовостійких систем, де в кожному стані може відбуватися 2 і більше подій. Наприклад, у відмовостійкій системі з мажоритарною структурою це подія "закінчення процедури відновлення" непрацездатного модуля і подія "відмова одного з працездатних модулів". Заміна станів графа з неекспоненційно розподіленими тривалостями ланцюжками фіктивних станів забезпечує перетворення ДНСС немарковського типу в ДНСС марковського типу. Це перетворення здійснюється за рахунок збільшення кількості станів, тобто розширення простору станів. Таке розширення простору станів призводить до відповідного підвищення порядку системи диференціальних рівнянь, яка формується на основі графа станів і переходів.

При розробленні методики апроксимації реального закону розподілу функцією виду (1.1) виникає питання: *чи мають були інтенсивності переходів між фазами однаковими, чи можуть бути різними?* В монографії [155, с. 198 – 199] дана така рекомендація: значення інтенсивностей переходів між фазами можуть бути різними. Але з посиланням на монографію [27] сказано, що так робити не доцільно. Бо апроксимація реального закону розподілу функцією виду (1.1) дозволяє вирішити таку задачу з необхідною точністю.

Методика апроксимації реального закону розподілу для тривалостей відновлення технічної системи після відмови законом розподілу Ерланга показана в статті [100]. Параметри апроксимуючого закону розподілу Ерланга визначаються за допомогою графа станів з двома станами технічної системи: працездатний і непрацездатний стани. Точність апроксимації контролюється порівнянням функції готовності такої системи, визначеної за допомогою графа станів, у якого непрацездатний стан замінений ланцюжком фіктивних станів, і аналітичного виразу для функції готовності такої ж

системи, отриманого без використання методу фаз Ерланга безпосереднім розв'язанням системи диференціальних рівнянь. Необхідна точність апроксимації досягається шляхом підбору значень інтенсивностей переходів між фіктивними станами ланцюжка, а також зміною порядку закону Ерланга. Практичне використання такої методики потребує автоматизації процесу визначення параметрів ланцюжка фіктивних станів.

Як показує огляд наукових публікацій, основним об'єктом практичного використання методу фаз Ерланга є СМО. В надійнісному моделюванні відмовостійких систем використання цього методу є рідкістю. Це пов'язано з великими розмірностями (сотні і тисячі станів) надійнісних моделей відмовостійких систем у вигляді графа станів і переходів.

Велика працеємність використання методу фаз Ерланга для трансформації графа станів великої розмірності і висока ймовірність внесення в них помилок стримує його практичне використання в процесі розв'язання проектних задач. Тому актуальною є задача створення методики розроблення графа станів з високим ступенем формалізації використання методу фаз Ерланга і придатної для автоматизації. А таку можливість надає метод побудови графа станів на основі структурно-автоматної моделі.

Висновок до пункту 1.4.1: У випадку не експоненційно розподіленої тривалості перебування хоча б в одному із станів, що часто зустрічається на практиці, поширеними методами побудови та аналізу моделі є метод вкладених ланцюгів Маркова, метод стадій та напівмарковські випадкові процеси. Зазначені методи мають, як свої достоїнства, так і ряд суттєвих недоліків, що обмежує їх застосування в системотехнічному проектуванні інформаційних систем. Метод вкладених ланцюгів Маркова орієнтований на аналіз стаціонарного режиму ДНСС, отже не дає можливості отримати всі необхідні показники. Метод стадій дозволяє отримати показники як для стаціонарного так і для перехідного режимів, але побудова моделі є дуже трудомісткою і вимагає високої кваліфікації виконавця. Крім того, велика

громіздкість неформалізованої побудови математичних моделей складних систем за цим методом тягне за собою високу ймовірність внесення в модель помилок, які в подальшому важко виявити. Застосування в якості моделі напівмарковського випадкового процесу, як показано в роботі [115], при не експоненційному розподілі тільки однієї випадкової величини підвищує точність моделювання (до 10%), однак приводить до значного ускладнення моделі. Крім того „ручна" побудова моделі робить даний підхід малопридатним в практиці системотехнічного проектування ПТК при значній кількості станів. Метод експоненційної апроксимації дискретно-неперервних випадкових процесів з неекспоненційними розподілами часу перебування в окремих або в усіх станах дає граничну оцінку [37; 136] і застосовується часто вимушено, коли закони розподілу не є відомими. Але у випадках, коли закони розподілу для часу перебування у всіх станах є відомими, використання для розроблення моделі методів, перелічених вище, супроводжуються: збільшенням розмірності моделі (в порівнянні з моделлю, при розробленні якої використано метод експоненційної апроксимації); додатковими технологічними операціями для її побудови.

1.4.2 Комплексне моделювання функціональної та надійнісної поведінки складних технічних систем

Підхід, в якому задача моделювання об'єктів проектування (дослідження) вирішується декомпозицією на задачі функціонального і надійнісного проектування, маючи певні достоїнства, все таки створює для проектанта незручності, коли треба отримати відповідь на питання: як впливає ненадійність апаратних засобів на показники ефективності системи.

В довіднику [139, с.111–130] описані способи розв'язання такої задачі для систем короткотривалого та довготривалого використання. Для оцінки ефективності функціонування систем використовуються ймовірнісні моделі, які не враховують реальну функціональну та надійнісну поведінку об'єкта дослідження (проектування).

Нами виявлені публікації [25; 58; 64; 66], в яких автори підтверджують актуальність створення комплексних моделей структури та алгоритмів функціональної і надійнісної поведінки, відзначаючи складність розв'язання такої задачі за відомою методологією.

В роботі [58] "Функціонально-надійнісне моделювання безпровідних комунікаційних систем" проведено огляд сучасних моделей для моделювання безпровідних коміркових мереж зв'язку. Цінність запропонованих моделей в тому, що в них враховується і функціональна поведінка, і надійнісна поведінка коміркових мереж зв'язку, оскільки їх розрізнене представлення не дає змоги отримати достовірні кількісні показники ефективності мережі зв'язку. Розглянуто побудову моделі автоматичного захисного переключення (комутації) для TDMA (Time Division Multiple Access – груповий доступ з часовим розділенням каналів) системи, яка складається з ретрансляторів і каналу керування. Приведено модель системи в класі мереж Петрі і дві моделі у вигляді графа станів та переходів: модель Ерланга з втратами; ієрархічна марковська модель. Марковські моделі автори будують за традиційною технологією.

Висновок до підрозділу 1.4. Проведений аналіз існуючого стану проблеми моделювання алгоритмів функціональної і надійнісної поведінки ПТК та їх систем, як ДНСС марковського і немарковського типу дозволяє зробити наступні висновки:

1. Для моделювання поведінки сучасних інформаційних систем широке застосування знаходять марковські моделі.
2. Спостерігається інтерес дослідників до комплексних моделей, які враховують як функціональну так і надійнісну поведінку об'єктів проектування.
3. Складність аналітичних моделей ДНСС заставляє розробників шукати підходів до формалізації та автоматизації їх побудови та аналізу.

1.5 Практичне моделювання функціональної і надійнісної поведінки складних технічних систем

Тепер розглянемо інформацію з наукових публікацій, які мають прикладний характер, і відображають при розв'язанні задач моделювання тенденції використання ДНСС.

В роботі [9] „Методологія аналізу споживаної потужності в безпровідних комунікаційних системах" запропоновано методологію для проектування мобільних комп'ютерно-комунікаційних систем з низьким енергоспоживанням. В основу цієї методології покладено марковську модель у вигляді дискретно-неперервного випадкового процесу з обмеженою кількістю станів, розробка якої є „ручною".

В роботі [1] „Марковський алгоритм моделювання каналу зв'язку безпровідних мереж" показано, що для моделювання каналів зв'язку сучасних цифрових комунікаційних мереж типу GSM (Global System for Mobile Communication – глобальна система мобільного зв'язку) та CDMA (Code Division Multiple Access – груповий доступ з кодовим розділенням каналів) найбільш прийнятною є марковська модель.

Застосування марковських моделей при проектуванні інформаційних систем представлено також в роботах [11; 26; 35; 38; 45; 53; 65]. Відзначимо, що побудова моделей у всіх роботах здійснюється „вручну".

В роботі [11] „Моделювання і симуляція каналу в HASP системах" приведено напівмарковську аналітичну модель функціонування каналу мобільних комунікаційних систем. Запропоновано моделі з двома і трьома станами з використанням для інтервалів часу перебування в станах неекспоненційних розподілів: логарифмічного-нормального, Релея, Райса. Побудова і аналіз моделі є "ручними".

В роботі [45] „Аналіз гібридних ARQ стратегій типу II в середовищах передавання пакетів DS-CDMA" для моделювання трафіку CDMA телекомунікаційних систем запропоновано аналітичну марковську модель і

отримано формули для визначення ймовірності перебування системи у певних станах. Побудова і аналіз моделі є “ручними”. Для підтвердження правильності результатів моделювання використовується імітаційне моделювання.

В роботі [59] „Проблеми симуляції і аналізу мобільних сателітарних систем” розглядається проблема забезпечення достовірності результатів моделювання радіоелектронних низькоорбітальних систем мобільного зв’язку. Цю задачу автор пропонує вирішувати шляхом моделювання системи двома принципово різними способами і порівнянням результатів. Перший спосіб – побудова аналітичної марковської моделі. Другий спосіб – побудова імітаційної моделі.

В роботі [56] ”Стохастичне моделювання і аналіз мобільних комунікаційних систем 3-го покоління” показано, що для моделювання складних систем необхідно застосовувати засоби автоматизованої побудови моделі. Мобільна комунікаційна система 3-го покоління (G3) моделюється за допомогою мережі Петрі. Оскільки трудоємність процесу побудови моделі велика, то для автоматизації запропоновано використовувати мову моделювання систем UML (Unified Modeling Language). Щоб перейти від об’єкта до UML-моделі необхідно виконати ряд досить громіздких процедур і мати високу кваліфікацію виконавця в користуванні мовою UML.

Підходи до розв’язання задачі формалізації та автоматизації процесу моделювання розглядаються також в роботах [9; 60].

В роботі [13] „Аналіз продуктивності коміркових мереж із довільним розподілом для інтервалів часу між моментами передачі” розглядаються шляхи підвищення точності моделювання заміною експоненційного розподілу, для інтервалів часу між моментами передачі, розподілом ближчим до реального. Таким розподілом є гіперекспоненційний розподіл, який при побудові марковської моделі можна реалізувати використовуючи метод фаз Ерланга (метод стадій). В статті проведено порівняльний аналіз результатів

моделювання проведеного трьома методами і показано, що неточності, які мають місце при застосуванні експоненційного розподілу можуть приводити до серйозних помилок при проектуванні коміркової мережі зв'язку. Автори статті вказують, що актуальною є задача розробки алгоритму формалізованої апроксимації реальних випадкових процесів марковським випадковим процесом із скінченним простором станів і неперервним часом.

Апроксимація реальних випадкових процесів марковським випадковим процесом використовується в роботах [24; 59]. Проблема адекватності моделей з об'єктами проектування розглядається в роботах [14; 68]. В переважній більшості робіт для моделювання поведінки використовуються марковські моделі.

Помітним досягненням в серед універсальних аналітичних надійнісних моделей у 80-х роках була програмна надійнісна модель необслуговуваних відмовостійких систем ASNA, математичне забезпечення якої описано в монографії [153]. Ця надійнісна модель дозволяла враховувати:

- деградацію структури у відмовостійкій системі;
- показники ефективності засобів контролю, діагностики і перемикання;
- втрати інформації при порушеннях працездатності;
- вплив затрат часу, необхідного для автоматичного відновлення працездатності, на показники надійності.

Заданням параметрів програмна надійнісна модель настроювалась на потрібне технічне рішення, в рамках тих відомих рішень, які були закладені при побудові моделі. Очевидно, що поява нових технічних рішень вимагала модернізації моделі, або розробки нової її версії.

Саме в кінці 80-х років виникла постановка задачі про створення такого засобу автоматизованої побудови надійнісної моделі, який був би "прив'язаний" до заданого технічного рішення побудови відмовостійкої системи. Відтоді до традиційного підходу в теорії надійності по створенню

надійнісних моделей відмовостійких систем для відомих вже в практиці технічних рішень, додався ще один напрям. Мова йде про розробку такої технології моделювання, яка б дозволяла проектанту відмовостійкої системи без спеціальної математичної підготовки і за час прийнятний для етапу системотехнічного проектування ПТК самостійно створювати надійнісні моделі для нових технічних рішень та вирішувати задачі надійнісного проектування.

В роботі [140, с. 96 – 102] сформульовано підхід до алгоритмізації надійнісного синтезу та моделювання надійності з використанням математичного апарату марковських процесів і мови операторних виразів відмовостійкої системи, який на думку авторів є теоретичною основою для автоматизації розрахунку надійності та оптимізації їх структури. Однак подальшого розвитку цього підходу в наукових публікаціях не виявлено.

1.6 Тенденції розвитку засобів автоматизації системотехнічного проектування структур та алгоритмів поведінки складних технічних систем

В роботі [141] автори представляють розроблене математичне забезпечення і комплекс програм для надійнісного проектування інформаційних мереж зв’язку. Комплекс програм включає в себе:

1) програму формування множини шляхів передачі інформації між полюсами інформаційної мережі зв’язку;

2) програму розрахунку надійності (живучості) двополюсної інформаційної мережі зв’язку кореляційним методом;

3) програму введення додаткових ліній зв’язку і підвищення живучості вузлів комутації;

4) програму розрахунку ємності ребер і вузлів комутації системи зв’язку;

5) програму розрахунку надійності (живучості) багатополюсної системи зв’язку в цілому.

Одним з провідних розробників засобів автоматизованого надійнісного аналізу складних технічних систем і виробників відповідного програмного забезпечення є фірма ReliaSoft (США) (http://www.reliasoft.com). ReliaSoft розробила ряд програмних засобів, які об'єднано у **Relex Reliability Studio 2007** [69]:

- **Xfmea Standard, RCM ++, MPC 3** – засоби для аналізу ризику для користувачів, пов'язаного з відмовами технічних засобів (FMEA – технологія забезпечення якості).
- **RENO** – засоби для комплексного надійнісного аналізу з можливістю врахування особливостей стратегій технічного обслуговування;
- **Weibull++** – для надійнісного аналізу життєвого циклу виробів при різних законах розподілу;
- **ALTA 6 PRO** – засоби для проведення пришвидшених випробувань надійності;
- **BlockSim 6** – засоби для оцінки надійності по структурних схемах надійності;
- **RGA 6** – засоби для оцінки надійності систем, для яких передбачено ремонт.

Відомим є програмний засіб **CSIM** для автоматизованої побудови імітаційних моделей складних систем [74]. Він призначений для моделювання поведінки складних систем.

Фірма The Telelogic Systems and Software Modeling Business Unit* (SSMBU) – розробляє програмні засоби автоматизації для розробки складних систем [70], а саме:

- **Statemate** – комплекс засобів які поєднують графічну побудову моделей, імітаційне моделювання, засоби для генерування коду програм та документації і засоби для тестування. Використовується для розроблення систем в аерокосмічній та оборонній областях.
- **Rhapsody** – засіб моделювання, призначений для створення графічних

моделей систем, у відповідності до яких автоматично будується імітаційна модель. Засіб базується на технологіях UML, SysML, DoDAF. Призначений для аналізу вбудованих систем (на основі однокристальних ЕОМ).

- **Telelogic TAU** – засоби візуального моделювання на основі технологій UML (Unified Modeling Language) 2.0, SysML (Systems Modeling Language), SDL (Specification and Description Language), TTCN-2 та TTCN-3, DoDAF.

Система моделювання **Möbius** [71] – призначена для створення моделей поведінки складних систем. Система розроблялась, як засіб аналізу надійності та живучості комп'ютерних систем і мереж. На даний час система придатна для моделювання: інформаційних систем та мереж; систем безпровідного і традиційного зв'язку (аналіз апаратного і програмного забезпечення); космічних та авіаційних систем; комерційних та урядових систем захисту інформації; біологічних систем. Система дозволяє отримати кількісні показники надійності, живучості, безпеки та функціональні показники. В системі використано математичний апарат: ланцюги Маркова, мережі Петрі та мова алгебр стохастичних процесів. Процес моделювання полягає у створенні компонентів системи на основі аналізу її поведінки з подальшим об'єднанням їх в модель системи.

Інші відомі програмні засоби описані в [120] дають можливість моделювати роботу телекомунікаційної мережі. Наприклад, програма COMNET III [72] моделює мережі ATM, Frame Relay, зв'язок LAN-WAN, SNA, та деякі інші. Програми NetCracker та NetMaker XA [73] мають великі бібліотеки з наборами компонентів. В цих програмних засобах передбачена можливість для створення і своїх компонент мережі. Вартість цих програмних засобів (10000 – 40000 $) [72], а робота з ними потребує спеціальної підготовки користувача.

Висновок до підрозділу 1.6. Проведений огляд показав, що більшість розробників засобів автоматизації системотехнічного проектування зорієнтовані на технологію імітаційного моделювання. Технологія аналітичного моделювання має обмежене застосування в засобах автоматизації системотехнічного проектування через недостатній рівень

формалізації побудови моделей. Існують дві тенденції розвитку систем автоматизації системотехнічного проектування: це створення як проблемно-орієнтованих систем, так і систем не прив’язаних до конкретного об’єкту.

1.7 Висновки до розділу 1

1. В практиці системного аналізу структур та поведінки ДНСС має місце технологія аналітичного моделювання на основі використання марковського процесу. Однак її практичне використання на етапі системотехнічного проектування ПТК обмежує складність, велика трудоємність розроблення моделі у вигляді графа станів і переходів і велика ймовірність внесення помилки в таку модель. А це робить цю технологію моделювання недоступною при аналізі складних об’єктів і змушує проектанта користуватись спрощеними моделями, а іноді обмежитись інтуїтивним рішенням задачі.

2. У випадках, коли умова про експоненційний закон розподілу часів перебування в певних станах є неприйнятною (оскільки є відомими реальні закони розподілу, які не є експоненційними), відомі два підходи до розв’язання задачі аналізу:

а) проводять аналіз об’єкта дослідження як ДНСС марковського типу і враховують, що отримані результати аналізу становлять граничні або наближені оцінки показників ефективності [115; 123];

б) проводять аналіз об’єкта дослідження як ДНСС немарковського типу, для чого адаптують марковську модель до реальних законів розподілу [7; 8; 17; 22; 23; 31; 32; 33; 37; 47; 48; 49; 54; 55; 67; 112; 119; 121; 124; 127; 129; 131; 139; 154; 155; 161; 171]. Проте цей підхід потребує подальшого вдосконалення в сенсі його формалізації.

3. Існуючі засоби автоматизації системотехнічного проектування, як правило, прив’язані до особливостей конкретних комплексів і їх розроблення здійснюється для кожного конкретного типу ПТК [78; 83; 90; 141; 153; 160; 170]. Тому актуальною є задача створення засобів автоматизації системотехнічного проектування ПТК, які мають високий ступінь

формалізації процесу розроблення моделей представлення структури та поведінки і відповідних методів їх аналізу, синтезу.

4. У відомих засобах автоматизації системотехнічного проектування найбільшого поширення отримала технологія імітаційного моделювання. Однак залишається актуальним питання про доцільність використання і аналітичних моделей (наприклад, [160, с. 267]). Але доведення величезного доробку методів створення аналітичних моделей ДНСС до використання в системах автоматизованого проектування у відомих публікаціях не зустрічається. Однак, враховуючи те, що на етапі системотехнічного проектування розв'язання задач дослідження кількома різними методами для забезпечення достовірності результатів, задачі удосконалення технологій імітаційного та аналітичного моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем залишаються актуальними.

5. Розроблення математичного забезпечення проблемно-орієнтованих засобів системного аналізу є одним із актуальних напрямків розвитку теорії системотехнічного проектування ПТК.

6. На основі проведеного дослідження можна сформулювати наступні *напрямки досліджень по проблемі автоматизації побудови аналітичних дискретно-неперервних стохастичних моделей*:

а) введення комп’ютерної підтримки в процес розроблення структурно-автоматних моделей дискретно-неперервних стохастичних систем;

а) підвищення ступеня формалізації методу трансформації моделі ДНСС у вигляді графа станів та переходів для формування необхідних законів розподілу для тривалостей процесів, які відбуваються в об'єкті дослідження (моделювання);

б) удосконалення технології моделювання ДНСС, зокрема таких її складових, як методика валідації структурно-автоматних моделей об'єктів дослідження, метод автоматизованого вибору методу розв'язання системи диференціальних рівнянь, в залежності від її розмірності та жорсткості;

в) розроблення алгоритмічного і програмного забезпечення для автоматизованої побудови аналітичних дискретно-неперервних стохастичних моделей.

РОЗДІЛ 2
МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНО-АВТОМАТНИХ МОДЕЛЕЙ ВІДМОВОСТІЙКИХ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

У розділі представлена методика розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів з альтернативними продовженнями випадкових процесів після закінчення процедур контролю, діагностики, перемикання і відновлення, яка базується на запропонованих методах. Новизна методики розроблення структурно-автоматної моделі полягає в тому, щоб в першу чергу здійснити розроблення опорного графа станів і переходів. А відтак на основі цього графа станів за допомогою запропонованого методу визначаються компоненти структурно-автоматної моделі. Останнім етапом розроблення структурно-автоматної моделі є її валідація. Методика розроблення структурно-автоматних моделей забезпечує безпомилкову їх побудову і її трудомісткі процедури піддаються автоматизації.

2.1 Метод визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів та переходів

Для забезпечення можливості автоматизованої побудови САМ запропоновано метод визначення їх компонент на основі опорного графа станів та переходів. Компонентами САМ є: базові події; формалізований опис всіх ситуацій, в яких може відбуватися базова подія (складається для всіх базових подій); формули розрахунку інтенсивностей переходів (ФРІП) із стану в стан (формули компонуються для кожної ситуації); правила модифікації компонент вектора стану (ПМКВС) (правила складаються (формуються) для кожної ситуації).

Для складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких може

відбуватися кожна базова подія, необхідно їх виявити. Для виявлення ситуацій з таблиці, в якій представлено граф станів, вибираються всі стани, що утворюються (формуються) після БП1 з урахуванням всіх альтернативних продовжень процесу. До цих станів також з таблиці вибираються стани, що їм передують. Саме ці попередні стани забезпечують складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких відбувається БП1. Такі дії виконуються для всіх наступних базових подій.

Слід зауважити, що для компактного представлення САМ необхідно розглянути можливість об'єднання ситуацій і компонент, яке виконується за такими правилами:

Правило 1: Якщо для різних ситуацій ФРІП і ПМКВС є однаковими, то такі ситуації в САМ можна об'єднати. Для цього треба модифікувати формалізований опис ситуації, а саме компоненти вектора стану, які мають різні значення записуються через оператор OR. Якщо здійснюється переведення САМ від конкретного значення параметра до його символьного позначення, то об'єднання ситуацій можна (треба) проводити після завершення цієї процедури.

Правило 2: Якщо в одній ситуації є однаковими ПМКВС для різних альтернатив, то компоненти САМ для такої ситуації слід об'єднати. Для цього треба ФРІП представити сумою двох формул.

Визначені компоненти САМ заносимо в таблицю, форма якої відповідає формі діалогового вікна програмного засобу.

На рисунку 2.1 представлено розроблений алгоритм, в якому реалізовано запропонований метод розроблення САМ на основі опорного графа станів і переходів. На основі цього алгоритму розроблено алгоритм програми і програмний модуль для комп’ютерної підтримки процесу побудови САМ.

Побудова структурно-автоматної моделі за розробленим алгоритмом показана на прикладі відмовостійкої системи з однократним резервуванням в підпунктах 2.4.4 і 2.4.5.

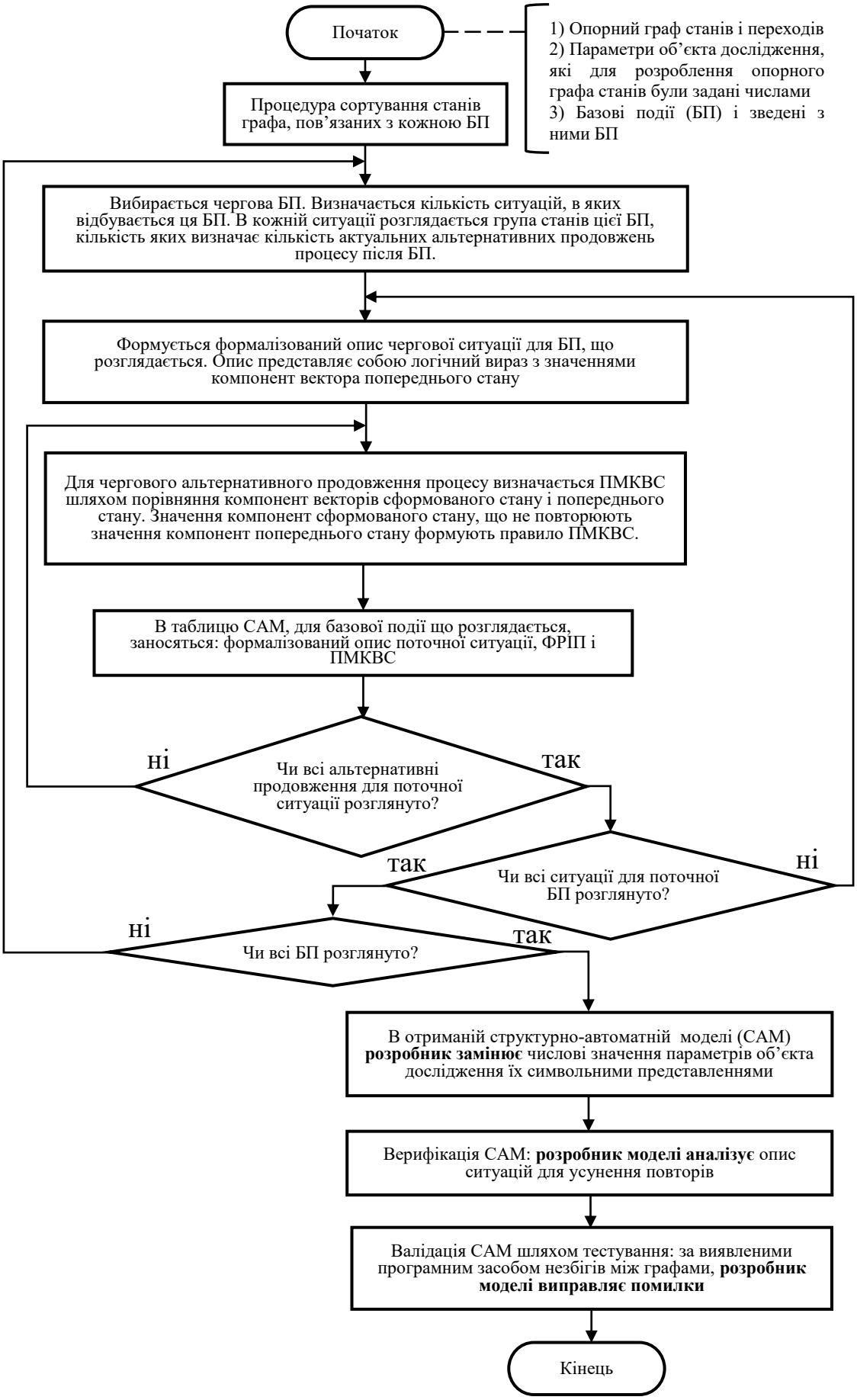

Рисунок 2.1 – Блок-схема алгоритму, в якому реалізовано метод розроблення структурно-автоматної моделі на основі опорного графа станів і переходів

2.2 Метод побудови опорного графа станів та переходів на основі базових подій

В основу метода побудови опорного графа станів і переходів покладено базові події поведінки відмовостійкого ПТК. Базовою називаємо подію, яка ініціює зміну стану відмовостійкої системи. Тому базовими вважаються події, які представляють момент закінчення процедури. Наприклад, «закінчення процедури контролю», «закінчення процедури діагностики», «закінчення процедури перемикання», «закінчення процедури відновлення» і т.д. Закінчення процедури може бути успішним або неуспішним. Тому в модель вводиться показник ефективності процедури – ймовірність успішного завершення процедури. До базових подій у відмовостійких ПТК відносимо момент втрати працездатності її складових. Якщо розробник приймає рішення, що тривалість процедури, яку завершає базова подія, в моделі буде дорівнювати нулю, то ця базова подія стає зведеною з базовою подією попередньої процедури.

Суть метода побудови опорного графа станів полягає в наступному. Розробник задає компоненти вектора стану та їх початкові значення. Кількість компонент визначає ступінь адекватності моделі. Початкові значення компонент вектора стану представляють перший вектор стану (перший стан графа). Для першого вектора стану визначаються актуальні базові події. Для кожної актуальної базової події розробник встановлює всі альтернативні продовження та вводить позначення їх ймовірностей. Для кожної базової події і для кожного її альтернативного продовження розробник вносить зміни значень компонент вектора стану. Таким чином він формує нові вектори стану. Перш ніж присвоювати отриманим (сформованим) векторам стану нові порядкові номери треба перевірити, чи отримані вектори не повторюють попередні вектори станів, які вже мають порядкові номери. Векторам, які повторюють попередні вектори станів присвоюються їх номери. Векторам, які не повторюють попередні вектори

станів присвоюються наступні (чергові) порядкові номери. Після встановлення порядкових номерів для сформованих векторів стану, фіксуються переходи між першим і сформованими векторами стану. Для кожного переходу компонується формула для визначення інтенсивності переходу та правило модифікації компонент вектора стану.

Описана вище послідовність дій виконується для другого і всіх наступних векторів станів. В результаті будуть отримані всі стани графа, а також переходи між станами та формули для визначення інтенсивностей цих переходів. Для подальшої роботи є зручним табличне представлення графа станів та переходів.

На рисунку 2.2 представлено розроблений алгоритм, в якому реалізовано запропонований метод побудови опорного графа станів і переходів на основі базових подій. На основі цього алгоритму розроблено алгоритм програми і програмний модуль для комп'ютерної підтримки процесу побудови опорного графа станів.

Побудова опорного графа станів і переходів за розробленим алгоритмом показана на прикладі відмовостійкої системи з однократним резервуванням в підпунктах 2.4.1, 2.4.2 і 2.4.3.

2.3 Метод валідації структурно-автоматних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів

В основу методу валідації САМ покладено принцип звіряння тестового графа і графа, отриманого на основі САМ. Для виявлення помилок в САМ, звіряння графів виконується в три етапи: на першому – звіряються вектори станів, на другому – звіряються переходи між станами, на третьому – звіряються значення інтенсивностей переходів. Такий порядок звіряння дозволяє прискорити локалізацію помилок і відповідно зменшити затрати часу на їх пошук і виправлення. На рисунку 2.3 представлено розроблений алгоритм, в якому наведені етапи методу валідації.

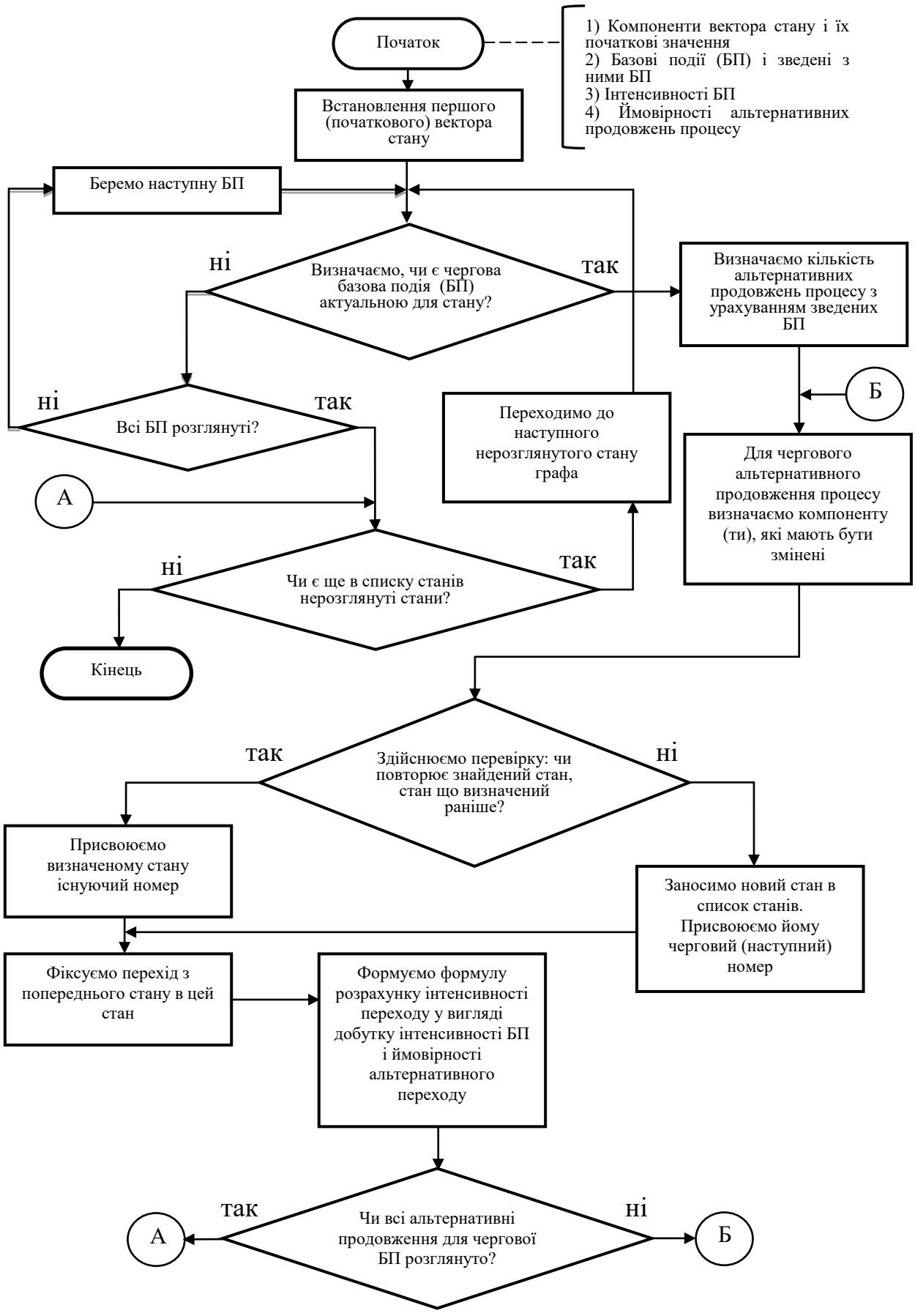

Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму, в якому реалізовано метод побудови опорного графа станів і переходів на основі базових подій

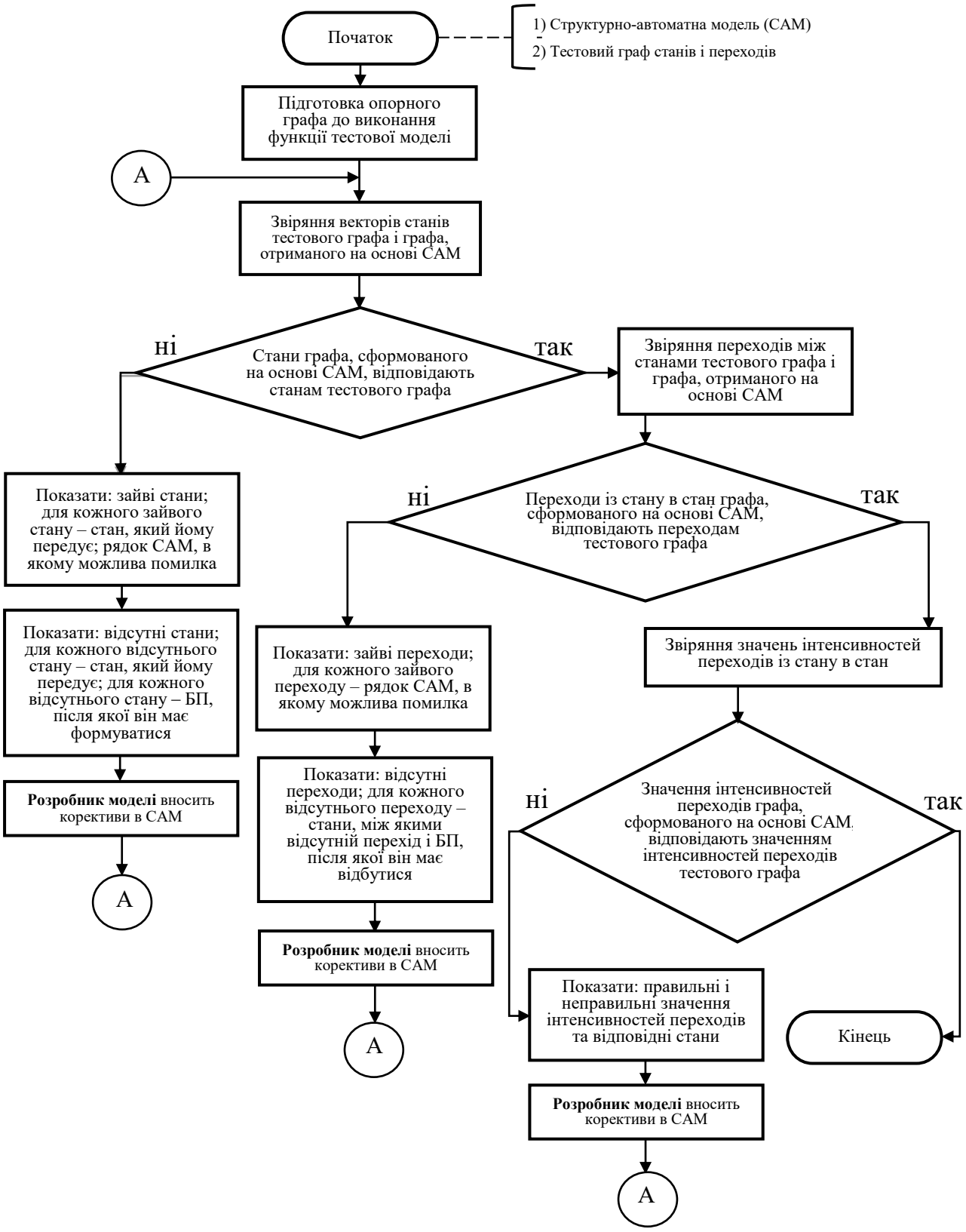

Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму, в якому реалізовано метод валідації структурно-автоматної моделі

2.4 Методика розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів і переходів

Методика розроблення САМ подана разом з прикладом її реалізації для відмовостійкої системи з однократним гарячим резервуванням програмно-апаратного модуля (ПАМ), з урахуванням показників ефективності засобів контролю, перемикання та процедури відновлення. Для несправного ПАМ передбачено відновлення (заміна). Кількість відновлень обмежена.

Щоб показати ефективність методики, виконано порівняння значень показників надійності такої відмовостійкої системи з показниками надійності, отриманими за допомогою надійнісних моделей без урахування показників ефективності засобів контролю, перемикання та процедури відновлення та з необмеженою кількістю відновлень.

Показники надійності і ефективності складових відмовостійкої системи, які представлені в розробленій надійнісній моделі: інтенсивність відмов основного (працюючого) ПАМ – λ_o; інтенсивність відмов ПАМ, який перебуває в резерві – λ_r; ймовірність успішного виконання процедури контролю – P_{uk}; тривалість процедури контролю – t_k; ймовірність успішного виконання процедури перемикання – P_{up}; тривалість процедури перемикання – t_p; ймовірність успішного виконання процедури відновлення – P_{uv}; кількість обумовлених (запланованих) відновлень (замін) ПАМ – K_V; середнє значення тривалості процедури відновлення (заміни) ПАМ – t_v.

2.4.1 Визначення базових подій алгоритму поведінки відмовостійкої системи

Для визначення базових подій необхідно прийняти до уваги всі процеси і процедури, які включені в алгоритм поведінки відмовостійкої системи після відмови основного або резервного ПАМ. Для процедур властивими є події, які представляють їх початок і закінчення. Кожна

процедура характеризується середнім значенням її тривалості. Події, що представляють закінчення процедури вважаються базовими подіями. Для відмовостійкої системи, що розглядається, базові події подані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Події надійнісної поведінки відмовостійкої системи з однократним резервуванням

Пор. №	Подія - початок	Подія - закінчення	Сер. знач. тривалості
1	Початок роботи ПАМ (з моменту початку експлуатації або з моменту підключення після чергової відмови працюючого ПАМ)	БП1: Відмова основного (працюючого) ПАМ	$1/\lambda_o$
2	Початок процедури контролю (з моменту появи відмови ПАМ)	БП2 : Закінчення процедури контролю	t_k
3	Початок процедури перемикання	БП3: Закінчення процедури перемикання	t_p
4	Початок процедури відновлення несправного ПАМ	БП4: Закінчення процедури відновлення несправного ПАМ	$t_в$
5	Початок перебування ПАМ в резерві	БП5: Відмова ПАМ підчас перебування в резерві	$1/\lambda_г$

Зауважимо, що базові події БП2 і БП3 в моделі будуть зведеними з БП1, так як тривалості процедур контролю і перемикання є значно меншими від тривалостей безвідмовної роботи основної і резервної ПАС і від тривалості відновлення. В подальшому позначення цих подій буде таким: ЗБП2 і ЗБП3

2.4.2 Обґрунтування компонент вектора, який має представляти стан відмовостійкої системи

Компонента V1 представляє стан основного (працюючого) ПАМ. Ця компонента може приймати такі значення: V1 = 1 – ПАМ працездатний, V1 = 0 – ПАМ непрацездатний. Початкове значення компоненти V1 = 1. Компонента V2 представляє стан ПАМ, який перебуває в резерві. Ця компонента може приймати такі значення: V2 = 1 – ПАМ працездатний, V2 = 0 – ПАМ непрацездатний. Початкове значення компоненти V2 = 1. Компонента V3 представляє поточне значення кількості використаних відновлень ПАМ. Ця компонента може приймати такі значення: V3 = 0, 1, ..., K_V. Початкове значення компоненти V3 = 0. Компонента V4 представляє поточне значення кількості ПАМ у відмовостійкій конфігурації, яка враховує

вилучення непридатного для подальшої експлуатації ПАМ. Ця компонента може приймати такі значення: V4 = 2, 1, 0. Початкове значення компоненти V4 = 2.

Умова виникнення критичної відмови (КВ) для відмовостійкої системи, що розглядається, формулюється так: критична відмова настає тоді, коли на позиції основного ПАМ залишається не працездатний ПАМ. Формалізоване представлення умови виникнення КВ має такий вигляд: (V1=0).

2.4.3 Розроблення опорного графа станів за методикою його побудови на основі базових подій

Вхідними даними є: базові події алгоритму поведінки відмовостійкої системи, компоненти вектора стану, показники надійності основного і резервного ПАМ, показники ефективності засобів контролю та перемикання та показник ефективності процедури відновлення. Кількість обумовлених відновлень для ПАМ $K_V = 2$. Результати побудови заносимо в таблицю 2, де в колонку 1 заносимо номер кроку; в колонку 2 – номер попереднього стану, що розглядається, і номер актуальної базової події; в колонку 3 – ймовірності альтернативного продовження процесу; в колонки 4, 5, 6 і 7 – значення компонент вектора стану, що наступає після базової події; в колонку 8 – присвоєний номер стану; в колонку 9 – перехід із стану в стан: номер попереднього стану, з якого здійснюється перехід (номер стану береться з колонки 2), і номер наступного стану, в який здійснюється перехід (номер стану береться з колонки 8); в колонку 10 – формула розрахунку значення інтенсивності переходу із стану в стан (ФРІП).

Розроблення опорного графа станів здійснюється в такій послідовності:

Крок 1. Формуємо початковий стан графа: V1 = 1, V2 = 1, V3 = 0, V4 = 2. Присвоюємо йому №1.

Крок 2. Розглядаємо стан 1. Визначаємо, чи є актуальною для цього стану базова подія БП1: вона є актуальною, бо основний ПАМ до цієї події

був працездатним. При цьому треба врахувати, що з БП1 є зведеними ЗБП2 і ЗБП3 і саме вони ініціюють 3 альтернативні продовження процесу з ймовірностями $P_{uk}P_{up}$, $(1\text{-}P_{uk})$ і $P_{uk}(1\text{-}P_{up})$. З першим альтернативним продовженням БП1 ініціює переведення резервного ПАМ в режим основного (працюючого) V2:=0 і початок процедури відновлення несправного ПАМ V3:=V3+1. Так як цей стан {V1 = 1, V2 = 0, V3 = 1, V4 = 2} отримано вперше, то йому присвоюється № 2. Фіксується перехід із стану 1 в стан 2. Так як інтенсивність БП1 становить λ_o, то інтенсивність переходу визначається за формулою $\lambda_o P_{uk}P_{up}$. З другим і третім альтернативними продовженнями БП1 не ініціює переведення резервного ПАМ в режим основного (працюючого). Це означає, що відмовостійка система попадає в стан критичної відмови (КВ) V1:=0. Разом з цим друге альтернативне продовження, обумовлене неуспішним закінченням процедури контролю призводить до вилучення несправного ПАМ з відмовостійкої конфігурації V4:=V4-1. Третє альтернативне продовження, обумовлене успішним закінченням процедури контролю і неуспішним закінченням процедури підключення резервного ПАМ, призводить (дає команду) до початку процедури відновлення V3:=V3+1.

Крок 2а. Продовжуємо розгляд стану 1. Визначаємо, чи є актуальною для цього стану базова подія БП4? Ні, вона не є актуальною бо жодний ПАМ в цьому стані не перебуває в ремонті.

Крок 3. Продовжуємо розгляд стану 1. Визначаємо, чи є актуальною для цього стану базова подія БП5? Так, вона є актуальною бо резервний ПАМ в цьому стані відмовостійкої системи до цієї події був працездатним. При цьому треба врахувати, що з БП5 є зведеною ЗБП2 і саме вона ініціює 2 альтернативні продовження процесу з ймовірностями P_{uk} і $(1\text{-}P_{uk})$. З першим альтернативним продовженням БП5 ініціює початок процедури відновлення несправного ПАМ V2:=0 і V3:=V3+1. Так як сформований стан {V1 = 1, V2 = 0, V3 = 1, V4 = 2} повторює стан № 2, то йому присвоюється такий же номер. Так як інтенсивність БП5 становить λ_r, то інтенсивність переходу визначається за формулою $\lambda_r P_{uk}$. Друге альтернативне продовження,

обумовлене неуспішним закінченням процедури контролю, призводить до вилучення несправного ПАМ з відмовостійкої конфігурації V2:=0 і V4:=V4-1. Так як сформований стан {V1 = 1, V2 = 0, V3 = 0, V4 = 1} отримано вперше, то йому присвоюється №3. Фіксується перехід із стану 1 в стан 3. Так як інтенсивність БП5 становить $\lambda_г$, то інтенсивність переходу визначається за формулою $\lambda_г(1-P_{uk})$.

Ці і всі подальші результати побудови графа станів на кроках з 4 до 14 представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Граф станів і переходів для відмовостійкої системи з кількістю відновлень ПАМ $K_V = 2$

№ кроку	Стан, що розгляд. і актуал. БП	Ймовірності альтернативного продовження процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану	Переходи з стану в стан	ФРІП
			V1	V2	V3	V4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Початковий стан	--	1	1	0	2	1	--	--
2	1БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	1	2	2	1 → 2	$\lambda_o P_{uk}P_{up}$
		$(1- P_{uk})$	0	1	0	1	КВ	1 → КВ	$\lambda_o (1-P_{uk})$
		$P_{uk} (1 - P_{up})$	0	1	1	2	КВ	1 → КВ	$\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$
3	1БП5 (ЗБП2)	P_{uk}	1	0	1	2	2	1 → 2	$\lambda_р P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	1	0	0	1	3	1 →3	$\lambda_р(1- P_{uk})$
4	2БП1 (ЗБП2)	P_{uk}	0	0	2	2	КВ	2 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	0	0	1	1	КВ	2 → КВ	$\lambda_o (1-P_{uk})$
5	2БП4	P_{uv}	1	1	1	2	4	2 → 4	μP_{uv}
		$(1 - P_{uv})$	1	0	1	1	5	2 → 5	$\mu (1 - P_{uv})$
6	3БП1 (ЗБП2)	P_{uk}	0	0	1	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	0	0	0	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_o (1-P_{uk})$
7	4БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	2	2	6	4 → 6	$\lambda_o P_{uk}P_{up}$
		$(1- P_{uk})$	0	1	1	1	КВ	4 → КВ	$\lambda_o (1-P_{uk})$
		$P_{uk} (1 - P_{up})$	0	1	2	2	КВ	4 → КВ	$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$
8	4БП5 (ЗБП2)	P_{uk}	1	0	2	2	6	4 → 6	$\lambda_р P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	1	0	1	1	5	4 → 5	$\lambda_р(1- P_{uk})$
9	5БП1 (ЗБП2)	P_{uk}	0	0	2	1	КВ	5 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	0	0	1	0	КВ	5 → КВ	$\lambda_o (1-P_{uk})$
10	6БП1	P_{uk}	0	0	2	1	КВ	6 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	0	0	2	1	КВ	6 → КВ	$\lambda_o(1- P_{uk})$
11	6БП4	P_{uv}	1	1	2	2	7	6 → 7	μP_{uv}
		$(1 - P_{uv})$	1	0	2	1	8	6 → 8	$\mu (1 - P_{uv})$
12	7БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_o P_{uk}P_{up}$
		$(1- P_{uk})$	0	1	2	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_o (1-P_{uk})$
		$P_{uk} (1 - P_{up})$	0	1	2	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_o P_{uk} (1 - P_{up})$
13	7БП5 (ЗБП2)	P_{uk}	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_р P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_р(1- P_{uk})$
14	8БП1 (ЗБП2)	P_{uk}	0	0	2	0	КВ	8 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	0	0	2	0	КВ	8 → КВ	$\lambda_o (1-P_{uk})$

В методиці розроблення опорного графа станів на основі базових подій

передбачено перевірку виконання умови про те, що сума ймовірностей альтернативних продовжень процесу має дорівнювати 1. В розробленій моделі після всіх базових подій існує альтернативне продовження процесів, для яких вказана умова виконана.

2.4.4 Визначення компонент структурно-автоматної моделі на основі опорного графа станів

Вхідними даними є: базові події і опорний граф станів, побудований на основі базових подій (таблиця 2.2).

Для складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких може відбуватися кожна базова подія, необхідно їх виявити. Для виявлення ситуацій з таблиці 2.2 вибираються всі стани, що утворюються (формуються) після БП1 з урахуванням всіх альтернативних продовжень процесу. До цих станів також з таблиці 2.2 вибираються стани, що їм передують. Саме ці попередні стани забезпечують складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких відбувається БП1. Такі дії виконуються для всіх наступних базових подій.

Методика складання формалізованого опису ситуацій для кожної базової події і визначення ФРІП та правил модифікації компонент вектора стану (ПМКВС) показана нижче на прикладах. Слід зауважити, що для компактного представлення САМ необхідно розглянути можливість об'єднання ситуацій і компонент, яке виконується за такими правилами:

Правило 1: Якщо для різних ситуацій ФРІП і ПМКВС є однаковими, то такі ситуації в САМ можна об'єднати. Для цього треба модифікувати формалізований опис ситуації, а саме компоненти вектора стану, які мають різні значення записуються через оператор OR. Якщо здійснюється переведення САМ від конкретного значення параметра до його символьного позначення, то об'єднання ситуацій можна (треба) проводити після завершення цієї процедури.

Правило 2: Якщо в одній ситуації є однаковими ПМКВС для різних

альтернатив, то компоненти САМ для такої ситуації слід об'єднати. Для цього треба ФРІП представити сумою двох формул.

Визначені компоненти САМ заносимо в таблицю 6: в колонку 1 заносимо базову подію; в колонку 2 – формалізований опис всіх ситуацій, в яких відбувається базова подія; в колонку 3 – ФРІП; в колонку 4 – ПМКВС. Така форма представлення САМ відповідає формі діалогового вікна програмного засобу ASNA [97, с. 109-121].

Розроблення САМ здійснюється в такій послідовності:

1) **Визначення компонент структурно-автоматної моделі для базової події БП1**. Визначення ситуацій, в яких відбувається базова подій БП1 і зведені з нею базові події ЗБП2 і ЗБП3, представлено в таблиці 2.3. Це визначення здійснюється на основі графа станів, представленого в таблиці 2.2.

Таблиця 2.3 – До визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП1

№ кроку	Стан, що розгляд. і актуал. БП	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану	Переходи з стану в стан	ФРІП
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 1									
1	–	–	*1*	*1*	*0*	*2*	*1*	–	–
2	1БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	1	2	2	1 → 2	$\lambda_o P_{uk}P_{up}$
		$(1- P_{uk})$	0	1	0	1	КВ	1 → КВ	$\lambda_o(1 - P_{uk})$
		$P_{uk}(1 - P_{up})$	0	1	1	2	КВ	1 → КВ	$\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$
Ситуація 2									
2	–	–	*1*	*0*	*1*	*2*	*2*	–	–
4	2БП1 (ЗБП2)	P_{uk}	0	0	2	2	КВ	2 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	1	1	КВ	2 → КВ	$\lambda_o(1 - P_{uk})$
Ситуація 3									
3	–	–	*1*	*0*	*0*	*1*	*3*	–	–
6	3БП1 (ЗБП2)	P_{uk}	0	0	1	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	0	0	КВ	3 → КВ	$\lambda_o(1 - P_{uk})$
Ситуація 4									
5	–	–	*1*	*1*	*1*	*2*	*4*	–	–
7	4БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	2	2	6	4 → 6	$\lambda_o P_{uk}P_{up}$
		$(1 - P_{uk})$	0	1	1	1	КВ	4 → КВ	$\lambda_o(1 - P_{uk})$
		$P_{uk}(1 - P_{up})$	0	1	2	2	КВ	4 → КВ	$\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$
Ситуація 5									
5	–	–	*1*	*0*	*1*	*1*	*5*	–	–
9	5БП1 (ЗБП2)	P_{uk}	0	0	2	1	КВ	5 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	0	0	1	0	КВ	5 → КВ	$\lambda_o (1 - P_{uk})$
Ситуація 6									

№ кроку	Стан, що розгляд. і актуал. БП	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану	Переходи з стану в стан	ФРІП
			V1	V2	V3	V4			
7	–	–	*1*	*0*	*2*	*2*	*6*	–	–
10	6БП1	P_{uk}	0	0	2	1	КВ	6 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1- P_{uk})$	0	0	2	1	КВ	6 → КВ	$\lambda_o(1 - P_{uk})$
Ситуація 7									
11	–	–	*1*	*1*	*2*	*2*	*7*	–	–
12	7БП1 (ЗБП2, ЗБП3)	$P_{uk}P_{up}$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_o P_{uk}P_{up}$
		$(1 - P_{uk})$	0	1	2	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_o(1- P_{uk})$
		$P_{uk}(1 - P_{up})$	0	1	2	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$
Ситуація 8									
11	–	–	*1*	*0*	*2*	*1*	*8*	–	–
14	8БП1 (ЗБП2)	P_{uk}	0	0	2	0	КВ	8 → КВ	$\lambda_o P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	0	0	2	0	КВ	8 → КВ	$\lambda_o(1 - P_{uk})$

На основі таблиці 2.3 визначаємо компоненти САМ для базової події БП1.

Ситуація 1: формалізований опис ситуації 1: (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=2). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}P_{up}$; ПМКВС: V2:=0; V3:=1. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=1. Для 3-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$; ПМКВС: V1:=0; V3:=1.

Ситуація 2: формалізований опис ситуації 2: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=2).

Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}$; ПМКВС: V1:=0; V3:=2. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=1.

Ситуація 3: формалізований опис ситуації 3: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=1). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}$; ПМКВС: V1:=0; V3:=1. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=0.

Ситуація 4: формалізований опис ситуації 4: (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=1) AND (V4=2). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}P_{up}$; ПМКВС: V2:=0; V3:=2. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=1. Для 3-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$; ПМКВС: V1:=0; V3:=2.

Ситуація 5: формалізований опис ситуації 5: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=1). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}$; ПМКВС: V1:=0; V3:=2. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=0.

Ситуація 6: формалізований опис ситуації 6: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V4=2). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}$; ПМКВС: V1:=0; V4:=1. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=1.

В 6-й ситуації є однаковими ПМКВС для 1-ї та 2-ї альтернатив. Тому згідно правила 2 компоненти САМ для такої ситуації можна представити в такому об'єднаному вигляді: ФРІП: $\lambda_o P_{uk} + \lambda_o(1 - P_{uk}) = \lambda_o$; ПМКВС: V1:=0; V4:=1.

Ситуація 7: формалізований опис ситуації 7: (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=2) AND (V4=2). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk} P_{up}$; ПМКВС: V2:=0; V4:=1. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=1. Для 3-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=1.

В 7-й ситуації є однаковими ПМКВС для 2-ї та 3-ї альтернатив. Тому згідно правила 2 компоненти САМ для такої ситуації можна представити в такому об'єднаному вигляді: Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk} P_{up}$; ПМКВС: V2:=0; V4:=1. Для 2 + 3 альтернатив ФРІП: $\lambda_o(1 - P_{uk}) + \lambda_o P_{uk}(1 - P_{up}) = \lambda_o(1 - P_{uk} P_{up})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=1.

Ситуація 8: формалізований опис ситуації 8: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V4=1). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o P_{uk}$; ПМКВС: V1:=0; V4:=0. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_o(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V1:=0; V4:=0.

В 8-й ситуації є однаковими ПМКВС для 1-ї та 2-ї альтернатив. Тому згідно правила 2 компоненти САМ для такої ситуації можна представити в такому об'єднаному вигляді: ФРІП: $\lambda_o P_{uk} + \lambda_o(1 - P_{uk}) = \lambda_o$; ПМКВС: V1:=0; V4:=0.

2) **Визначення компонент структурно-автоматної моделі для базової події БП4**. Визначення ситуацій, в яких відбувається базова подій БП4, представлено в таблиці 2.4. Це визначення здійснюється на основі графа станів, представленого в таблиці 2.2.

Таблиця 2.4 – До визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП4

№ кроку	Стан, що розглядається і актуальна БП	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану	Переходи з стану в стан	ФРІП
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 1									
2	–	–	*1*	*0*	*1*	*2*	*2*	–	–
5	2БП4	P_{uv}	1	1	1	2	4	2 → 4	μP_{uv}
		$(1 - P_{uv})$	1	0	1	1	5	2 → 5	$\mu (1 - P_{uv})$
Ситуація 2									
7	–	–	1	0	2	2	6	–	–
11	6БП4	P_{uv}	1	1	2	2	7	6 → 7	μP_{uv}
		$(1 - P_{uv})$	1	0	2	1	8	6 → 8	$\mu (1 - P_{uv})$

На основі таблиці 2.4 визначаємо компоненти САМ для базової події БП4.

Ситуація 1: формалізований опис ситуації 1: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=2). Для 1-ої альтернативи ФРІП: μP_{uv}; ПМКВС: V2:= 1. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\mu(1 - P_{uv})$; ПМКВС: V4:=1.

Ситуація 2: формалізований опис ситуації 2: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V4=2). Для 1-ої альтернативи ФРІП: μP_{uv}; ПМКВС: V2:= 1. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\mu(1 - P_{uv})$; ПМКВС: V4:=1.

3) **Визначення компонент структурно-автоматної моделі для базової події БП5**. Визначення ситуацій, в яких відбувається базова подій БП5, представлено в таблиці 2.5. Це визначення здійснюється на основі графа станів, представленого в таблиці 2.2.

Ситуація 1: формалізований опис ситуації 1: (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=2). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_r P_{uk}$; ПМКВС: V2:=0; V3:=1. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_r(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V2:=0; V4:=1.

Ситуація 2: формалізований опис ситуації 2: (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=1) AND (V4=2). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_r P_{uk}$; ПМКВС: V2:=0; V3:=2. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_r(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V2:=0; V4:=1.

Ситуація 3: формалізований опис ситуації 3: (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=2) AND (V4=2). Для 1-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_r P_{uk}$; ПМКВС: V2:=0; V4:=1. Для 2-ої альтернативи ФРІП: $\lambda_r(1 - P_{uk})$; ПМКВС: V2:=0; V4:=1. В 3-й

ситуації є однаковими ПМКВС для 1-ї та 2-ї альтернатив. Тому згідно правила 2 компоненти САМ для такої ситуації можна представити в такому об'єднаному вигляді: ФРІП: $\lambda_r P_{uk} + \lambda_r(1 - P_{uk}) = \lambda_r$; ПМКВС: V2:=0; V4:=1.

Таблиця 2.5 – До визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП5

№ кроку	Стан, що розгляд. і актуал. БП	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану	Переходи з стану в стан	ФРІП
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 1									
1	–	–	*1*	*1*	*0*	*2*	*1*	–	–
3	1БП5 (ЗБП2)	P_{uk}	1	0	1	2	2	1 → 2	$\lambda_r P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	1	0	0	1	3	1 →3	$\lambda_r(1 - P_{uk})$
Ситуація 2									
5	–	–	*1*	*1*	*1*	*2*	*4*	–	–
8	4БП5 (ЗБП2)	P_{uk}	1	0	2	2	6	4 → 6	$\lambda_r P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	1	0	1	1	5	4 → 5	$\lambda_r(1 - P_{uk})$
Ситуація 3									
11	–	–	*1*	*1*	*2*	*2*	*7*	–	–
13	7БП5 (ЗБП2)	P_{uk}	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_r P_{uk}$
		$(1 - P_{uk})$	1	0	2	1	8	7 → 8	$\lambda_r(1 - P_{uk})$

На основі таблиці 2.5 визначаємо компоненти САМ для базової події БП5. Результати розроблення компонент САМ зведені в таблиці 2.6.

2.4.5 Заміна конкретних значень параметрів відмовостійкої системи, представлених в САМ, символьними позначеннями

Так як для розроблення САМ відмовостійкої системи крім показників її надійності та ефективності складових приймаються до уваги і параметри, зміна яких змінює кількість станів графа, то для розроблення опорного графа станів та переходів (тестової моделі) задаються їх мінімальні значення. В даній моделі таким параметром є кількість запланованих відновлень (замін) K_V. Тому розроблена САМ може використовуватись тільки для побудови графа станів з кількістю відновлень $K_V = 2$. Для розв'язання задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи треба мати можливість змінювати значення цього параметру. Тому у формалізованих описах ситуацій необхідно здійснити заміну конкретного значення цього параметра на його символьне представлення. В розробленій САМ така заміна стосується компоненти вектора стану V3. При переведенні САМ від

конкретного значення до символьного позначення кількості відновлень K_V для БП1 ситуація 1 поглинає (перекриває) ситуацію 4 і ситуація 3 поглинає (перекриває) ситуацію 5. Тому компоненти САМ, які представляють для БП1 ситуації 4 і 5 мають бути вилученими. В свою чергу для БП4 ситуація 1 поглинає (перекриває) ситуацію 2. І тому компоненти САМ, які представляють ситуацію 2 для БП4 необхідно вилучити. І нарешті для БП5 ситуація 1 поглинає (перекриває) ситуацію 2. І тому компоненти САМ, які представляють для БП5 ситуацію 2 необхідно вилучити.

Таблиця 2.6 – Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з однократним резервуванням, кількістю відновлень 2 і з врахуванням ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення

БП	**Опис ситуацій, в яких відбуваються БП**	**ФРІП**	**ПМКВС**
1	**2**	**3**	**4**
БП1 ЗБП2 ЗБП3	1) V1=1) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	V2:=0; V3:=1
		$\lambda_o(1 - P_{uk})$	V1:=0; V4:=1
		$\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$	V1:=0; V3:=1
	2) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk}$	V1:=0; V3:=2
		$\lambda_o(1 - P_{uk})$	V1:=0; V4:=1
	3) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=1)	$\lambda_o P_{uk}$	V1:=0; V3:=1
		$\lambda_o(1 - P_{uk})$	V1:=0; V4:=0
	4) (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=1) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	V2:=0; V3:=2
		$\lambda_o(1 - P_{uk})$	V1:=0; V4:=1
		$\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$	V1:=0; V3:=2
	5) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=1)	$\lambda_o P_{uk}$	V1:=0; V3:=2
		$\lambda_o(1 - P_{uk})$	V1:=0; V4:=0
	6) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V4=2)	λ_o	V1:=0; V4:=1
	7) (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=2) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	V2:=0; V4:=1
		$\lambda_o(1 - P_{uk} P_{up})$	V1:=0; V4:=1
	8) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V4=1)	λ_o	V1:=0; V4:=0
БП4	1) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=2)	μP_{uv}	V2:=1
		$\mu(1 - P_{uv})$	V4:=1
	2) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=2) AND (V4=2)	μP_{uv}	V2:=1
		$\mu(1 - P_{uv})$	V4:=1
БП5	1) (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=2)	$\lambda_r P_{uk}$	V2:=0; V3:=1
		$\lambda_r(1 - P_{uk})$	V2:=0; V4:=1
	2) (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=1) AND (V4=2)	$\lambda_r P_{uk}$	V2:=0; V3:=2
		$\lambda_r(1 - P_{uk})$	V2:=0; V4:=1
	3) (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=2) AND (V4=2)	λ_r	V2:=0; V4:=1

Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з однократним резервуванням, довільним значенням кількості відновлень і з врахуванням ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення представлена в

таблиці 2.7. Відповідно програмний засіб за цією моделлю дає змогу здійснювати побудову графа станів і переходів. Зміною параметрів відмовостійкої системи, а відповідно і моделі, забезпечена можливість побудови необхідної кількості графів станів і переходів для розв'язання задачі надійнісного параметричного синтезу.

Для відмовостійкої системи, що розглядається, з кількістю відновлень 20 граф має 63 стани та 205 переходів і його побудова триває 6 секунд.

Таблиця 2.7 – Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з однократним резервуванням, з довільним значенням кількості відновлень і з врахуванням ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення

БП	**Опис ситуацій, в яких відбуваються БП**	**ФРІП**	**ПМКВС**
1	**2**	**3**	**4**
БП1 ЗБП2 ЗБП3	1) V1=1) AND (V2=1) AND (V3<K_V) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	V2:=0; V3:=V3+1
		$\lambda_o(1 - P_{uk})$	V1:=0; V4:=1
		$\lambda_o P_{uk}(1 - P_{up})$	V1:=0; V3:=V3+1
	2) (V1=1) AND (V2=0) AND (0<V3< K_V) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk}$	V1:=0; V3:=V3+1
		$\lambda_o(1 - P_{uk})$	V1:=0; V4:=1
	3) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3< K_V) AND (V4=1)	$\lambda_o P_{uk}$	V1:=0; V3:=V3+1
		$\lambda_o(1 - P_{uk})$	V1:=0; V4:=0
	6) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=K_V) AND (V4=2)	λ_o	V1:=0; V4:=1
	7) (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=K_V) AND (V4=2)	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	V2:=0; V4:=1
		$\lambda_o(1 - P_{uk} P_{up})$	V1:=0; V4:=1
	8) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=K_V) AND (V4=1)	λ_o	V1:=0; V4:=0
БП4	1) (V1=1) AND (V2=0) AND (0<V3<=K_V) AND (V4=2)	μP_{uv}	V2:=1
		$\mu(1 - P_{uv})$	V4:=1
БП5	1) (V1=1) AND (V2=1) AND (V3<K_V) AND (V4=2)	$\lambda_r P_{uk}$	V2:=0; V3:=V3+1
		$\lambda_r(1 - P_{uk})$	V2:=0; V4:=1
	3) (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=K_V) AND (V4=2)	λ_r	V2:=0; V4:=1

Побудова графа станів на основі САМ здійснюється за алгоритмом, описаним в [91, с. 79 - 92] і представленим на рисунку 2.4.

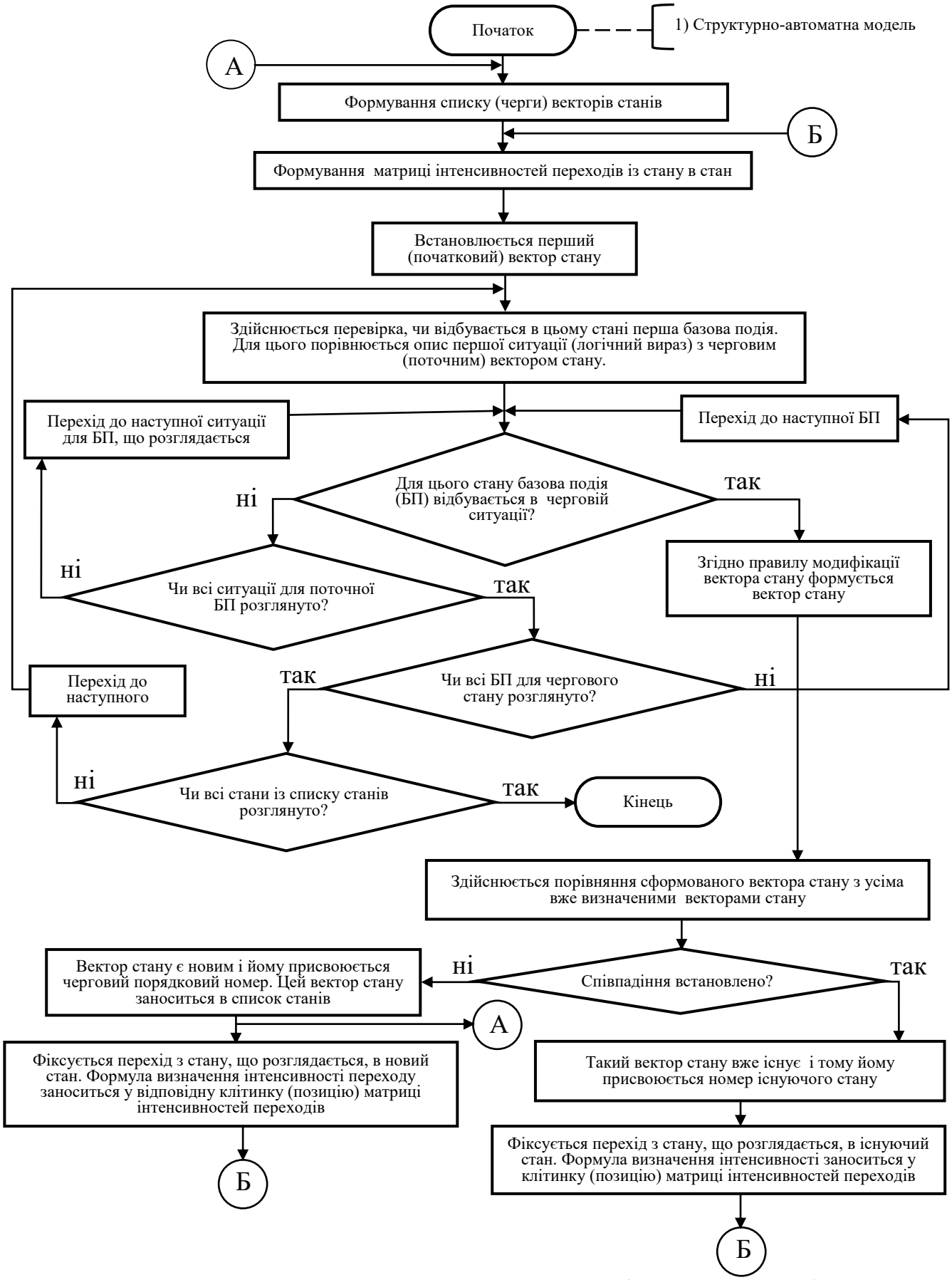

Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритму, в якому реалізовано метод побудови графа станів і переходів на основі структурно-автоматної моделі

2.5. Дослідження можливостей розробленої моделі відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з відновленням

2.5.1 Порівняння показників надійності відмовостійкої системи, отриманих на її надійнісних моделях різного ступеня адекватності

Порівняння показників надійності відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з відновленням (надалі "модель 3"), ступінь адекватності якої піднято за допомогою запропонованої методики, з показниками надійності аналогічної відмовостійкої системи, які отримують розробники (проектанти) на відомих спрощених моделях.

В практиці надійнісного проектування відмовостійкої системи, що розглядається, розробники мають можливість використовувати такі моделі: модель 1: кількість відновлень необмежена; модель 2: кількість відновлень обмежена. В моделях 1 і 2 фактично закладено ідеалізовані значення показників ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення: $P_{uk} = 1$, $P_{up} = 1$, $P_{uv} = 1$.

У відмовостійкій системі будуть використані ПАМ з інтенсивністю відмов $\lambda_o = \lambda_r = 5e\text{-}4$ 1/год. Тривалість процедури відновлення 1 година. На весь час експлуатації (20000 годин) заплановано 20 відновлень. Для моделі 3 ймовірності успішного контролю, перемикання і відновлення задані однаковими значеннями: 0,9; 0,99; 0,999. Результати розрахунків представлено на рисунку 2.5 залежностями ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з відновленням від тривалості її експлуатації. В таблиці 2.8 наведені значення ймовірності безвідмовної роботи на інтервалі експлуатації до 20000 годин $P_{б.р}(20000)$ і середнє значення тривалості безвідмовної роботи $T_{б.р}$.

Отримані результати підтверджують доцільність підвищення ступеня адекватності надійнісних моделей відмовостійких систем врахуванням показників ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення.

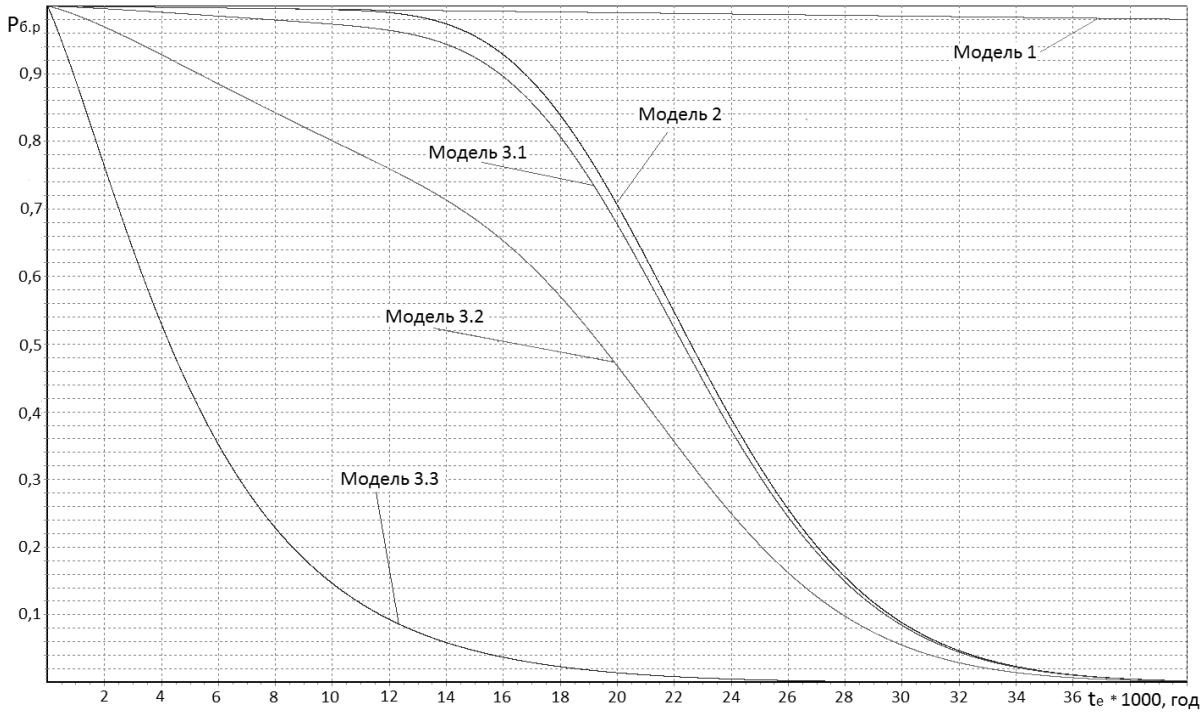

Рисунок 2.5 – Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи з однократним резервуванням і відновленням від тривалості її експлуатації, отриманих за допомогою трьох моделей з різним ступенем адекватності

Таблиця 2.8 – Показники надійності відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з відновленням, отримані на моделях різного ступеня адекватності

Дані про відмовостійку систему	Модель 1	Модель 2	Модель 3		
			результат 3.1	результат 3.2	результат 3.3
λ_o, 1/год	5e-4	5e-4	5e-4		
λ_r, 1/год	5e-4	5e-4	5e-4		
t_v, год	1	1	1		
K_V	без обмеження	20	20		
P_{uk}	1	1	0,999	0,99	0,9
P_{up}	1	1	0,999	0,99	0,9
P_{uv}	1	1	0,999	0,99	0,9
$P_{б.р}$(20000)	**0,9905**	**0,7055**	**0,677**	**0,4675**	**0,0143**
$T_{б.р}$, год	**197424**	**22895**	**22340**	**18122**	**5494**

2.5.2 Методика використання розробленої моделі для розв'язання задачі надійнісного синтезу через багатоваріантний аналіз на прикладі відмовостійкої системи з однократним резервуванням і обмеженою кількістю відновлень

Постановка задачі: Відмовостійка система з однократним резервуванням і з обмеженим відновленням має забезпечувати ймовірність

безвідмовної роботи відмовостійкої системи при тривалості її експлуатації t_e = 20000 годин $P_{б.р}(t_e)$ = 0,95. Задача надійнісного синтезу передбачає визначення мінімальних вимог до показників надійності ПАМ і до показників ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення. При розв'язанні такої задачі значення частини показників можуть бути обумовленими.

Варіант 1: Якщо ПАМ купуються в готовому вигляді, то значення інтенсивності їх відмов не підлягає зміні. Також обумовленим є максимальне значення тривалості процедури відновлення. Ця умова пов'язана з тим, що об'єкти, на яких експлуатуються ПАМ, є розосереджені на певній території. А ремонтник має добратися від місця дислокації до об'єкта, на якому є несправний ПАМ. Тривалість відновлення включає в себе затрати часу на дорогу і затрати часу на діагностику і заміну (ремонт) несправного ПАМ. Тривалість відновлення може враховувати і кваліфікацію ремонтника.

Визначенню підлягають значення показників ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення та кількість запланованих відновлень.

Вважаємо, що для куплених ПАМ показник надійності "інтенсивність відмов" λ_o = 1e-4 1/год. Ремонтна служба має забезпечувати відновлення працездатності несправного ПАМ за 1 годину. Вирішення задачі синтезу відмовостійкої системи представлено на рис. 2.6 і в табл. 2.9. На рис. 2.6 цифри відповідають номеру кроку в послідовності визначення заданого значення ймовірності безвідмовної роботи $P_{б.р}(20000)$ = 0,95, які виконані в табл. 2.9.

В результаті розв'язання задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи з однократним резервуванням і відновленням, яка має забезпечувати ймовірність безвідмовної роботи $P_{б.р}(t_e)$ = 0,95 при тривалості її експлуатації t_e = 20000 годин, вимоги до процедур контролю, перемикання і відновлення мають бути такими: P_{uk} = 0,996, P_{up} = 0,999, P_{uv} = 0,998, K_V = 6.

Варіант 2: В цьому варіанті вважаємо обумовленими прийнятні для

розробника значення показників ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення та мінімальне значення тривалості процедури відновлення. Визначенню підлягають значення показників надійності ПАС λ_o і $\lambda_г$, та підлягає уточненню значення кількості запланованих відновлень K_V і значення тривалості відновлення.

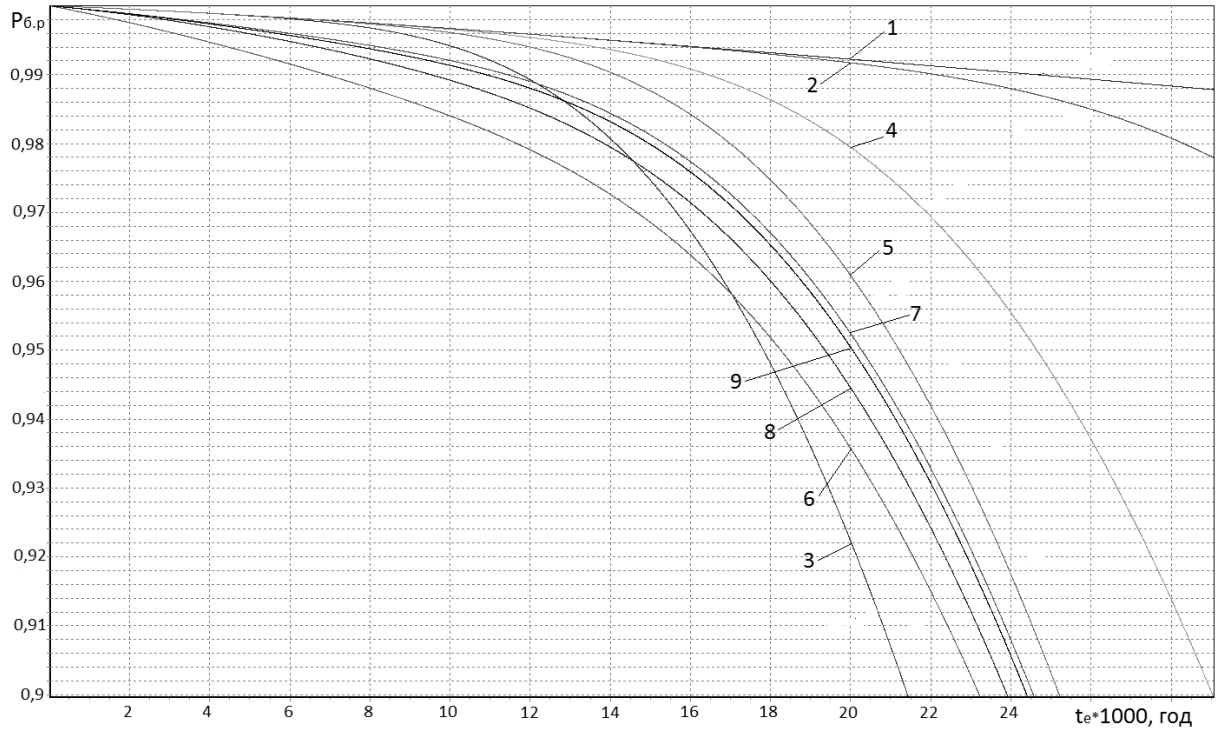

Рисунок 2.6 – Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи з однократним резервуванням і відновленням від тривалості її експлуатації, отриманих в процесі розв'язання задачі надійнісного синтезу

Таблиця 2.9 – Послідовність кроків розв'язання задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи

Крок №	**P_{uk}**	**P_{up}**	**P_{uv}**	**K_V**	**$P_{б.р}(20000)$**
1	0,999	0,999	0,999	20	0,9928
2	0,999	0,999	0,999	10	0,9923
3	0,999	0,999	0,999	5	0,9223
4	0,999	0,999	0,999	7	0,9794
5	0,999	0,999	0,999	6	0,9608
6	0,99	0,999	0,999	6	0,9355
7	0,996	0,999	0,999	6	0,9524
8	0,996	0,999	0,995	6	0,9444
9	***0,996***	***0,999***	***0,998***	***6***	***0,9503***

Для розробника є прийнятними такі вимоги для реалізації процедур контролю, перемикання і відновлення $P_{uk\ min} = P_{up\ min} = P_{uv\ min} = 0,99$. Ремонтна служба має забезпечувати відновлення працездатності несправної ПАС за 1

годину і передбачено 2 відновлення на інтервалі часу експлуатації t_e = 20000 годин. В результаті розв'язання задачі надійнісного синтезу для заданих вхідних даних з виконанням вимоги що $P_{б.р}(t_e) = 0,95$, значення інтенсивності відмов основної і резервної (резерв гарячий) ПАМ має дорівнювати 3,58e-5 1/год.

Для ПАМ з такою надійністю проведено дослідження чутливості показника надійності відмовостійкої системи до зміни кількості відновлень і до збільшення тривалості відновлення. Зменшення і збільшення кількості відновлень призводить до таких змін значення показника надійності відмовостійкої системи: при $K_V = 1$ значення $P_{б.р}(t_e) = 0,8844$, а при $K_V = 3$ значення $P_{б.р}(t_e) = 0,9725$. Отже кількість відновлень коректувати не потрібно. Розглянемо можливість збільшити норматив часу на відновлення. Якщо тривалість відновлення буде виконуватись за 10 годин, то $P_{б.р}(t_e) = 0,9498$, якщо за 20 годин, то $P_{б.р}(t_e) = 0,9493$, якщо за 50 годин, то $P_{б.р}(t_e) = 0,9482$. Проведені дослідження дозволяють дати такі рекомендації до процедури відновлення: для відмовостійкої системи з інтенсивністю відмов основної і резервної (резерв гарячий) ПАС 3,58e-5 1/год на інтервалі експлуатації 20000 годин необхідно передбачити 2 відновлення; тривалість відновлення не повинно перевищувати 10 годин.

Прийнятність значень показників, отриманих після розв'язання задачі надійнісного синтезу, необхідно погоджувати з розробником (проектантом) відмовостійкої системи.

2.6. Висновки до розділу 2

1) Отримала подальший розвиток методика розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів, в основу якої покладено метод побудови графа станів, який базується на представленні об’єкта моделювання у вигляді структурно-автоматної моделі. Цю методику доповнили:

– метод визначення компонент структурно-автоматних моделей на

основі опорного графа станів та переходів, в якому на відміну від відомого методу інтелектуальне розв’язання задачі замінено формалізованим, що дало змогу (дозволило) сформувати алгоритм та програмне забезпечення для автоматизації побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів і в подальшому проектанту зменшити витрати часу на розроблення моделей для розв’язання задач параметричного та структурного синтезу через багатоваріантний аналіз.

– метод побудови опорного графа станів та переходів на основі базових подій, в якому на відміну від відомого враховано ймовірності альтернативного продовження процесів після базових подій (в алгоритмі поведінки), що дозволяє підвищити ступінь адекватності дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів і відповідно достовірність показників надійності та ефективності;

– метод валідації структурно-автоматних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів, в якому на відміну від відомого звіряння тестового графа і графа, отриманого на основі структурно-автоматної моделі, виконується в три етапи: на першому – звіряння векторів станів, на другому – звіряння переходів між станами, на третьому – звіряння значень інтенсивностей переходів, що дозволяє прискорити локалізацію помилок і відповідно зменшити затрати часу на їх пошук і виправлення.

2) В запропонованій методиці розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів зменшено інтелектуальне навантаження на розробника підчас розроблення структурно-автоматних моделей. Інтелектуальна складова процесу розроблення структурно-автоматних моделей є необхідноюдля виконання окремих процедур розроблення опорного графа станів і до заміни в структурно-автоматній моделі конкретних значень параметрів відмовостійкої системи символьними позначеннями.

3) Наведений приклад застосування методики розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з альтернативними продовженнями випадкових процесів після закінчення процедур контролю, перемикання і відновлення підтвердив її ефективність.

4) Алгоритм програми і програмний засіб для комп'ютерної підтримки процесу розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем представлено в розділі 4.

5) Подальше підвищення ступеня адекватності структурно-автоматних моделей відмовостійких систем і відповідне підвищення достовірності показників їх надійності можливе з використанням методу фаз Ерланга згідно методики представленої в розділі 3.

Основні результати розділу 2 опубліковані в працях: [15; 166; 168; 173].

РОЗДІЛ 3
МЕТОДИКА МОДИФІКАЦІЇ СТРУКТУРНО-АВТОМАТНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ФАЗ ЕРЛАНГА ПРИ РОЗРОБЛЕННІ ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНИХ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВІДМОВОСТІЙКИХ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ З НЕ ЕКСПОНЕНЦІЙНИМ РОЗПОДІЛОМ ТРИВАЛОСТЕЙ ПРОЦЕДУР

В процесі розроблення надійнісних моделей складних технічних систем тривалості безвідмовної роботи і тривалості окремих процедур необхідно представляти відповідними законами розподілу. В монографії [165, с. 67 – 85], крім експоненційного закону розподілу, наведені закони розподілу, широко використовувані в практиці аналізу надійності наземних транспортних засобів військового і цивільного призначення. Це закон розподілу Вейбулла, логарифмічно нормальний розподіл, гамма-розподіл. Використання кожного закону розподілу обумовлено особливостями реалізації транспортних засобів, які впливають на тривалість їх безвідмовної роботи. Слід зазначити, що ці закони розподілу є актуальними і для радіоелектронних систем: для апроксимації закону розподілу, отриманого експериментальним шляхом; коли оцінку надійності треба виконати (провести) з врахуванням старіння елементної бази і процедури відновлення.

З одної сторони правильний вибір закону розподілу забезпечує високий ступінь адекватності надійнісних моделей. Однак не вирішеною є автоматизація побудови моделей, що породжує велику складність використання цих законів розподілу в процесі виконання проектних робіт. З другої сторони можливість автоматизації побудови надійнісних моделей дає закон розподілу Ерланга. Тому після апроксимації названих вище законів розподілу законом Ерланга буде забезпечений високий ступінь адекватності моделей з одночасною можливістю автоматизації їх використання в процесі побудови моделей.

Як показує огляд наукових публікацій, виконаний в 1-му розділі, основним об'єктом практичного використання методу фаз Ерланга є системи масового обслуговування. В надійнісному моделюванні відмовостійких систем використання цього методу є рідкістю. Це пов'язано з великими розмірностями (сотні і тисячі станів) надійнісних моделей відмовостійких систем у вигляді графа станів і переходів.

Використання закону розподілу Ерланга передбачає заміну стану графа ланцюжком фіктивних станів. Кількість фіктивних станів в ланцюжку визначає заданий (необхідний) порядок закону розподілу Ерланга. Велика працеємність використання методу фаз Ерланга для трансформації графа станів великої розмірності і висока ймовірність внесення в них помилок стримує його практичне використання в процесі розв'язання проектних задач. Тому актуальною є задача створення методики розроблення графа станів з високим ступенем формалізації використання методу фаз Ерланга і придатної для автоматизації. А таку можливість надає метод побудови графа станів на основі структурно-автоматної моделі [91, с. 79 - 93]. В розділі подана методика використання методу фаз Ерланга за допомогою структурно-автоматної моделі об’єкта дослідження (проектування).

В практиці розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей надійнісної та функціональної поведінки ПТК існує два варіанти [155, с. 194 - 199]. В першому варіанті для моделювання тривалості процедури з необхідним ступенем адекватності може бути використаний один ланцюжок фіктивних станів (один закон розподілу Ерланга). В другому варіанті – група паралельно з’єднаних ланцюжків (комбінація кількох законів розподілу Ерланга). В цьому розділі подана методика для обох варіантів використання закону розподілу Ерланга.

3.1 Метод модифікації компонент структурно-автоматних моделей відмовостійких систем для використання методу фаз Ерланга

В об’єкті дослідження може бути кілька різних процедур, тривалість

яких в моделі треба представити законами розподілу Ерланга різних порядків. Відповідно для кожної процедури необхідно формувати свій ланцюжок фіктивних станів. Ці ланцюжки відрізняються один від одного кількістю фіктивних станів і формулами для визначення інтенсивностей переходів із стану в стан. Тому метод модифікації компонент САМ для використання методу фаз Ерланга передбачає виконання таких дій.

1) Вводяться додаткові компоненти в вектор стану. Для представлення поточного значення номера фіктивного переходу для кожного ланцюжка в вектор стану необхідно ввести додаткову компоненту Vd.

Початкове значення цієї компоненти дорівнює нулю. Це означає, що в моделі об'єкт дослідження представлений реальним станом. Поточне значення компоненти змінюється в межах від 1 до Ke (Ke – порядок закону розподілу Ерланга).

Кількість додаткових компонент вектора стану Vd визначається кількістю процедур в об’єкті моделювання, тривалість яких треба представити законом розподілу Ерланга різних порядків.

2) Визначаються процедури, базові події яких завершують інтервали часу і які мають бути представлені законом розподілу Ерланга заданого (необхідного) порядку.

3) Визначаються компоненти структурно-автоматної моделі, які мають бути змінені. В САМ кожній базовій події відповідає одна або кілька ситуацій, в яких вона може відбуватися. Опис ситуації представляє логічний вираз, який дає змогу розпізнавати необхідні стани. З актуальних для базової події станів відбуваються переходи в наступні стани. Інтенсивність переходу визначає формула, для компонування якої враховується: середнє значення тривалості процедури; ймовірність альтернативного переходу; кількість однотипних модулів, в яких відбувається базова подія. Кожній формулі відповідає набір правил модифікації компонент вектора стану.

4) Правила внесення змін в компоненти структурно-автоматної моделі.

Кожний логічний вираз опису ситуацій, в яких відбувається базова подія, замінюємо трьома логічними виразами А, Б, В, які представляють процес формування ланцюжка фіктивних станів. Кожний логічний вираз створюється шляхом доповнення основного виразу складовими, за допомогою яких в графі станів формується ланцюжок фіктивних станів.

Перший логічний вираз А «розпізнає» актуальний для базової події стан і ініціює початок формування ланцюжка фіктивних станів. Це означає, що формується перший фіктивний перехід з першого фіктивного стану ланцюжка в другий фіктивний стан. Другий логічний вираз Б ініціює (запускає) формування наступних (крім останнього) фіктивних переходів ланцюжка. Третій логічний вираз В ініціює (запускає) формування останнього фіктивного переходу, який представляє вихід з ланцюжка фіктивних станів. Тобто перехід у відповідний реальний стан об’єкта дослідження.

Щоб перший логічний вираз представляв ситуацію А, вносимо в нього складову (Vd = 0). Формулу розрахунку інтенсивності переходів, щоб вона відповідала ситуації А, необхідно модифікувати включенням в неї співмножника Ке. Така модифікація формули забезпечує незмінність середнього значення тривалості процедури при зміні порядку закону розподілу Ерланга Ке [121, с. 137 - 144]. Для ситуації А, до існуючих правил модифікації компонент вектора стану треба додати ще одне правило, а саме Vd:= 1.

Щоб другий логічний вираз представляв ситуацію Б, вносимо в нього складову, яка визначає межі розпізнавання значень компоненти Vd, а саме (0 < Vd < (Ке – 1)). Формула розрахунку інтенсивності переходів формується аналогічно як і для ситуації А. Для ситуації Б правило модифікації компонент вектора стану має мати такий вигляд Vd:= Vd + 1.

Щоб третій логічний вираз представляв ситуацію В, вносимо в нього складову (Vd = (Ке – 1)). Формула розрахунку інтенсивності переходів

формується аналогічно як і для ситуації А. До правил модифікації компонент вектора стану для ситуації 1 необхідно додати правило Vd:= 0. Це означає, що формування ланцюжка завершено і сформовано новий реальний стан об’єкта моделювання.

Запропонований метод модифікації компонент САМ відкрив шлях до створення методики розроблення структурно-автоматних моделей для автоматизації використання методу фаз Ерланга в процесі формування графа станів і переходів великої розмірності.

В методиці передбачено використання для представлення тривалостей різних процедур об’єкта дослідження по одному ланцюжку фіктивних станів або кількох паралельно включених ланцюжків фіктивних станів. Паралельне включення кількох ланцюжків фіктивних станів призначене для об’єктів дослідження, в яких є процедури, тривалість яких в моделі треба представляти комбінацією кількох законів розподілу Ерланга різних порядків [155, с. 196 – 197].

3.2 Методика модифікації структурно-автоматних моделей відмовостійких систем для автоматизованої заміни станів з не експоненційно розподіленими тривалостями процедур одним ланцюжком фіктивних станів

В основу методики розроблення САМ відмовостійких систем для автоматизації використання методу фаз Ерланга підчас розроблення графа станів і переходів покладено метод модифікації компонент САМ, представлений в п. 3.1.

В запропонованій методиці розроблення САМ відмовостійких систем для автоматизації використання методу фаз Ерланга фактично здійснюється модифікація САМ, розробленої за методикою представленою в розділі 2. Так як в подальшому запропонована методика буде представлена на прикладі, де об'єктом моделювання буде відмовостійка система з мажоритарною структурою {2 із 3}, використаємо її САМ представлену в «Додатку В» (табл. 3.1).

Таблиця – 3.1 Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {2 із 3}

БП	Опис ситуацій, в яких відбуваються базові події	ФРІБП	ПМКВС
1	**2**	**3**	**4**
БП1	1. (V1 = 3) AND (V2 = 1) AND (V3 < K_v) AND (V4 = 1)	$3L_p$	V1:= 2; V3:= V3+1
	2. (V1 = 3) AND (V2 = 1) AND (V3 = K_v) AND (V4 = 1)	$3L_p$	V1:= 2; V4:= 0
	3. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0<V3 ≤ K_v) AND ((V4 = 1) OR (V4=0))	$2L_p$	V1:= 1
БП2	1. ((V1 = 2) OR (V1 = 3)) AND (V2 = 1) AND (V3 ≤ K_v) AND ((V4 = 1) OR (V4=0))	L_m	V2:= 0
БП3	1. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0<V3 ≤ K_v) AND (V4 = 1)	1/ T_v	V1:= 3
Критична відмова наступає за умови: (V1 = 1) OR (V2 = 0)			

За допомогою цієї САМ відмовостійкої системи для кількості відновлень K_v = 5 сформовано модель у вигляді графа станів і переходів (рис. 3.1). В цій моделі використано такі позначення: L_p і L_m – середні значення інтенсивностей відмов ПАМ ядра мажоритарної структури і мажоритарного елемента відповідно; $L_v = 1/T_v$ – середнє значення інтенсивності події "завершення процедури відновлення"; T_v – середнє значення тривалості відновлення несправного ПАМ.

В станах S1 – S12 представлена тривалість безвідмовної роботи ПАМ. Відмова ПАМ в станах S1, S3, S5, S7, S9, S11 дає початок процесу його відновлення. В станах S2, S4, S6, S8 і S10 розпочинається і завершується процедура відновлення ПАМ, тривалість якої є фіксованою (T_v = const). Відмова ПАМ в станах S2, S4, S6, S8, S10, S12 призводить до критичної відмови відмовостійкої системи (перехід в стан S13). В станах S1 – S12 надійнісної моделі може відбутися відмова мажоритарного елемента, яка призводить до критичної відмови відмовостійкої системи. Тому в надійнісній моделі відмовостійкої системи процедура відновлення працездатності мажоритарного елемента не передбачена. Зазначимо, що при проектуванні відмовостійких систем з мажоритарною структурою необхідно виконувати вимогу, за якою інтенсивність відмов мажоритарного елемента має бути на

два-три порядки нижчою від інтенсивності відмов ПАМ.

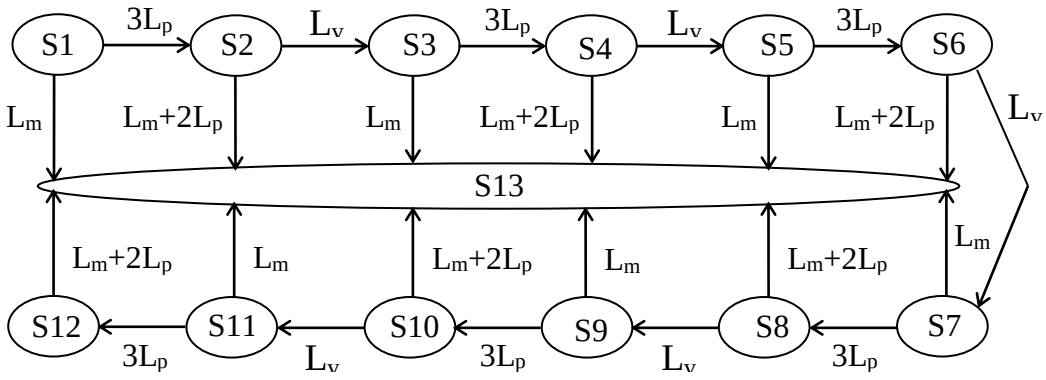

Рисунок – 3.1. Надійнісна модель відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {2 із 3}: всі тривалості процедур представлено експоненційним законом розподілу ймовірності

Якщо за цим графом скласти систему диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена, то ми змушені погодитись з тим, що для тривалостей безвідмовної роботи ПАМ і мажоритарного елемента та для тривалостей процесу відновлення ПАМ буде використано експоненційний закон розподілу.

Тому отримані за допомогою надійнісної моделі, представленої на рис. 3.1, значення показників надійності відмовостійкої системи будуть мати низьку достовірність.

Для підвищення достовірності показників надійності відмовостійкої системи відмовимося від експоненційного закону розподілу і використаємо для тривалостей безвідмовної роботи ПАМ закон розподілу Ерланга 4-го порядку, для тривалостей безвідмовної роботи мажоритарного елемента закон розподілу Ерланга 3-го порядку і для тривалостей відновлення модулів ядра закон розподілу Ерланга 3-го порядку.

Для реалізації цих змін необхідно в граф станів зображений на рисунку 3.1 необхідно ввести ланцюжки фіктивних станів. Фрагмент графа для станів S1 і S2 показано на рисунку 3.2. Стан S1 стає першим фіктивним станом для двох ланцюжків, які моделюють тривалості безвідмовної роботи ПАМ і мажоритарного елемента. Стан S2 стає першим фіктивним станом для трьох

ланцюжків, які моделюють тривалості безвідмовної роботи ПАМ, мажоритарного елемента та відновлення несправного ПАМ.

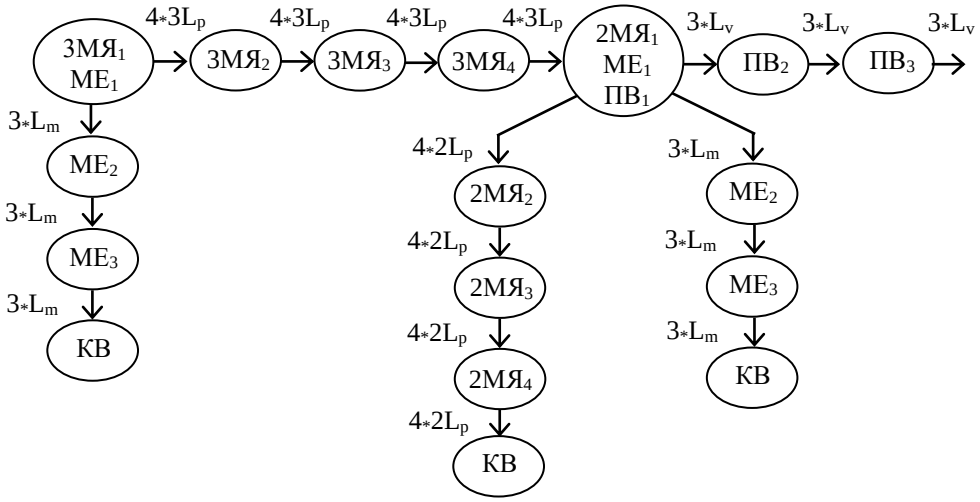

Рисунок 3.2 – Фрагмент графа (див. рис. 3.1) після введення ланцюжків для станів S1 і S2 (МЯ – модуль ядра; МЕ – мажоритарний елемент; ПВ – процес відновлення; КВ – критична відмова системи; L_p і L_m – інтенсивності відмов МЯ і МЕ; L_v – інтенсивність відновлення МЯ)

Тривалості безвідмовної роботи ПАМ моделює ланцюжок фіктивних станів $3МЯ_1$ - $3МЯ_4$. Тривалості безвідмовної роботи мажоритарного елемента моделює ланцюжок фіктивних станів ME_1 – ME_3. Тривалості процесу відновлення ПАМ моделює ланцюжок фіктивних станів $ПВ_1$ – $ПВ_3$. Зауважимо, що ми здійснюємо розроблення надійнісної моделі відмовостійкої системи, за допомогою якої будемо визначати показники надійності "середнє значення тривалості безвідмовної роботи відмовостійкої системи до критичної відмови" та "ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи на інтервалі експлуатації". Для визначення таких показників в моделі вважається, що стан критичної відмови є поглинаючим і можливість відновлення працездатності ПАС в цьому стані до уваги не приймається.

Тепер перейдемо безпосередньо до формування методики розроблення структурно-автоматної моделі з використанням методу модифікації її компонент.

Крок 1. В перелік параметрів моделі треба ввести параметр закону розподілу Ерланга для кожної процедури, а саме його порядок. Зауважимо, що порядок

закону розподілу визначає кількість фіктивних станів в ланцюжку.

Перший ланцюжок буде відтворювати в моделі тривалості безвідмовної роботи ПАМ мажоритарної структури, і для представлення кількості фіктивних станів в ньому введемо параметр **E1**. Другий ланцюжок буде відтворювати в моделі тривалості безвідмовної роботи мажоритарного елемента і для представлення кількості фіктивних станів в ньому введемо параметр **E2**. Третій ланцюжок буде відтворювати в моделі тривалості відновлення несправного ПАМ і для представлення кількості фіктивних станів в ньому введемо параметр **E3**.

Крок 2. У вектор стану треба включити ще три компоненти, які мають представляти поточні значення фіктивного стану в кожному з трьох ланцюжків. Ці значення змінюються в процесі його формування. Для першого ланцюжка – компонента **V5**, для другого ланцюжка – компонента **V6** і для третього ланцюжка – компонента **V7**. Початкові значення компонент **V5 = 0**, **V6 = 0**, **V7 = 0** свідчать про те, що стан в моделі представляє перебування об'єкта дослідження в реальному стані.

Крок 3. Здійснюється модифікація компонент САМ, які відносяться (належать) до базової події БП 1 «Відмова ПАМ» (див. табл. 3.1). На цьому кроці треба прийняти до уваги, що:

1) В станах S2, S4, S6, S8 і S10 (див. рис. 3.1) представлені: тривалість безвідмовної роботи ПАМ, тривалість безвідмовної роботи мажоритарного елемента і тривалість процесу відновлення несправного ПАМ.

2) Якщо в моделі, зображеній на рис. 3.1, базова подія 1 відбувається в станах S2, S4, S6, S8, S10 і S12, то в модифікованій моделі вона повинна відбуватися у останньому стані ланцюжка. Тому в опис всіх ситуацій, в яких відбувається базова подія 1, необхідно включити умову V5 = 0, V6 = 0 і V7 = 0.

3) Якщо кількість запланованих відновлень не використана, то одразу після події "Відмова ПАМ" розпочинається процедура відновлення несправної ПАМ. Зауважимо, що в процедуру відновлення входить ремонт (заміна)

несправного ПАМ, а також всі дії, що передують ремонту.

Для кожної із ситуацій, в яких відбувається БП1, треба сформувати по 4 логічні вирази. Перший – для моделей, в яких тривалість безвідмовної роботи модулів ядра треба представляти законом розподілу Ерланга першого порядку. Другий, третій і четвертий логічні вирази для моделей, в яких тривалість безвідмовної роботи модулів ядра треба представляти законом розподілу Ерланга другого і вищих порядків. Зауважимо, що закон розподілу Ерланга першого порядку відповідає саме експоненційному закону розподілу.

Крок 3.1. Здійснюється формування логічних виразів для першої ситуації. Формування першого логічного виразу для першої ситуації полягає в тому, що на початку виразу встановлюється умова про те, що порядок закону розподілу Ерланга дорівнює 1. Компоненти вектора **V5**, **V6**, **V7** повинні мати початкові значення. Тому перший логічний вираз першої ситуації має прийняти такий вигляд:

(E1=1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3<Kv) AND (V4=1) **AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=0)**.

В цьому логічному виразі і у всіх наступних жирним шрифтом виділені введені складові.

Формула для визначення інтенсивності переходів з станів, які визначає цей вираз залишається без змін (див. табл. 3.1).

Для кожної ситуації в САМ є призначено правило модифікації компонент вектора стану (див. табл. 3.1). Відзначимо, що процес відновлення несправного ПАМ розпочинається після події "Відмова ПАМ" тільки в першій ситуації. Оскільки ланцюжок фіктивних станів $ЗМЯ_1$ - $ЗМЯ_4$ при використанні закону розподілу Ерланга першого порядку не формується, то має розпочатися процес відновлення несправного ПАМ. Тому в правило модифікації компонент вектора стану для першого логічного виразу необхідно включити зміну значення компоненти V5:=1.

Формування другого, третього і четвертого логічних виразів починається з того, що на початку кожного виразу додається умова, що порядок закону розподілу Ерланга є більшим за 1. Компоненти вектора V5 і V6 повинні мати початкові значення. Так як компонента вектора V7 забезпечує формування ланцюжка фіктивних станів, то в логічному виразі 2 вона повинна мати початкове значення, в логічному виразі 3 вона буде приймати значення від 1 до (E1-2), а в логічному виразі 4 вона приймає значення (E1-1). Тому логічні вирази мають прийняти такий вигляд:

- *логічний вираз 2*: **(E1>1) AND** (V1=3) AND (V2=1) AND (V3<Kv) AND (V4=1) **AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=0)**;
- *логічний вираз 3*: **(E1>1) AND** (V1=3) AND (V2=1) AND (V3<Kv) AND (V4=1) **AND (V5=0) AND (V6=0) AND ((V7>0) AND (V7<(E1-1)))**;
- *логічний вираз 4*: **(E1>1) AND** (V1=3) AND (V2=1) AND (V3<Kv) AND (V4=1) **AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=(E1-1))**.

Формули для визначення інтенсивностей переходів з усіх фіктивних станів ланцюжка будуть однаковими і мають такий вигляд: $З_{*}Lp_{*}E1$.

Другий логічний вираз фіксує (визначає) фіктивний стан, з якого розпочинається формування ланцюжка $ЗМЯ_1$ - $ЗМЯ_4$. В цьому стані змінюється тільки одна компонента – V7:=1. Третій логічний вираз забезпечує формування необхідної кількості фіктивних станів в ланцюжку. Для нього ПМКВС має бути таким V7:=V7+1. Четвертий логічний вираз ситуації 1 забезпечує вихід з ланцюжка фіктивних станів в наступний реальний стан відмовостійкої системи, в якому розпочинається процедура відновлення несправного МЯ. Тому для четвертого логічного виразу в ПМКВС необхідно додати V5:=1 і V7:=0. Введення в ПМКВС V5:=1 означає, що має розпочатися формування ланцюжка фіктивних станів $ПВ_1$ – $ПВ_3$ (див. рис. 3.2).

Крок 3.2. Здійснюється формування логічних виразів для другої ситуації.

Формування першого логічного виразу для другої ситуації полягає в тому,

що на початку виразу встановлюється умова про те, що порядок закону розподілу Ерланга дорівнює 1. Компоненти вектора V5, V6, V7 повинні мати початкові значення. Тому перший логічний вираз першої ситуації має прийняти такий вигляд:

(E3=1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) **AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=0)**.

Для першого логічного виразу другої ситуації для БП1 формула для визначення інтенсивності переходів з станів та ПМКВС залишаються без змін (див. табл. 3.1).

Формування другого, третього і четвертого логічних виразів починається з того, що на початку кожного виразу додається умова, що порядок закону розподілу Ерланга є більшим за 1. Компоненти вектора V5 і V6 повинні мати початкові значення. Так як компонента вектора V7 забезпечує формування ланцюжка фіктивних станів, то в логічному виразі 2 вона повинна мати початкове значення, в логічному виразі 3 вона буде приймати значення від 1 до (E1-2), а в логічному виразі 4 вона приймає значення (E1-1). Тому логічні вирази мають прийняти такий вигляд:

- *логічний вираз 2*: **(E1>1) AND** (V1=3) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) **AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=0)**;
- *логічний вираз 3*: **(E1>1) AND** (V1=3) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) **AND (V5=0) AND (V6=0) AND ((V7>0) AND (V7<(E1-1)))**;
- *логічний вираз 4*: **(E1>1) AND** (V1=3) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) **AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=(E1-1))**.

Формули для визначення інтенсивностей переходів з усіх фіктивних станів ланцюжка будуть однаковими і мають такий вигляд: 3*Lp*E1.

Другий логічний вираз фіксує (визначає) фіктивний стан, з якого розпочинається формування ланцюжка $3МЯ_1$ - $3МЯ_4$. В цьому стані змінюється тільки одна компонента – V7:=1. Третій логічний вираз забезпечує формування необхідної кількості фіктивних станів в ланцюжку.

Для нього ПМКВС має бути таким V7:=V7+1. Четвертий логічний вираз ситуації 2 забезпечує вихід з ланцюжка фіктивних станів в наступний реальний стан відмовостійкої системи. В другій ситуації процес відновлення не розпочинається, так як всі заплановані відновлення вже використані V3 = Kv. Тому для четвертого логічного виразу в ПМКВС необхідно додати тільки V7:=0.

Крок 3.3. Здійснюється формування логічних виразів для третьої ситуації. Формування першого логічного виразу для третьої ситуації полягає в тому, що на початку виразу встановлюється умова про те, що порядок закону розподілу Ерланга дорівнює 1. Компонента вектора V5 може мати значення 0 в стані S12 або 1 в станах S2, S4, S6, S8 і S10 (див. рис. 3.1)**.** Компоненти вектора V6, V7 повинні мати початкові значення. Тому перший логічний вираз першої ситуації має прийняти такий вигляд:

(E3=1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (0<V3<=Kv) AND ((V4=0) OR (V4=1)) **AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=0)**.

Для першого логічного виразу третьої ситуації для БП1 формула для визначення інтенсивності переходів з станів та ПМКВС залишаються без змін (див. табл. 3.1).

Формування другого, третього і четвертого логічних виразів починається з того, що на початку кожного виразу додається умова, що порядок закону розподілу Ерланга є більшим за 1. Компонента вектора V5 може мати значення 0 в стані S12 або 1 в станах S2, S4, S6, S8 і S10 (див. рис. 3.1)**.** Компонента вектора V6 повинна мати початкове значення. Так як компонента вектора V7 забезпечує формування ланцюжка фіктивних станів, то в логічному виразі 2 вона повинна мати початкове значення, в логічному виразі 3 вона буде приймати значення від 1 до (E1-2), а в логічному виразі 3 вона приймає значення (E1-1). Тому логічні вирази мають прийняти такий вигляд:

- *логічний вираз 2*: **(E1>1) AND** (V1=2) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND

(V4=1) **AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=0)**;

- *логічний вираз 3*: **(E1>1) AND** (V1=2) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) **AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND ((V7>0) AND (V7<(E1-1)))**;
- *логічний вираз 4*: **(E1>1) AND** (V1=2) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) **AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=(E1-1))**.

Формули для визначення інтенсивностей переходів з усіх фіктивних станів ланцюжка будуть однаковими і мають такий вигляд: 2*Lp*E1.

Другий логічний вираз фіксує (визначає) фіктивний стан, з якого розпочинається формування ланцюжка $2МЯ_1$ - $2МЯ_4$. В цьому стані змінюється тільки одна компонента – V7:=1. Третій логічний вираз забезпечує формування необхідної кількості фіктивних станів в ланцюжку. Для нього ПМКВС має бути таким V7:=V7+1. Четвертий логічний вираз ситуації 3 забезпечує вихід з ланцюжка фіктивних станів в наступний реальний стан відмовостійкої системи. В третій ситуації процес відновлення не розпочинається, так як в ядрі мажоритарної структури залишилося (наявні) 2 працездатні (справні) модулі і відмова одного з них призводить до критичної відмови відмовостійкої системи. Тому для четвертого логічного виразу в ПМКВС необхідно додати тільки V7:=E1.

Крок 4. Здійснюється модифікація компонент САМ, які відносяться (належать) до базової події БП2 "Відмова мажоритарного елемента" (див. табл. 3.1). В моделі ця подія відбувається у всіх працездатних реальних станах моделі і відповідно в одній ситуації.

Формування першого логічного виразу для БП2 полягає в тому, що на початку виразу встановлюється умова про те, що порядок закону розподілу Ерланга дорівнює 1. Компонента вектора V5 може мати значення 0 в стані S12 або 1 в станах S2, S4, S6, S8 і S10 (див. рис. 3.1)**.** Компоненти вектора V6, V7 повинні мати початкові значення. Тому перший логічний вираз БП2 має прийняти такий вигляд:

(E2=1) AND ((V1=2) OR (V1=3)) AND (V2=1) AND (V3 ≤ Kv) AND ((V4=0) AND (V4=1)) **AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=0)**.

Для першого логічного виразу БП2 формула для визначення інтенсивності переходів з станів та ПМКВС залишаються без змін (див. табл. 3.1).

Формування другого, третього і четвертого логічних виразів починається з того, що на початку кожного виразу додається умова, що порядок закону розподілу Ерланга є більшим за 1. В цих виразах компонента вектора V5 може мати значення 0 в стані S12 або 1 в станах S2, S4, S6, S8 і S10 (див. рис. 3.1). А компонента вектора V7 повинна мати початкове значення. Так як компонента вектора V6 забезпечує формування ланцюжка фіктивних станів ME_1 – ME_3, то в логічному виразі 2 вона повинна мати початкове значення, в логічному виразі 3 вона буде приймати значення від 1 до (E2 - 2), а в логічному виразі 4 вона приймає значення (E2 - 1). Тому логічні вирази мають прийняти такий вигляд:

- *логічний вираз 2*: **(E2>1) AND** ((V1=2) OR (V1=3)) AND (V2=1) AND (V3 ≤ Kv) AND ((V4=0) AND (V4=1)) **AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=0)**;
- *логічний вираз 3*: **(E2>1) AND** ((V1=2) OR (V1=3)) AND (V2=1) AND (V3 ≤ Kv) AND ((V4=0) AND (V4=1)) **AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND ((V6>0) AND (V6<(E2-1))) AND (V7=0)**;
- *логічний вираз 4*: **(E2>1) AND** ((V1=2) OR (V1=3)) AND (V2=1) AND (V3 ≤ Kv) AND ((V4=0) AND (V4=1)) **AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=(E2-1)) AND (V7=0)**.

Формули для визначення інтенсивностей переходів з усіх фіктивних станів ланцюжка будуть однаковими і мають такий вигляд: $L_{m*}E_2$.

Другий логічний вираз фіксує (визначає) фіктивний стан, з якого розпочинається формування ланцюжка ME_1 – ME_3. В цьому стані змінюється тільки одна компонента – V6:=1. Третій логічний вираз забезпечує

формування необхідної кількості фіктивних станів в ланцюжку. Для нього ПМКВС має бути таким V6:=V6+1. Четвертий логічний вираз забезпечує вихід з ланцюжка фіктивних станів в стан критичної відмови. Тому для четвертого логічного виразу в ПМКВС необхідно додати V6:=E2.

Крок 5. Здійснюється модифікація компонент САМ, які відносяться (належать) до базової події БП3 "Закінчення процедури відновлення несправного ПАМ" (див. табл. 3.1). В моделі ця подія відбувається в одній ситуації в станах S2, S4, S6, S8 і S10. Але на відміну від БП1 і БП2 для представлення ситуації, в якій відбувається БП3, треба використати три логічні вирази. Буде відсутній логічний вираз 2, бо перший фіктивний стан ланцюжка $ПВ_1$ – $ПВ_3$ формується базовою подією БП1 в першій ситуації (див. Крок 3.1).

Формування першого логічного виразу для БП3 полягає в тому, що на початку виразу встановлюється умова про те, що порядок закону розподілу Ерланга для тривалостей відновлення несправного ПАМ дорівнює 1. Компонента вектора V5 має мати значення 1, бо в першій ситуації БП1 вже сформовані стани, в яких розпочинається процес відновлення несправного ПАМ (див. Крок 3.1). Компоненти вектора V6, V7 повинні мати початкові значення. Тому перший логічний вираз БП3 має прийняти такий вигляд:

(E3=1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (0 < V3 ≤ Kv) AND (V4=1) **AND (V5=1) AND (V6=0) AND (V7=0)**.

Для першого логічного виразу БП2 формула для визначення інтенсивності переходів з станів залишається без змін (див. табл. 3.1). Так як процес відновлення в сформованому стані завершується, в ПМКВС необхідно додати V5:=0.

Формування третього і четвертого логічних виразів починається з того, що на початку кожного виразу додається умова, що порядок закону розподілу Ерланга є більшим за 1. Обґрунтування відсутності другого логічного виразу подано вище.

Третій логічний вираз повинен "розпізнавати" стан, який відображає початок процедури відновлення несправного ПАМ (V5=1). Цей стан є першим фіктивним станом ланцюжка фіктивних станів $ПВ_1$ – $ПВ_3$. А також він повинен "відслідковувати" формування всіх наступних станів ланцюжка. Так як компонента вектора V5 забезпечує формування ланцюжка фіктивних станів $ПВ_1$ – $ПВ_3$, то в логічному виразі 3 вона буде приймати значення від 1 до (Е3 - 1).

Четвертий логічний вираз повинен "розпізнавати" останній фіктивний стан ланцюжка і фактично закінчення процедури відновлення несправного ПАМ. Для цього в формалізований опис ситуації необхідно ввести таку складову: ($V5 = E_3$).

Компоненти вектора V6, V7 повинні мати початкові значення. Тому логічні вирази мають прийняти такий вигляд:

- *логічний вираз 3*: **(E3>1) AND** (V1=2) AND (V2=1) AND (0 < V3 ≤ Kv) AND (V4=1) **AND ((V5>0) AND (V5<(E_3-1))) AND (V6=0) AND (V7=0)**;
- *логічний вираз 4*: **(E3>1) AND** (V1=2) AND (V2=1) AND (0 < V3 ≤ Kv) AND (V4=1) **AND (V5=E3) AND (V6=0) AND (V7=0)**.

Третій логічний вираз забезпечує формування необхідної кількості фіктивних станів в ланцюжку. Для нього ПМКВС має бути таким V5:=V5+1. В правилі модифікації компонент вектора стану для четвертого логічного виразу крім фіксації факту повернення в ядро мажоритарної структури працездатного ПАМ (V1:=3), треба компоненті вектора стану V5 повернути початкове значення, тобто V5:= 0.

Крок 6. Здійснюється формування логічного виразу для розпізнавання в графі станів та переходів станів критичної відмови.

Для розпізнавання *програмним засобом, що розробляється,* станів критичної відмови в САМ передбачено формування логічного виразу.

Структурно-автоматна модель складається фактично з двох частин. Використання однієї з частин здійснюється заданням значень порядків

закону розподілу Ерланга, з якими буде здійснюватися побудова графа станів і переходів. Перша умова визначає побудову моделей, в яких тривалості всіх процедур будуть представлені законом розподілу Ерланга першого порядку. Зауважимо, що закон розподілу Ерланга першого порядку відповідає експоненційному закону розподілу. Друга умова визначає побудову моделей, в яких тривалості всіх процедур можна представляти законом розподілу Ерланга різних порядків, починаючи з другого. Не представляє труднощів розділити таку САМ на дві автономні САМ. Однак поєднання можливості аналізувати показники надійності об'єкта проектування, використовуючи такі два закони розподілу зроблено для зручності проектанта.

Обґрунтування вибору компонент для логічного виразу є наступними. Відмовостійка система з мажоритарною структурою «2 із 3» втрачає працездатність в двох випадках. Коли в ядрі залишається один працездатний ПАМ або коли втрачає працездатність мажоритарний елемент. Якщо в моделі використовується закон розподілу Ерланга першого порядку, то цій умові відповідають стани, в яких V1=1 або V2=0. Якщо в моделі використовується закон розподілу Ерланга другого і вищих порядків, то перехід в стан критичної відмови відповідає останньому переходу в ланцюжку фіктивних станів, тобто виходу з ланцюжка. Вихід з ланцюжка фіктивних станів, який моделює тривалість безвідмовної роботи модуля ядра, коли в ньому залишились два модулі, фіксує (показує) компонента вектора V7=E1. Вихід з ланцюжка фіктивних станів, який моделює тривалість безвідмовної роботи мажоритарного елемента, фіксує (показує) компонента вектора V6=E2.

На основі цих міркувань формуємо логічний вираз для розпізнавання в графі станів та переходів станів критичної відмови в такому вигляді:

(V1=1) OR (V2=0) OR (V6=E2) OR (V7=E1)

Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з мажоритарною

структурою {2 із 3}, розроблена (побудована) з використанням методу модифікації її компонент, представлена в таблиці 3.2. Жирним шрифтом в таблиці відзначені компоненти САМ, коли для моделювання тривалостей всіх процедур використовується закон розподілу Ерланга першого порядку.

З використанням алгоритму, представленого в монографії [43, с. 79 - 92], САМ дає змогу здійснювати побудову графа станів та переходів. При цьому для тривалостей безвідмовної роботи ПАМ і мажоритарного елемента та тривалості процесу відновлення несправного ПАМ проектант має можливість використовувати закон розподілу Ерланга будь-якого порядку, починаючи з другого порядку. Якщо є необхідність, проектант може виконати порівняння отриманих значень показників надійності з значеннями, які отримані з використанням експоненційного закону розподілу для представлення тривалостей всіх процедур.

Таблиця – 3.2 Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {2 із 3}, з використанням для тривалостей процедур закону розподілу Ерланга

БП	**Опис ситуацій, в яких відбуваються базові події**	**ФРІП**	**ПМКВС**
БП1	**1.1 (E1=1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3<Kv) AND (V4=1) AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=0)**	**3*Lp*E1**	**V1:= 2; V3:=V3+1; V5:=1**
	1.2. (E1>1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3<Kv) AND (V4=1) AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=0)	3*Lp*E1	V7:= 1
	1.3. (E1>1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3<Kv) AND (V4=1) AND (V5=0) AND (V6=0) AND ((V7>0) AND (V7<(E1-1)))	3*Lp*E1	V7:= V7+1
	1.4. (E1>1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3<Kv) AND (V4=1) AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=(E1-1))	3*Lp*E1	V1:= 2; V3:=V3+1; V5:=1; V7:= 0
	2.1 (E3=1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=0)	**3*Lp*E1**	**V1:= 2; V4:= 0**
	2.2. (E1>1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=0)	3*Lp*E1	V7:= 1
	2.3. (E1>1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) AND (V5=0) AND (V6=0) AND ((V7>0) AND (V7<(E1-1)))	3*Lp*E1	V7:= V7+1
	2.4. (E1>1) AND (V1=3) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=(E1-1))	3*Lp*E1	V1:= 2; V4:= 0; V7:= 0
	3.1. (E3=1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (0<V3<=Kv) AND ((V4=0) OR (V4=1)) AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=0)	**2*Lp*E1**	**V1:=1**
	3.2. (E1>1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=0)	2*Lp*E1	V7:= 1

	3.3. (E1>1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND ((V7>0) AND (V7<(E1-1)))	2∗Lp∗E1	V7:= V7+1
	3.4. (E1>1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (V3=Kv) AND (V4=1) AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=(E1-1))	2∗Lp∗E1	V1:=1; V7:= E1
БП2	**1.1 (E2=1) AND ((V1=2) OR (V1=3)) AND (V2=1) AND (V3 ≤ Kv) AND ((V4=0) AND (V4=1)) AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=0)**	**Lm∗E2**	**V2:=0**
	1.2. (E2>1) AND ((V1=2) OR (V1=3)) AND (V2=1) AND (V3 ≤ Kv) AND ((V4=0) AND (V4=1)) AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=0) AND (V7=0)	Lm∗E2	V6:=1
	1.3. (E2>1) AND ((V1=2) OR (V1=3)) AND (V2=1) AND (V3 ≤ Kv) AND ((V4=0) AND (V4=1)) AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND ((V6>0) AND (V6<(E2-1))) AND (V7=0)	Lm∗E2	V6:=V6+1
	1.4. (E2>1) AND ((V1=2) OR (V1=3)) AND (V2=1) AND (V3 ≤ Kv) AND ((V4=0) AND (V4=1)) AND ((V5=0) OR (V5=1)) AND (V6=(E2-1)) AND (V7=0)	Lm∗E2	V2:=0; V6:=E2
БП3	**1.1. (E3=1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (0 < V3 ≤ Kv) AND (V4=1) AND (V5=1) AND (V6=0) AND (V7=0)**	**Lv∗E3**	**V1:=3; V5:=0**
	1.3. (E3>1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (0 < V3 ≤ Kv) AND (V4=1) AND ((V5>0) AND (V5<(E3-1))) AND (V6=0) AND (V7=0);	Lv∗E3	V5:= V5+1
	1.4. (E3>1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (0 < V3 ≤ Kv) AND (V4=1) AND (V5=E3) AND (V6=0) AND (V7=0).	Lv∗E3	V1:=3; V5:=0
Критична відмова наступає за умови: (V1=1) OR (V2=0) OR (V6=E2) OR (V7=E1)			

Графічне зображення графа станів та переходів не показано в силу його громіздкості. Проте в таблиці 3.3 наведені розмірності графа станів при різних значеннях порядків закону розподілу Ерланга для тривалостей безвідмовної роботи ПАМ (E1) і мажоритарного елемента (E2) та тривалості процесу відновлення несправного ПАМ (E3).

Таблиця – 3.3. Розмірності графа станів при різних значеннях порядків закону розподілу Ерланга

Варіант	**Порядок закону розподілу Ерланга**			**Кількість станів графа**	**Кількість переходів в графі**
	E1	**E2**	**E3**		
1	1	1	1	13	35
2	5	5	5	129	309
3	10	10	10	274	659
4	7	10	20	288	651
5	20	20	20	564	1359
6	20	30	30	734	1699

Дані таблиці 3.3 необхідно (доцільно) використовувати для тестування

програмного засобу, що розробляється, перед розв'язанням задач надійнісного проектування відмовостійкої системи з мажоритарною структурою «2 із 3» за допомогою запропонованої САМ.

На основі даних таблиці 3.3 можна доповнити перелік вимог до програмного засобу, що розробляється. Користувач (проектант, спеціаліст системного аналізу) повинен мати можливість «замовляти» у програмного засобу розмірність матриці коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Щоб це не було як є зараз в програмному засобі ASNA – зафіксовано значення розмірності матриці 1000×1000. Проектант поміняв порядок закону розподілу Ерланга, вийшов за межі 1000 станів. А ще краще, щоб програмний засіб мав адаптивні властивості. Тобто щоб розмірність встановлювалася автоматично для кожної конкретної моделі (кожного конкретного графа станів).

І тут проситься продовження. Після того, як ми знаємо (програмний засіб «знає») кількість станів і переходів, легко визначається ступінь розрідженості матриці коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Знаючи ступінь розрідженості матриці і коефіцієнт жорсткості системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена можна здійснювати вибір і настроювання методу їх розв'язання.

3.3 Методика модифікації структурно-автоматних моделей відмовостійких систем для автоматизованої заміни станів з не експоненційно розподіленими тривалостями процедур кількома паралельними ланцюжками фіктивних станів

Методика розроблення САМ відмовостійких систем для автоматизації використання методу фаз Ерланга з кількома ланцюжками фіктивних станів в процесі формування графа станів і переходів передбачає виконання описаних нижче кроків. Методика показана на прикладі САМ відмовостійкої системи з мажоритарною структурою «2 із 3», представленої в таблиці 3.1. В перелік вхідних даних для розроблення САМ необхідно включити (числові дані

відповідають наведеному нижче прикладу):

- результати апроксимації реального закону розподілу тривалостей процедури відновлення мають бути представлені: кількість ланцюжків фіктивних станів: $К_л = 3$; кількість станів в кожному ланцюжку: $К_{е1} = 2$, $К_{е2} = 3$, $К_{е3} = 2$; коефіцієнти, які визначають питому вагу кожного ланцюжка у формуванні заданого (відмінного від експоненційного) закону розподілу тривалості перебування в стані: $q_1 = 0,3$, $q_2 = 0,5$, $q_3 = 0,2$; інтенсивність переходу із стану в стан для кожного ланцюжка: M_1, M_2, M_3 (параметр закону розподілу Ерланга в 1-му, 2-му і 3-му ланцюжках відповідно).
- інтенсивність відмов ПАС: L_p=1e-3 1/год;
- інтенсивність відмов мажоритарного елемента: L_m=1e-5 1/год;
- кількість запланованих відновлень: K_v=5;

Крок 1. У вектор стану треба включити компоненти, які мають представляти поточні значення кількості фіктивних станів в кожному ланцюжку. Кількість компонент визначає кількість ланцюжків фіктивних станів. В прикладі **V5, V6, V7** – відповідно для першого, другого і третього ланцюжків. Початкові значення цих компонент дорівнюють нулю. Це означає, що в моделі об'єкт дослідження перебуває в реальному стані.

Крок 2. Удосконалення представлення компонент САМ для базової події 1 "Відмова ПАС" передбачає такі дії:

Крок 2.1. В моделі ця подія не повинна відбуватися у фіктивних станах ланцюжка. Тому в опис всіх ситуацій, в яких відбувається базова подія 1, необхідно включити умову, що компоненти вектора, які мають представляти поточні значення кількості фіктивних станів мають дорівнювати нулю (початковим значенням). Це означає, що в моделі базова подія 1 буде відбуватися тільки в реальних станах об'єкта дослідження.

Крок 2.2. Процедура відновлення несправного ПАМ розпочинається одразу після події "Відмова ПАМ". Зауважимо, що в процедуру відновлення входить ремонт (заміна) несправного ПАМ, а також всі дії, що передують ремонту.

Для кожної ситуації в САМ призначається правило модифікації компонент вектора стану. Відзначимо, що процедура відновлення розпочинається тільки в першій ситуації (див. табл. 3.4). Це означає, що в моделі розпочинається процедура формування ланцюжків фіктивних станів і мають бути реалізовані переходи в перші фіктивні стани першого, другого і третього ланцюжків. Інтенсивність цих переходів визначає інтенсивність базової події $\mathbf{3L_p}$ і коефіцієнти **q1, q2 і q3**. В правила модифікації компонент вектора стану для першої ситуації і для кожного ланцюжка необхідно включити зміну компонент **V5:= 1, V6:= 1 і V7:= 1**. В другій ситуації процедура відновлення не розпочинається, так як всі заплановані відновлення вже використані V3 = K_v (див. табл. 3.4). В третій ситуації процедура відновлення також не розпочинається, так як в ядрі мажоритарної структури залишилося (наявні) 2 працездатні (справні) ПАМ і відмова одного з них призводить до критичної відмови відмовостійкої системи (див. табл. 3.4). Тому в ПМКВС для другої та третьої ситуацій доповнень вносити не потрібно.

Зауважимо, що ми здійснюємо розроблення надійнісної моделі відмовостійкої системи, за допомогою якої будемо визначати показники надійності "тривалість безвідмовної роботи" та "ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі експлуатації". Для визначення таких показників вважається, що стан критичної відмови є поглинаючим і відновлення працездатності ПАМ в цьому стані до уваги не приймається.

Крок 3. Удосконалення представлення компонент САМ для базової події 2 "Відмова мажоритарного елемента". В моделі ця подія також не повинна відбуватися у фіктивних станах ланцюжка. Тому в опис всіх ситуацій, в яких відбувається базова подія 2, необхідно включити умову, що **V5 = 0, V6 = 0, V7 = 0**. Це означає, що в моделі базова подія 2 буде відбуватися тільки в реальних станах об'єкта дослідження. Процедура відновлення працездатності мажоритарного елемента не передбачена, так як його відмова призводить до критичної відмови відмовостійкої системи. Зазначимо, що при проектуванні

відмовостійких систем з мажоритарною структурою необхідно виконувати вимогу, за якою інтенсивність відмов мажоритарного елемента має на два-три порядки бути нижчою від інтенсивності відмов модулів ядра. В правила модифікації компонент вектора стану для всіх ситуацій доповнення не вносяться.

Крок 4. Удосконалення представлення компонент САМ для базової події 3 "Закінчення процедури відновлення несправного ПАМ". Специфіка використання методу фаз Ерланга обумовлює наявність в САМ шести ситуацій для базової події 3, які представлені на кроках 4.1 – 4.6.

Крок 4.1. Опис першої ситуації повинен "розпізнавати" стан, який відображає початок процедури відновлення несправного ПАМ. Цей стан є першим фіктивним станом першого ланцюжка фіктивних станів. А також він повинен "відслідковувати" формування всіх наступних станів першого ланцюжка. Для цього в формалізований опис ситуації необхідно ввести таку складову: **((V5 > 0) AND (V5 < K_{e1}))**. Для формування кожного наступного фіктивного стану ланцюжка ПМКВС треба представити в такому вигляді **V5:=V5+1**.

Крок 4.2. Опис другої ситуації повинен "розпізнавати" стан, який відображає закінчення процедури формування першого ланцюжка фіктивних станів. Для цього в формалізований опис ситуації необхідно ввести таку складову: **(V5 = K_{e1})**. Після закінчення процедури формування фіктивних станів першого ланцюжка правилом модифікації компонент вектора стану треба вернути компоненту V5 в початковий стан, тобто **V5:= 0** і представити факт повернення в ядро мажоритарної структури працездатного ПАМ **(V1:=V1+1)**.

Крок 4.3. Опис третьої ситуації повинен "розпізнавати" перший фіктивний стан другого ланцюжка фіктивних станів. А також він повинен "відслідковувати" формування всіх наступних станів ланцюжка. Для цього в формалізований опис ситуації необхідно ввести таку складову: **((V6 > 0) AND (V6 < K_{e2}))**. Для формування кожного наступного фіктивного стану другого ланцюжка правило модифікації компонент вектора стану треба

представити в такому вигляді **V6:=V6+1**.

Крок 4.4. Опис четвертої ситуації повинен "розпізнавати" стан, який відображає закінчення процедури формування другого ланцюжка фіктивних станів. Для цього в формалізований опис ситуації необхідно ввести таку складову: **(V6 = K_{e2})**. Після закінчення процедури формування фіктивних станів другого ланцюжка правилом модифікації компонент вектора стану треба вернути компоненту V6 в початковий стан, тобто **V6:= 0** і представити факт повернення в ядро мажоритарної структури працездатного ПАМ **(V1:=V1+1)**.

Крок 4.5. Опис п'ятої ситуації повинен "розпізнавати" перший фіктивний стан третього ланцюжка фіктивних станів. А також він повинен "відслідковувати" формування всіх наступних станів ланцюжка. Для цього в формалізований опис ситуації необхідно ввести таку складову: **((V7 > 0) AND (V7 < K_{e3}))**. Для формування кожного наступного фіктивного стану другого ланцюжка правило модифікації компонент вектора стану треба представити в такому вигляді **V7:=V7+1**.

Крок 4.6. Опис шостої ситуації повинен "розпізнавати" останній фіктивний стан останнього (в прикладі третього) ланцюжка і фактично закінчення процедури відновлення несправного ПАМ. Для цього в формалізований опис ситуації необхідно ввести таку складову: (в прикладі **V7 = K_{e3}**). В правилі модифікації компонент вектора стану крім повернення початкового значення компоненті вектора стану V7, тобто **V7:= 0** треба представити факт повернення в ядро мажоритарної структури працездатного ПАМ **V1:=V1+1**.

Модифікована САМ відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {2 з 3} представлена в таблиці 3.4. Побудований на основі цієї САМ граф станів з запланованою кількістю відновлень K_v = 4 і з представленням тривалості процедури відновлення ПАМ після відмови законом розподілу, який змодельовано трьома ланцюжками відповідно з двома, трьома і двома фазами Ерланга, зображений на рис. 3.3.

Таблиця 3.4 – Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {2 з 3}, в якій тривалість процедури відновлення ПАМ після відмови представлено композицією трьох законів розподілу Ерланга

БП	**Опис ситуацій, в яких відбуваються базові події**	**ФРІБП**	**ПМКВС**
1	2	3	4
БП1	1. (V1 = 3) AND (V2 = 1) AND (V3 < K_v) AND (V4 = 1) **AND (V5 = 0) AND (V6 = 0) AND (V7 = 0)**	$3*L_p*\mathbf{q_1}$	V1:=V1-1; V3:=V3+1; **V5:=1**
		$3*L_p*\mathbf{q_2}$	V1:=V1-1; V3:=V3+1; **V6:=1**
		$3*L_p*\mathbf{q_3}$	V1:=V1-1; V3:=V3+1; **V7:=1**
	2. (V1 = 3) AND (V2 = 1) AND (V3 = K_v) AND (V4 = 1) **AND (V5 = 0) AND (V6 = 0) AND (V7 = 0)**	$3*L_p$	V1:=V1-1; V4:=0
	3. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0 < V3 ≤ K_v) AND (V4=0) AND (V5 = 0) AND (V6 = 0) AND (V7 = 0)	$2*L_p$	V1:=V1-1
БП2	1. ((V1 = 3) OR (V1 = 2)) AND (V2 = 1) AND ((V4 = 0) OR (V4 = 1)) **AND (V5 = 0) AND (V6 = 0) AND (V7 = 0)**	L_m	V2:=0
БП3	1. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0 < V3 <= K_v) AND (V4 = 1) **AND ((V5 > 0) AND (V5 < K_{e1}))**	M_1	**V5:=V5+1**
	2. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0 < V3 <= K_v) AND (V4 = 1) **AND (V5 = K_{e1})**	M_1	**V1:=V1+1; V5:=0**
	3. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0 < V3 <= K_v) AND (V4 = 1) **AND ((V6 > 0) AND (V6 < K_{e2}))**	M_2	**V6:=V6+1**
	4. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0 < V3 <= K_v) AND (V4 = 1) **AND (V6 = K_{e2})**	M_2	**V1:=V1+1; V6:=0**
	5. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0 < V3 <= K_v) AND (V4 = 1) **AND ((V7 > 0) AND (V7 < K_{e3}))**	M_3	**V7:=V7+1**
	6. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0 < V3 <= K_v) AND (V4 = 1) AND **(V7 = K_{e3})**	M_3	**V1:=V1+1; V7:=0**
Критична відмова наступає за умови: (V1 = 1) OR (V2 = 0)			

3.4 Порівняльне дослідження показників надійності відмовостійких систем при представленні тривалостей процедур законом розподілу Ерланга і експонеційним законом розподілу

В моделюванні відмовостійких систем бачиться три варіанти використання методу фаз Ерланга:

а) якщо є відомими реальні закони розподілу для тривалостей процедур, то вирішується задача апроксимації їх законом розподілу Ерланга і отримуються параметри ланцюжків фіктивних станів (кількість фіктивних

станів та інтенсивність переходів із стану в стан);

б) якщо реальні закони розподілу для тривалостей процедур невідомі, але є зрозумілою фізична суть потрібних законів розподілу. З цього витікає, що треба відмовитись від представлення випадкових величин експоненційним законом розподілу. Наприклад, тривалості процедури відновлення (ремонту, заміни) апаратних засобів, тривалості процедури оновлення програмного забезпечення після виявлення дефекту в процесі експлуатації відмовостійкого ПАМ. В цьому випадку вибирається і застосовується закон розподілу Ерланга відповідного порядку, що підвищує достовірність показників ефективності чи надійності відмовостійкого ПАМ;

в) якщо закони розподілу для тривалостей всіх процедур є невідомими, і тому в моделі відмовостійкого ПТК для них використовується експоненційний закон розподілу, то проектант отримує граничне значення показника ефективності чи надійності [136, с. 58 – 59]. При цьому не завжди є очевидним, яким є це граничне значення – верхнім чи нижнім. Тому використання закону розподілу Ерланга будь-якого порядку дозволяє отримати відповідь на поставлене питання.

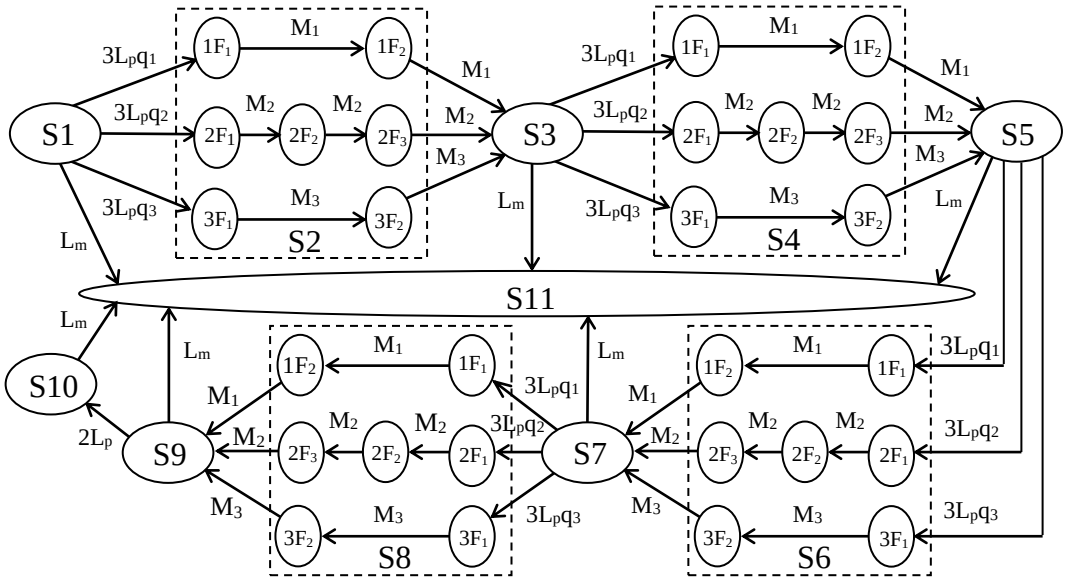

Рисунок. 3.3 – Надійнісна модель відмовостійкої системи з мажоритарною структурою «2 із 3»: тривалість процедури відновлення ПАМ після відмови представлено композицією трьох законів розподілу Ерланга відповідно 2-го, 3-го і 2-го порядку; кількість відновлень – 4.

Ілюстрацію можливостей запропонованої методики покажемо на прикладі дослідження впливу порядку закону розподілу Ерланга для тривалостей відновлення відмовостійкого ПАМ з мажоритарною структурою {2 із 3} на значення показників її надійності. Надійність відмовостійкого ПАМ оцінюється такими показниками: ймовірність безвідмовної роботи на заданому інтервалі часу експлуатації $P_{б.р}(t_e)$ і середнім значенням тривалості безвідмовної роботи $T_{б.р}$. Для порівняння показані значення показників надійності, визначені з використанням експоненційного закону розподілу для тривалостей відновлення ПАМ.

Дослідження надійності відмовостійкої системи з мажоритарною структурою «2 із 3», в склад якої входять три однотипні ПАМ і мажоритарний елемент. В процесі експлуатації передбачено відновлення (ремонт, заміна) несправних модулів ядра. *Тривалість відновлення* Tv *має постійне значення.* Кількість відновлень Kv є обмежена. Мажоритарний елемент (МЕ) відновленню не підлягає.

Дослідження 1. Необхідно показати залежності ймовірності безвідмовної роботи $P_{б.р}$ відмовостійкої ПАС від тривалості її експлуатації t_e при різних значеннях порядку закону Ерланга. При цьому фіксованими мають бути тривалість відновлення, кількість запланованих відновлень і інтенсивності відмов ПАМ і МЕ. Вхідні дані: порядок закону розподілу Ерланга K_e = 5; 10; 50; 100; 150; інтенсивність відмов ПАС L_p = 1e-3 1/год; інтенсивність відмов МЕ L_m = 1e-5 1/год; тривалість відновлення T_v = 0,5 год; кількість запланованих відновлень K_v = 5. На рисунку 3.4 зображена залежність $P_{б.р}(t_e)$ отриману без використання методу фаз Ерланга (найнижча крива) і сімейство таких же залежностей з використанням методу фаз Ерланга. Залежності ймовірності безвідмовної роботи від тривалості експлуатації, зображені на рис. 3.4, а також рис. 3.5 і рис. 3.6, отримані за допомогою програмного засобу. Пояснення до рисунку 3.4 представлено в таблиці 3.5.

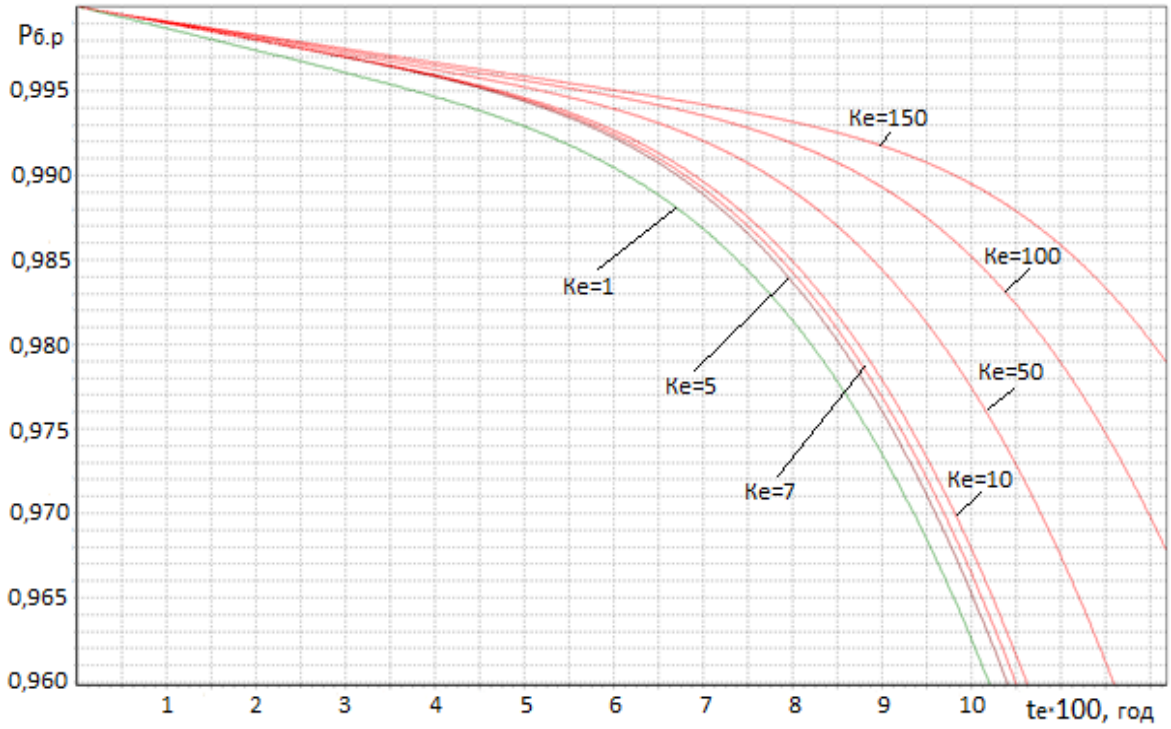

Рисунок 3.4 – Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи $Р_{б.р}$ від тривалості експлуатації t_e при різних значеннях порядку закону Ерланга

Таблиця 3.5 – Результати досліджень показників надійності відмовостійкої ПАМ для п’яти варіантів апроксимуючого закону розподілу для тривалостей відновлення

Закон розподілу		Експоненційний закон розподілу	Закон розподілу Ерланга				
Показники надійн.	$Р_{б.р}(1000)$	0,9625	0,9665	0,9680	0,9774	0,9852	0,9894
	$Т_{б.р}$, год	2459	2476	2489	2588	2712	2835
Порядок з-ну Ерл.	$К_е$	1	5	10	50	100	150
Параметри графа	к-ть станів	13	33	58	258	508	758
	к-ть переходів	35	70	120	520	1020	1520

Висновок до дослідження 1: Аналіз отриманих результатів показав, що різниця між значеннями ймовірності безвідмовної роботи на інтервалі експлуатації 1000 год і тривалостями безвідмовної роботи, визначених з використанням закону Ерланга і експоненційного закону розподілу, зростає з збільшенням порядку закону Ерланга. Якщо тривалість відновлення має фіксоване значення, то методика дає можливість збільшувати порядок закону розподілу до дуже великих значень, чим суттєво підвищити достовірність значень показників надійності.

Дослідження 2. Необхідно показати залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої ПАС від тривалості її експлуатації при різних значеннях кількості запланованих відновлень. При цьому фіксованими мають бути порядок закону Ерланга, середнє значення тривалості відновлення, кількість запланованих відновлень і інтенсивності відмов ПАС і МЕ. Вхідні дані: порядок закону розподілу Ерланга K_e = 10; кількість запланованих відновлень K_v = 5; 10; 20; 40. Решта вхідних даних аналогічні вхідним даним дослідження 1. Результати досліджень представлені на рисунку 3.5 і пояснення до рисунку в таблицях 3.6, 3.7 і 3.8.

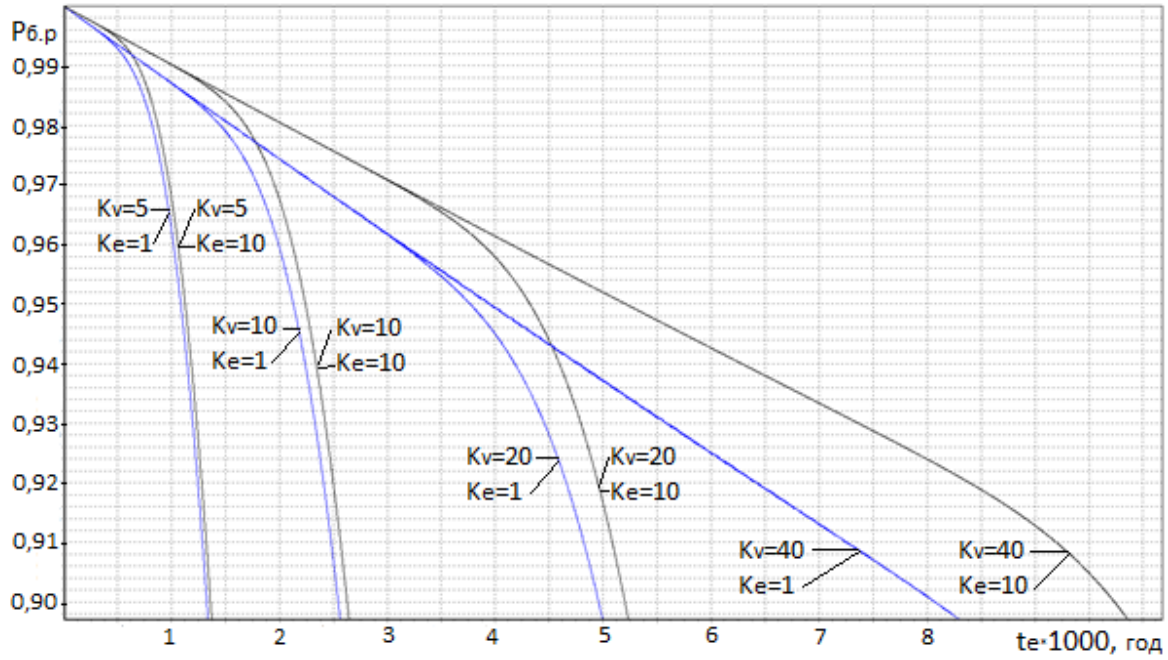

Рисунок 3.5 – Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої ПАС від тривалості експлуатації при різних значеннях кількості запланованих відновлень

Наведені в табл. 3.6 значення тривалості експлуатації визначені за умови, що ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкого ПАМ буде не нижчою 0,9.

Залежність ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої ПАС від тривалості експлуатації при різних значеннях кількості запланованих відновлень, коли тривалість спостереження становить 20000 годин, показана на рисунку 3.6.

Таблиця 3.6 – Залежність тривалості експлуатації, на якій ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкого ПАМ буде не нижчою 0,9, від кількості запланованих відновлень

Кількість запланованих відновлень – Kv		5	10	20	40
Тривалість експлуатації (год) для $P_{б.р} \geq 0,9$	експоненційний закон розподілу	1310	2540	4935	8060
	закон розподілу Ерланга ($K_e = 10$)	1370	2625	5185	9750
Різниця, год		60	85	250	1690

Таблиця 3.7 – Залежність середнього значення тривалості безвідмовної роботи від кількості запланованих відновлень

Кількість запланованих відновлень – Kv		5	10	20	40
Сер. значення тривалості безвідмовної роботи, год	експоненційний закон розподілу	2459	4056	7147	12936
	закон розподілу Ерланга (Ke = 10)	2489	4123	7310	13367
Різниця, год		30	67	163	431

Таблиця 3.8 – Розмірності графів станів при різних кількостях запланованих відновлень

Кількість запланованих відновлень – Kv		5	10	20	40
Граф станів і переходів (к-ть ст./к-ть пер.)	експоненційний закон розподілу	13/35	23/65	43/125	83/245
	закон розподілу Ерланга (Ke = 10)	59/120	113/235	223/465	443/925

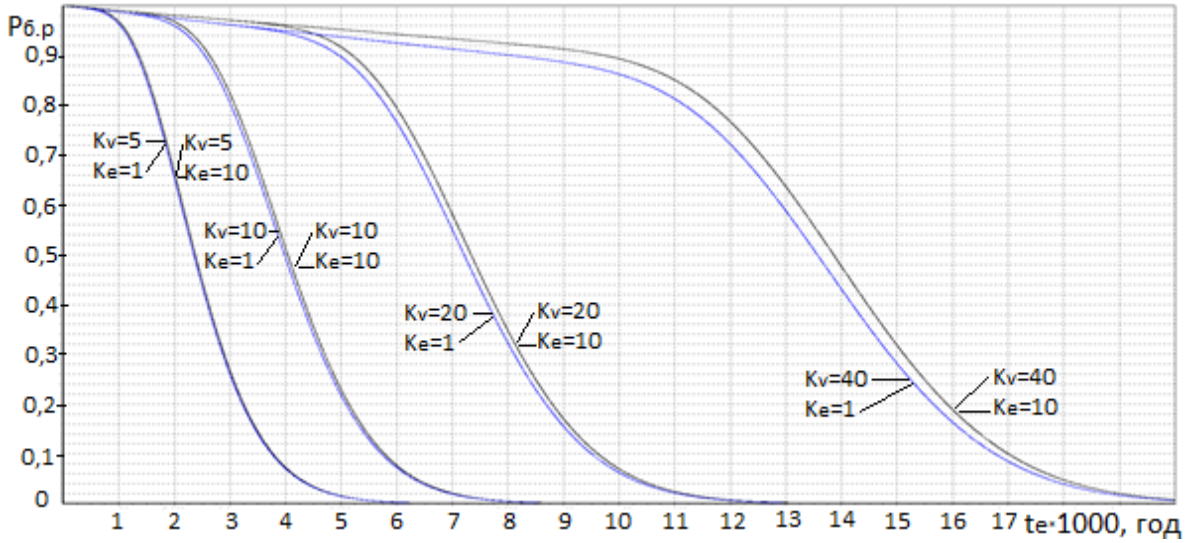

Рисунок 3.6 – Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої ПАС від тривалості експлуатації при різних значеннях кількості запланованих відновлень, коли спостереження триває 20000 годин

Висновок до дослідження 2: Аналіз отриманих результатів показав, що різниця між значеннями тривалості експлуатації, на яких ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої ПАС буде не нижче від заданого значення, визначених з використанням закону Ерланга і експоненційного

закону розподілу, істотно залежить (зростає) від кількості запланованих відновлень. Аналогічна тенденція зберігається (спостерігається) і для різниці між середніми значеннями тривалості безвідмовної роботи.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Метод фаз Ерланга (м.ф.Е.) забезпечує підвищення достовірності показників надійності відмовостійких систем.

2. Ряд авторів, які проводили дослідження м.ф.Е. [119, с. 37; 155, с. 197], вказують як недолік значне зростання простору (кількості) станів, а відповідно і зростання розмірності системи диференціальних рівнянь. Але автоматизація процесу використання м.ф.Е. робить цю обставину несуттєвою.

3. Для відмовостійких систем, у яких тривалість процедури відновлення має постійну (фіксовану) тривалість, м.ф.Е. дає змогу підвищувати достовірність визначення показників їх надійності.

4. В моделюванні відмовостійких систем бачиться три варіанти використання методу фаз Ерланга:

а) якщо є відомими реальні закони розподілу для тривалостей процедур, то вирішується задача апроксимації їх законом розподілу Ерланга і отримуються параметри ланцюжків фіктивних станів (кількість фіктивних станів та інтенсивність переходів із стану в стан);

б) якщо реальні закони розподілу для тривалостей процедур невідомі, але є зрозумілою фізична суть потрібних законів розподілу і з цього витікає що треба відмовитись від представлення випадкових величин (наприклад, тривалості процедури відновлення) експоненційним законом розподілу; в цьому випадку вибирається і застосовується закон розподілу Ерланга відповідного порядку, що підвищує достовірність показників ефективності чи надійності об’єкта дослідження;

в) якщо закони розподілу для тривалостей всіх процедур є невідомими, і тому в моделі об’єкта дослідження для них використовується

експоненційний закон розподілу, то проектант отримує граничне значення показника ефективності чи надійності [136, с. 58 – 59]. При цьому не завжди є очевидним, яким є це граничне значення – верхнім чи нижнім. Тому використання закону розподілу Ерланга будь-якого порядку дозволяє отримати відповідь на поставлене питання.

5. Розроблена за запропонованою методикою структурно-автоматна модель відмовостійкої системи дає можливість автоматизовано будувати багато варіантів графа станів, обумовлених зміною параметрів відмовостійкої системи і ланцюжків фіктивних станів. В ланцюжках можна встановлювати довільні значення:

- кількості фіктивних станів в кожному ланцюжку;
- інтенсивностей переходів між станами в кожному ланцюжку.

Можна змінювати вагові коефіцієнти q_i. Тобто можна настроювати ланцюжки на потрібний варіант (тип) закону розподілу ймовірності для тривалостей процедур або інтервалів часу між сусідніми подіями процесу. При цьому кількість ланцюжків фіктивних станів є фіксованою. Якщо в процесі виконання проектних завдань необхідно змінити кількість ланцюжків, то треба здійснити модифікацію структурно-автоматної моделі згідно запропонованої методики.

Основні результати розділу 3 опубліковані в працях: [16; 61; 69].

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ПІДТРИМКИ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБЛЕННЯ ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНИХ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВІДМОВОСТІЙКИХ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Програмний засіб, розроблений на основі методів, методик і алгоритмів поданих в розділах 2 і 3, формується як нова складова частина програмного комплексу ASNA-2 [85; 97]. Програмний комплекс ASNA-2 призначений для: побудови моделей у вигляді графа станів та переходів за структурно-автоматними моделями об'єкта дослідження, формування та розв'язання системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена, визначення та представлення показників надійності (ймовірність безвідмовної роботи на заданому інтервалі експлуатації системи і середнє значення тривалості безвідмовної роботи).

Удосконалений програмний комплекс ASNA-2 дасть змогу проектантам відмовостійких програмно-технічних комплексів на етапі системотехнічного проектування в автоматизованому режимі вирішувати такі задачі: розроблення структурно-автоматних моделей; валідація структурно-автоматних моделей; модифікація структурно-автоматних моделей з метою заміни для тривалостей процедур експоненційного закону розподілу на закон розподілу Ерланга заданого порядку.

Програмний комплекс призначений для побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей марковського типу на основі структурно-автоматних моделей відмовостійких систем.

Програмний комплекс може використовуватись для вирішення задач проектування складних інформаційних систем відповідального призначення.

Розроблені програмні модулі призначені для розроблення опорного графа станів і переходів та валідації структурно-автоматних моделей відмовостійких систем. В методиці валідації структурно-автоматної моделі

опорний граф станів використовується як тестова модель.

4.1 Опис процесу побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів

Процес побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмних комплексів у вигляді графа станів та переходів з допомогою розробленого програмного засобу складається з наступних кроків (див. рис. 4.1):

Крок 1: опис об’єкта дослідження – полягає у введенні в програмний засіб наступних даних: базові події (події, що зумовлюють завершення певного процесу, та перехід системи зі стану в стан); показники, що описують поточний стан системи; параметри, що встановлюють певні константні показники в системі. Знаходження оптимальних значень вхідних параметрів є задачею, яку, за допомогою розробленого ПЗ, повинен вирішити проектант.

Крок 2: побудова опорного графа – полягає у автоматизованій побудові варіанта графа станів та переходів, що базуватиметься на такому наборі значень вхідних параметрів, завдяки якому кількість станів у вихідному просторі станів буде мінімальною, але який, разом з тим, повністю описуватиме поведінку системи. Підбір таких параметрів – задача, що має бути вирішена користувачем аналітично. Побудова здійснюється за методом, описаним у розділі 2.

Крок 3: генерування структурно-автоматної моделі на основі опорного графа – полягає у автоматичній побудові структурно-автоматної моделі за методом, описаним у розділі 2.

Крок 4: корегування згенерованої структурно-автоматної моделі – полягає у ручній перевірці сформованих компонентів структурно-автоматної моделі, внесенні виправлень та доповнень.

Крок 5: конфігурування закону розподілу Ерланга для виразів структурно-автоматної моделі – полягає у визначенні виразів структурно-

автоматної моделі, що описують переходи, зумовлені закінченням процесу, тривалість перебування в яких не відповідає експоненційному закону розподілу, та встановленні для них закону розподілу Ерланга, що апроксимуватиме реальні тривалості. Даний крок є повністю аналітичною задачею, яку повинен вирішити проектант.

Крок 6: підготовка наборів параметрів.

Крок 7: побудова графів станів для різних наборів параметрів системи – полягає в автоматичній побудові графа станів та переходів на основі структурно-автоматної моделі для заданого набору параметрів системи.

Крок 8: експорт згенерованих графів – полягає в автоматичному формуванні файлів, сумісних із ПЗ, що має функціонал формування на основі графів станів та переходів системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, їх розв’язання.

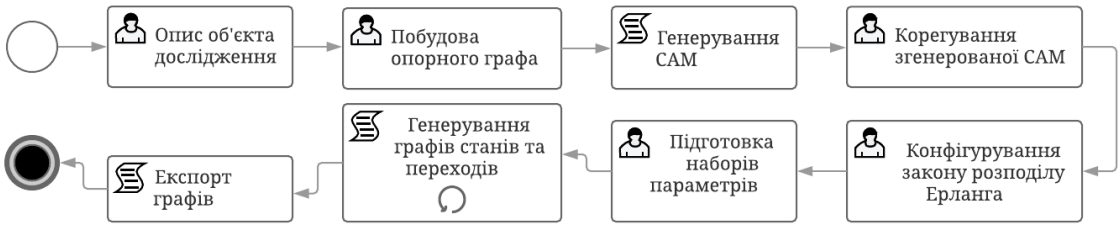

Рисунок 4.1 – BPMN-діаграма процесу побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей у вигляді графа станів та переходів за допомогою розробленого ПЗ

4.2 Обгрунтування та опис технологій, обраних для програмної реалізації

Із врахуванням потреб щодо можливостей роботи із ПЗ на різних операційних системах, для розробки було обрано: мову програмування TypeScript (діалект JavaScript, з підтримкою строгої типізації та об’єктно-орієнтованої парадигми програмування, розроблений компанією Microsoft), платформу Electron (платформа для розробки застосунків для персональних комп’ютерів, використовується зокрема у відомих редакторах коду Atom, Visual Studio Code), бібліотеки для побудови користувацьких інтерфейсів

React, Office Ui Fabric (набір готовий компонентів, стилізованих у брендовому стилі компанії Microsoft), пакети MathJS (призначений для проведення математичних обрахунків), React-Katex (призначений для виводу математичних та логічних виразів у форматі Latex), Ramda (набір допоміжних функцій, орієнтованих на декларативну парадигму програмування), Dagre-D3 (пакет для візуалізації орієнтованих графів)., Linux та Windows системи без встановлення додаткових компонентів.

4.3 Опис користувацького інтерфейсу та можливостей розробленого програмного засобу

Користувацький інтерфейс розробленого ПЗ являє собою вікно із панеллю меню, та основним вмістом. Панель меню містить пункти для створення нового проекту, збереження проекту у файлову систему, його завантаження (див. рис. 4.2). Збереження та завантаження проекту здійснюється з допомогою серіалізації та десеріалізації стану програми, що зберігається в Redux Store. Файл проекту має формат JSON, та розширення *.asna.

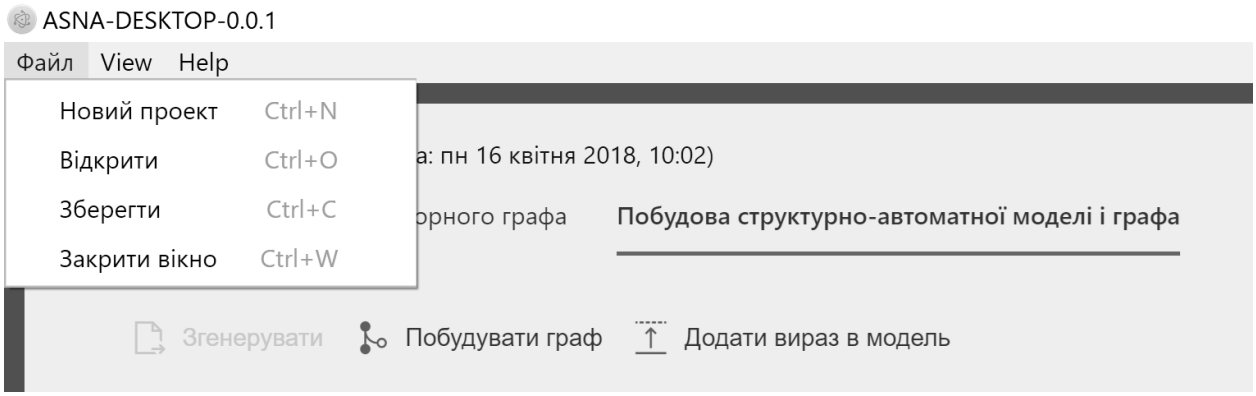

Рисунок 4.2 – Меню “Файл” з панелі меню

Основний вміст вікна поділений на три вкладки. Перша вкладка призначена для вводу опису об’єкта дослідження (див. рис. 4.3), містить 3 блоки для вводу базових подій, досліджуваних параметрів, компонент вектора стану. Додавання та видалення об’єктів реалізовано з допомогою відповідних кнопок, редагування реалізовано з допомогою вбудованих полів

вводу. Також, реалізовано підтримку формульних значень: інтенсивність базових подій, початкові значення компонент вектора стану та досліджувані параметри можуть бути виражені через інші досліджувані параметри, крім того, значення компонент вектора стану можуть бути виражені через інші компоненти вектора стану. Формульні значення підтримують лише арифметичні дії.

Компоненти для вводу формульних значень використовують формат LaTex для відображення. Компонент стає активним при натисканні, значення при цьому відображається у звичайному форматі. Збереження значення здійснюється при втраті компонентом редагування фокусу курсора.

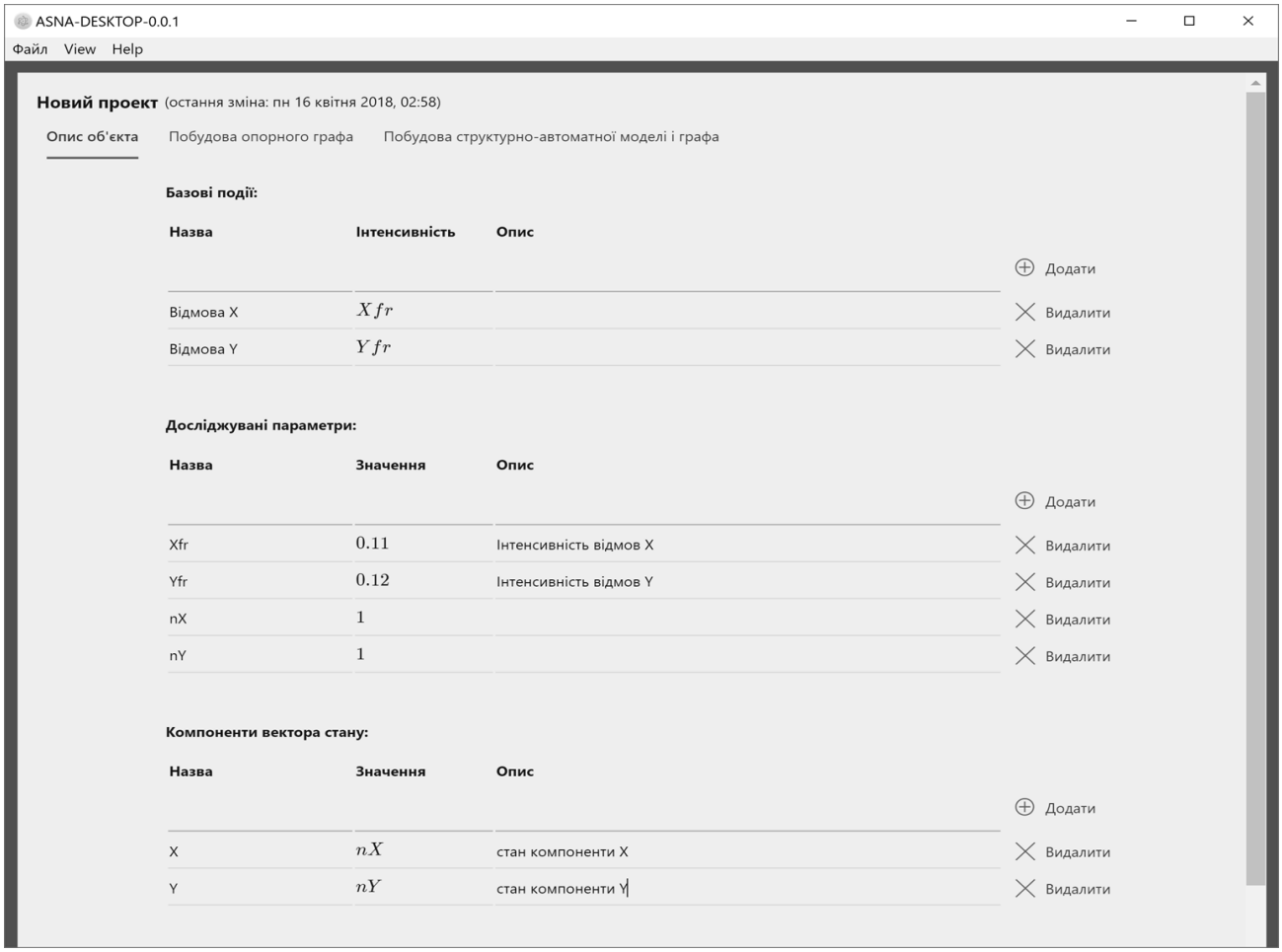

Рисунок 4.3 – Користувацький інтерфейс екрану вводу опису об’єкта дослідження

Для кожного введеного об’єкта, користувач може додати опис у відповідне поле.

В ролі унікальних ідентифікаторів вищеперелічених об’єктів в

розробленому ПЗ служать імена; для уникнення колізій реалізовано відповідні валідації, також система перевіряє можливість обчислення введених формульних значень (див. рис. 4.4); у випадку, якщо вираз неможливо обробити, або вираз посилається на імена параметрів/компонент вектора стану, що не введені в систему, поле вводу буде підсвічуватись, при наведенні на поле вводу відобразиться повідомлення.

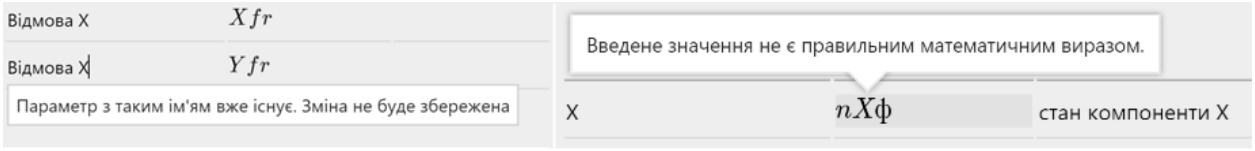

Рисунок 4.4 – Зразки валідаційних повідомлень

Друга вкладка призначена для побудови опорного графа. Інтерфейс екранної форми поділено на три колонки: колонка вибору стану, колонка вибору події, колонка формування переходів (див. рис. 4.5).

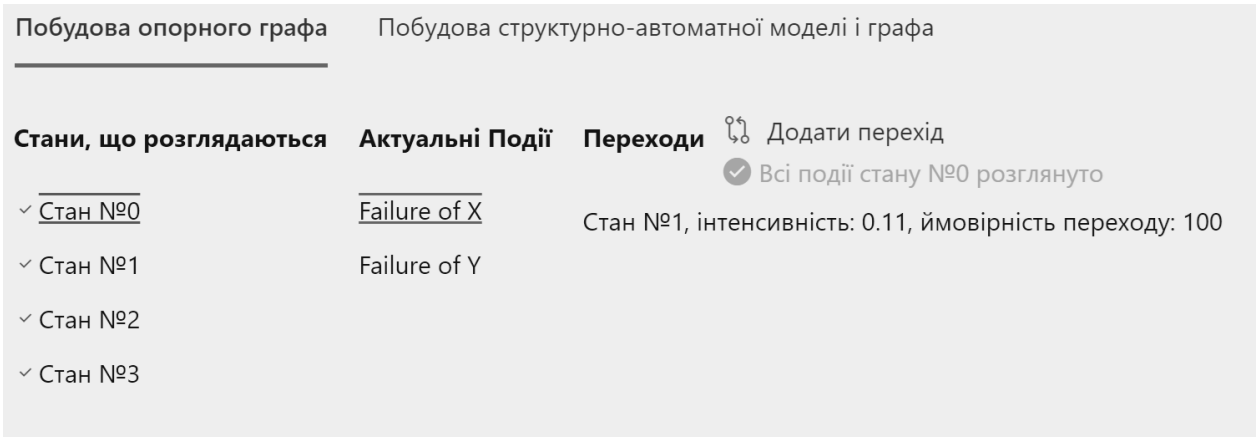

Рисунок 4.5 – Екранна форма побудови опорного графа

При виборі пари подія-стан, в третій колонці активуються кнопки додавання переходу, відображаються вже додані переходи, з можливістю їх видалення та редагування. Також, третя колонка містить кнопку маркування стану як опрацьованого. На рисунку 4.6 зображено діалогове вікно формування нового переходу.

Діалогове вікно містить рядок відображення досліджуваних параметрів (на екранній формі названі «константи»), рядок конфігурування події, що спричинила перехід (редагування інтенсивності та ймовірності переходу), а також редактор компонент вектора стану. При формуванні вихідного стану

система здійснює перевірку на наявність заданої комбінації значень компонент вектора стану серед списку уже доданих станів. У разі якщо сформований стан ідентичний одному з існуючих, буде здійснено запис щодо перехід у нього. Також, при видаленні переходу, система здійснює перевірку на наявність ізольованих вершин в графі, що формується; знайдені ізольовані вершини видаляються. Для унікальної ідентифікації станів використовується порядковий номер стану.

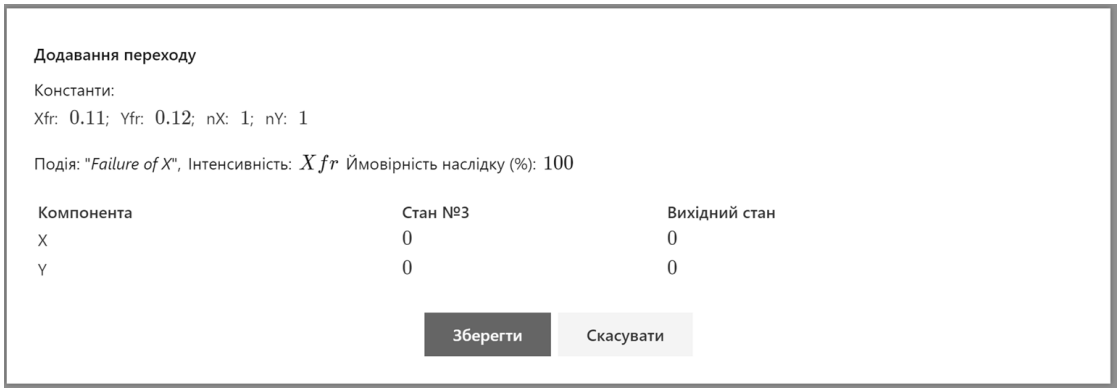

Рисунок 4.6 – Формування нового переходу між станами

Третя вкладка користувацького інтерфейсу містить екранні форми для побудови структурно-автоматної моделі та генерування графів станів та переходів.

Керування інтерфейсом на третій вкладці здійснюється кількома елементами: кнопками командної панелі у верхній частині екрану (див. рис. 4.7), кнопками, асоційованими із виразом структурно-автоматної моделі. Крім того, секція візуалізації графа містить кнопку «Відобразити», з допомогою якої здійснюється побудова візуалізації сформованого графа.

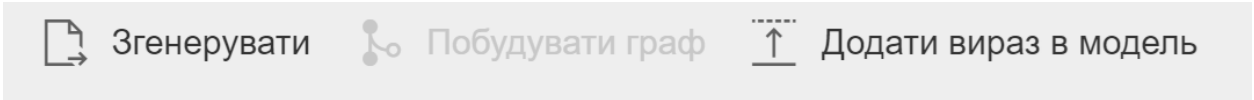

Рисунок 4.7 – Командна панель екрану побудови структурно-автоматної моделі та генерування графів станів та переходів

Розпочати побудову САМ користувач може, скориставшись кнопкою «Згенерувати», яка служить для побудови САМ на основі опорного графа за алгоритмом, описаним в розділі 2. Крім того, побудова САМ може здійснюватись вручну, натисненням кнопки «Додати вираз в модель», після

натиснення цієї кнопки, в кінець таблиці САМ додається новий вираз, що складається з першої доступної базової події, умови «1=1» (що завжди виконуватиметься), інтенсивністю 1, ймовірністю 100, з не заданим законом Ерланга та з порожніми модифікаціями компонент вектора стану. На рисунку 4.8 відображено екранні компоненти для редагування САМ.

Редагування виразів структурно-автоматної моделі здійснюється за допомогою вбудованих текстових полів. При наведенні курсора миші на вираз, стають доступними кнопки копіювання та видалення виразу.

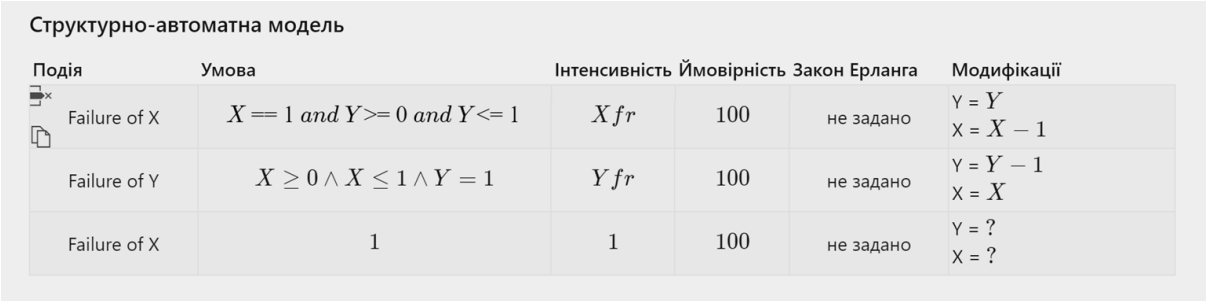

Рисунок 4.8 – Екранна компонента для редагування структурно-автоматної моделі, після додавання в неї нового виразу та при активації поля вводу умови першого виразу

Вибір базової події для виразу графа реалізовано з допомогою випадаючого списку (див. рис. 4.9).

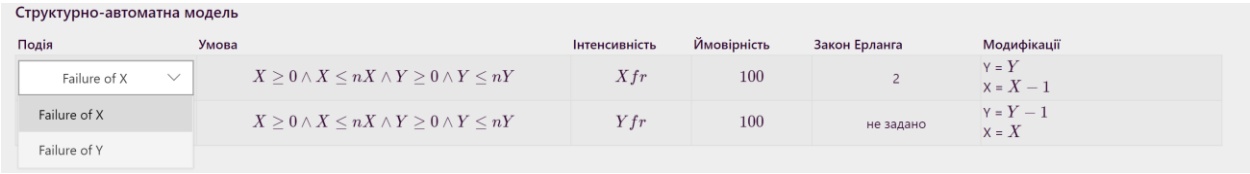

Рисунок 4.9 – Вибір базової події зі списку доступних з допомогою випадаючого списку

Після генерування графа станів та переходів, що здійснюється за допомогою відповідної кнопки на командній панелі, переходи відображаються у списку в нижній правій частині екрану. Для того, щоб забезпечити продуктивність інтерфейсу в разі потреби відобразити тисячі переходів, реалізовано функціонал віртуалізації списку – на екрані відбувається рендерінг лише видимої його частини, інші елементи списку з’являються у списку лише після прокрутки.

Для дослідження вхідних параметрів системи, користувач може перейти на вкладку «Опис об’єкта дослідження», внести зміни в параметри

системи, повернутися на вкладку «Побудова структурно-автоматної моделі і графа» та сформувати новий варіант графа станів та переходів.

Як було зазначено вище, візуалізація графа здійснюється за допомогою пакету D3-Dagre. Для візуалізації, цей пакет використовує векторну графіку, що дозволяє будувати графи із значною кількістю вершин. У реалізованому в розробленому ПЗ функціоналі візуалізації, фіктивні стани, утворені за методом фаз Ерланга, відображаються іншим кольором (див. рис. 4.10).

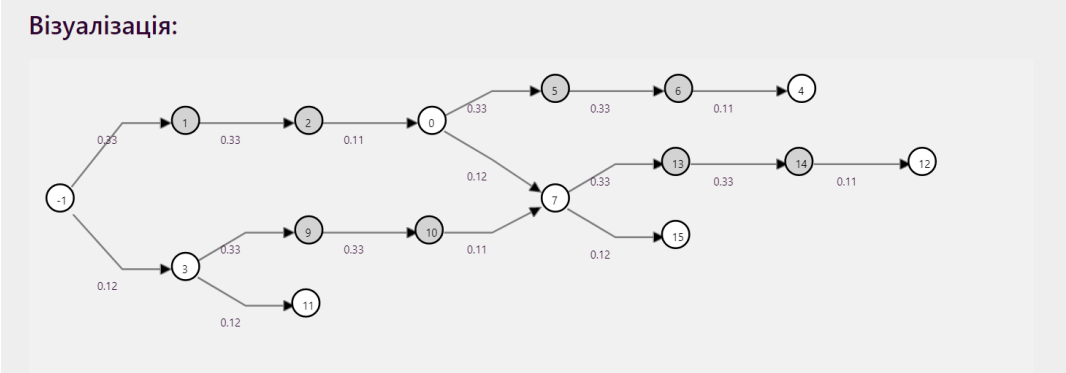

Рисунок 4.10 – Приклад візуалізації графа станів, з виділеними окремим кольором фіктивними станами

На рисунку 4.11 зображено приклад побудованої тестової САМ, із врахуванням порядку закону Ерланга для одного з процесів.

Оскільки основною задачею розробки даного ПЗ була перевірка практичної цінності та працездатності розроблених та описаних в розділах 2, 3 методів, швидкість роботи алгоритмів, зокрема алгоритму генерування графа станів на основі САМ, із врахуванням порядку закону розподілу Ерланга, описаного в розділі 2, не входила до критеріїв якості. Не зважаючи на це, під час тестування фіксувався час побудови графа: для машини з процесором Intel Core i7-6700HQ 2.60 GHz, 16GB оперативної пам’яті, до прикладу, формування графа із 571 станом, 1050 переходів займає 9-16 секунд, побудова графа із 4246 станів, 4725 переходів займає 39-57 секунд (візуалізація графа до вказаного часу не входить). Часові заміри здійснювалися по 5 разів.

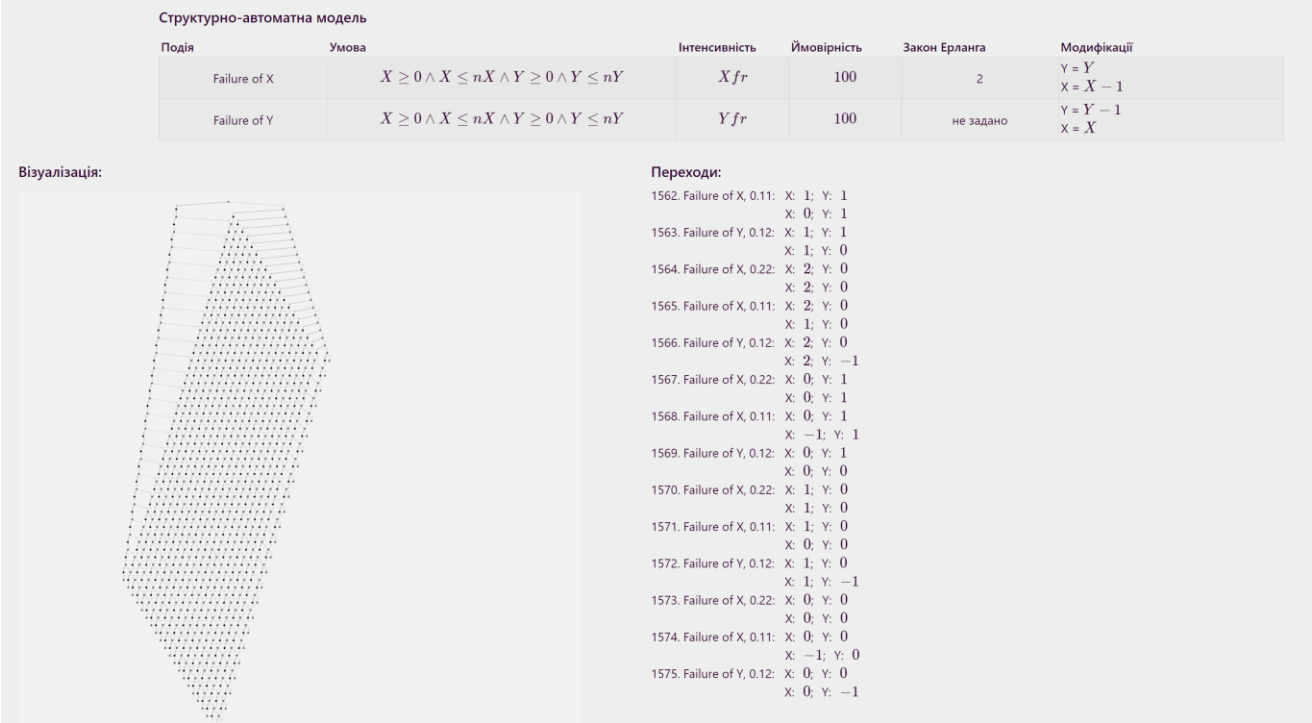

Рисунок 4.11 – Результати побудови тестового графа та його візуалізації. Результуючий граф містить 1096 станів, 1575 переходів, час побудови: 17 секунд

4.4 Приклад використання програмного засобу для розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей функціональної поведінки комплексу охоронної сигналізації, покладених в основу методики синтезу показників ефективності його складових

Приклади застосування запропонованих методів, методик і програмного засобу для розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем представлені в розділах 2, 3 та в Додатку В. В цьому підрозділі показано застосування програмного засобу для розроблення САМ функціональної поведінки об’єкта проектування. Об’єктом проектування є радіоелектронний комплекс охоронної сигналізації (КОС). Для формування технічного завдання на розроблення комплексу охоронної сигналізації мають бути проведені передпроектні дослідження. Результатом таких досліджень мають бути визначені вимоги до основних складових КОС, а саме до сейсмічного датчика, до методу і пристрою визначення типу рухомого об’єкта, до радіоканалу передавання повідомлень.

Для проведення передпроектних досліджень необхідно здійснити розроблення математичної моделі реакції КОС на перетин рухомим об’єктом зон контролю. Аналіз реакції КОС на перетин рухомим об’єктом зон контролю показав, що її математичне представлення відповідає дискретно-неперервній стохастичній системі [39; 93]. А тому для розроблення математичної моделі має бути використаний метод простору станів, в основу якого покладено розроблення графа станів і переходів. Для використання методу автоматизованої побудови графів станів для всіх доцільних варіантів реалізації КОС необхідно здійснити розроблення САМ.

В цьому розділі показану розроблену САМ одного із варіантів застосування КОС з встановленням по одному сейсмічному датчику в двох зонах контролю на маршруті можливого пересування рухомих об’єктів.

Для КОС, що розглядається, обґрунтована доцільність використання сейсмічних датчиків, які встановлюються біля зон контролю. Основними функціями радіоелектронного КОС є: фіксація рухомих об’єктів в зоні контролю, визначення типу (класифікація) рухомих об’єктів, скритне передавання повідомлень від сейсмічного датчика до контрольного пункту через радіоканал. В якості показників ефективності складових комплексу використовуються: ймовірність фіксації рухомого об'єкта сейсмічним датчиком в зоні контролю, ймовірність правильної класифікації типу рухомого об'єкта і ймовірність приймання повідомлення. Отже в склад КОС мають входити сейсмічні датчики (СД) з автономними системами виявлення, класифікації рухомого об’єкта і передавання радіосигналу (ВКОПР) про виявлений рухомий об’єкт (РО) та система приймання і відображення інформації (СПВІ). Кожна автономна система ВКОПР має безпосередній радіодоступ до СПВІ, тобто структура КОС є зірковою.

Постановка задачі синтезу показників ефективності складових комплексу передбачає два підходи. В першому – вважається заданим сейсмічний датчик, для якого експериментально визначається значення

показника його ефективності, а відтак за допомогою математичних моделей визначаються значення показників ефективності основних функцій комплексу. В другому – разом з показниками ефективності основних функцій комплексу за допомогою математичних моделей визначається значення показника ефективності сейсмічних датчиків. Задача синтезу значень показників ефективності складових КОС є розв’язаною, коли показник ефективності спроектованого КОС відповідає заданому значенню.

Розв'язання задачі синтезу в такій постановці є можливим завдяки розробленим математичним моделям реакції КОС на перетин рухомим об'єктом зон контролю, які крім показників ефективності складових комплексу враховують схеми розміщення сейсмічних датчиків на контрольованих маршрутах.

Комплекс охоронної сигналізації розгортається на ймовірних маршрутах пересування РО згідно обраної схеми розміщення СД. Для схем розміщення СД використовуємо умовне позначення у вигляді суми двох складових, у якій перша складова представляє кількість СД в дальній зоні контролю, а друга – в ближній зоні контролю. Зони контролю обираються на маршрутах на основі аналізу особливостей місцевості. В методиці розглянуто шість варіантів схем розміщення СД на контрольованому маршруті: {1+0); {2+0); {1+1); {2+1}; {1+2}; {2+2}.

Показником ефективності комплексу є ймовірність того, що користувач отримає повідомлення про появу рухомого об'єкта в кожній зоні контролю хоча б від одного СД. Цей показник в подальшому будемо називати "ймовірність виконання завдання". Значення цього показника залежить від значень показників ефективності складових КОС: ймовірності реакції сейсмічного датчика на появу РО в зоні контролю, ймовірності правильної класифікації типу РО, ймовірності приймання повідомлення, а також від використаної схеми розміщення сейсмічних датчиків на ймовірному маршруті пересування РО.

При інтуїтивному (експертному) заданні (виборі) значень цих показників для проектування КОС існує ризик висування завищених або занижених вимог, що суттєво ускладнює роботу розробника.

Метою роботи є визначення значень показників ефективності складових КОС, апаратна реалізація яких забезпечить для КОС задане (необхідне) значення показника його ефективності.

4.4.1 Методика синтезу показників ефективності складових комплексу охоронної сигналізації

Методика синтезу показників ефективності складових КОС створена на основі розроблених дискретно-неперервних стохастичних моделей реакції КОС на перетин рухомим об’єктом зон контролю з різними схемами розміщення в них СД. Кожна модель забезпечує можливість визначати залежність ефективності КОС від показників ефективності сейсмічного датчика, пристрою класифікації РО та системи передавання радіосигналів.

Розв’язання задачі синтезу показників ефективності складових КОС згідно запропонованої методики виконується в такій послідовності.

Крок 1. Для КОС, що проектується, вибирається СД, для якого експериментально визначається показник його ефективності “ймовірність фіксації РО в зоні контролю СД”. Для такого експерименту вибирається зона контролю з несприятливими (найгіршими) умовами роботи для СД (м'який ґрунт).

Крок 2. Для заданого значення ймовірності виконання завдання комплексу, за допомогою моделі реакції КОС з СД біля однієї зони контролю {1+0}, визначаються значення показників “ймовірність правильної класифікації РО” і “ймовірність приймання повідомлення” про появу РО в зоні контролю і його тип. Якщо отримані значення показників є прийнятними для розробника КОС, то задача визначення вимог вважається вирішеною. В протилежному випадку переходимо на крок 3.

Крок 3. Здійснюється повторне вирішення задачі за допомогою моделі

реакції КОС з схемою розміщення двох СД біля одної зони контролю {2+0}.

Якщо отримані значення показників знову є не прийнятними для розробника КОС, то переходимо на крок 4.

Крок 4. Здійснюється повторне вирішення задачі за допомогою моделі реакції КОС з двома зонами контролю з несприятливими умовами для роботи СД, біля яких встановлено по одному СД {1+1}. Процес визначення прийнятних для розробника значень показників “ймовірність правильної класифікації РО” і “ймовірність приймання повідомлення" може продовжуватися за допомогою моделей з схемами розміщення СД {1+2}, {2+1}, {2+2}.

Якщо і з двома зонами контролю, біля яких встановлено по два СД, отримані значення показників є неприйнятними для розробника КОС, необхідно повернутися на *Крок 1*. Тобто обрати інший СД і повторити розв'язання задачі до отримання прийнятних для розробника значень показників ефективності складових КОС.

Якщо кращого СД не існує, то є можливість визначити значення показника ефективності нового СД і сформувати завдання на його розроблення.

Алгоритм розв'язання задачі синтезу показників ефективності складових КОС представлено на рис. 4.12, де використані такі позначення: $P_{фСД}$ – ймовірність

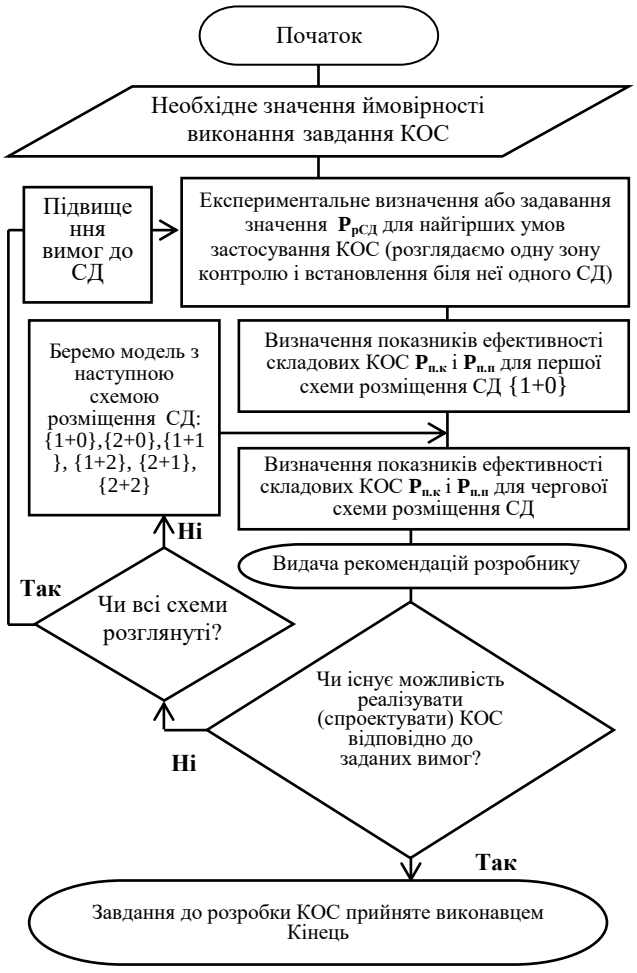

Рисунок 4.12 – Алгоритм розв'язання задачі синтезу показників ефективності складових КОС

фіксації РО, встановленим біля зони контролю СД; $P_{п.к}$ – ймовірність правильної класифікації РО; $P_{п.п}$ – ймовірність приймання повідомлення.

Використання методики синтезу показників ефективності складових КОС є можливим за наявності математичних моделей реакції комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об’єктом зон контролю, розроблених для різних варіантів схеми розміщення СД на контрольованому маршруті.

4.4.2. Математичні моделі реакції комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об’єктом зон контролю

Припущення та вимоги до технічних рішень, що закладені в математичних моделях реакції КОС на перетин рухомими об'єктами зон контролю:

- в якості датчиків для КОС обґрунтовано використання СД, оскільки пасивність принципу їх функціонування і можливість швидкого встановлення в ґрунті гарантує високий ступінь їх маскування;

- тривалості процедури класифікації типу РО та процедури формування і передавання радіосигналу до СПВІ про виявлений РО є малими (мікросекунди) в порівнянні з тривалостями переміщення РО через зони контролю; тому в моделях їх значення прийняті рівними нулю;

- про появу РО в зоні контролю формується одне повідомлення, яке передається один раз закодованим радіосигналом. Багатократне передавання радіосигналів напротязі перебування РО в зоні контролю вважаємо недоцільним у зв’язку з необхідністю забезпечення скритності роботи КОС;

- рухомі об'єкти, наближаючись до об'єкта що охороняється, послідовно перетинають дальню і ближню зони контролю;

- апаратні засоби КОС розгортаються на місцевості після попередньої перевірки їх працездатності і готовності до роботи; прийнято, що апаратні засоби на інтервалі часу їх застосування працюють безвідмовно;

- робота автономних систем ВКОПР разом з сейсмічними датчиками в

зонах контролю, є незалежною.

За методикою, представленою в розділі 2, здійснюємо розроблення структурно-автоматних моделей реакції КОС на перетин РО зон контролю з різними схемами розміщення СД. На основі кожної структурно-автоматної моделі за алгоритмом представленим в монографії [91, с. 79 - 81] здійснюється побудова моделі у вигляді графа станів. Отримані графи станів дають змогу формувати математичні моделі у вигляді систем диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена.

Розроблення структурно-автоматних моделей виконується в два етапи. На першому етапі треба здійснити розроблення опорного графа станів і переходів на основі базових подій. В подальшому цей граф станів використовується як тестова модель для валідації структурно-автоматної моделі. На другому етапі здійснюється розроблення структурно-автоматної моделі на основі, розробленого на першому етапі, опорного графа станів.

4.4.2.1. Розроблення опорного графа станів і переходів на основі базових подій, який представляє реакцію комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об’єктом зон контролю з схемою розміщення СД {1+1}.

1) Визначення базових подій. Аналіз реакції КОС на перетин РО зон контролю з схемою встановлення сейсмічних датчиків {1+1} дає для моделі такі базові події:

БП1 – "Фіксація РО в дальній зоні контролю ($СД_1$)";

БП2 – "Закінчення процедури класифікації РО по сигналу від $СД_1$";

БП3 – "Закінчення процедури передавання+приймання повідомлення в СПВІ від автономної системи $ВКОПР_1$"

БП4 – "Фіксація РО в ближній зоні контролю ($СД_2$)";

БП5 – "Закінчення процедури класифікації РО по сигналу від $СД_2$";

БП6 – "Закінчення процедури передавання+приймання повідомлення в СПВІ від автономної системи $ВКОПР_2$".

Приймаємо до уваги, що тривалості реакції сейсмічних датчиків $СД_1$ і

$СД_2$ на появу в зонах контролю РО, тривалість процедури класифікації РО і тривалість процедури передавання/приймання повідомлення мають значення до ста мікросекунд, а інтервали часу між подіями появи РО в зонах контролю до моменту фіксації РО сейсмічним датчиком мають значення не менше кількох хвилин. На підставі такого співвідношення між тривалостями, в модель закладаємо рівними нулю тривалості реакції сейсмічних датчиків $СД_1$ і $СД_2$, тривалість процедури класифікації РО і тривалість процедури передавання/приймання радіосигналу. Тому базові події БП2 і БП3 будуть зведеними з базовою подією БП1 (ЗБП2, ЗБП3), а базові події БП5 і БП6 будуть зведеними з базовою подією БП4 (ЗБП5, ЗБП6).

Після визначення базових подій, для розроблення графа станів необхідно сформувати вектор стану.

2) Формування вектора стану. Стан об'єкта дослідження в розробленій моделі відображає: місце перебування РО на маршруті, що контролюється (РО в дальній зоні контролю, РО в ближній зоні контролю, РО покинув ближню зону контролю); фіксацію РО сейсмічними датчиками в дальній і ближній зонах контролю; результат класифікації РО; стан СПВІ, коли вона приймає радіосигнал з дальньої і ближньої зон контролю. Тому у вектор стану входять сім компонент, а саме:

– компонента V_1 представляє місце перебування РО і може набувати таких значень: $V_1 = 1$ – РО перебуває в дальній зоні контролю; $V_1 = 2$ – РО перебуває в ближній зоні контролю; $V_1 = 3$ – РО покинув ближню зону контролю; початкове значення $V_1=1$;

– компонента V_2 представляє стани $СД_1$ в дальній зоні контролю і може набувати таких значень: $V_2 = 0$ – початкове значення ($СД_1$ готовий до роботи, РО відсутній в дальній зоні контролю); $V_2 = 1$ – $СД_1$ зреагував на появу РО; $V_2 = 2$ – $СД_1$ не зреагував на появу РО;

– компонента V_3 представляє стани класифікатора при появі РО в дальній зоні контролю. Значення компоненти: $V_3 = 0$ – початкове значення;

V_3 = 1 – тип РО визначено правильно; V_2 = 2 – тип РО визначено не правильно;

– компонента V_4 представляє стани СПВІ, коли РО перебуває в дальній зоні; V_4 = 0 – СПВІ знаходиться в режимі очікування (початкове значення); V_4 = 1 – в СПВІ прийнято радіосигнал з дальньої зони контролю; V_4 = 2 – в СПВІ не прийнято радіосигнал з дальньої зони контролю;

– компонента V_5 представляє стани $СД_2$ в ближній зоні контролю і може набувати таких значень: V_5 = 0 – початкове значення ($СД_2$ готовий до роботи, РО відсутній в ближній зоні контролю); V_5 = 1 – $СД_2$ зреагував на появу РО; V_5 = 2 – $СД_2$ не зреагував на появу РО;

– компонента V_6 представляє стани класифікатора при появі РО в ближній зоні контролю. Значення компоненти: V_6 = 0 – початкове значення; V_6 = 1 – тип РО визначено правильно; V_6 = 2 – тип РО визначено не правильно;

– компонента V_7 представляє стани СПВІ, коли РО перебуває в ближній зоні; V_7 = 0 – СПВІ знаходиться в режимі очікування (початкове значення); V_7 = 1 – в СПВІ прийнято радіосигнал з ближньої зони контролю; V_7 = 2 – в СПВІ не прийнято радіосигнал з ближньої зони контролю.

3) Показники ефективності складових КОС та інтенсивності базових подій:

P_{sd} – ймовірність того, що РО зафіксовано $СД_1$ в дальній зоні контролю;

P_{sb} – ймовірність того, що РО зафіксовано $СД_2$ в ближній зоні контролю;

P_{pk} – ймовірність того, що пристрій класифікації автономної систем $ВКОПР_1$ ($ВКОПР_2$) визначить тип РО правильно;

P_{pp} – ймовірність того, що СПВІ приймає повідомлення від автономної системи $ВКОПР_1$ ($ВКОПР_2$);

L_1 – середнє значення інтенсивності фіксації РО в дальній зоні контролю;

L_2 – середнє значення інтенсивності фіксації РО в ближній зоні контролю.

4) Розроблення опорного графа станів за методикою його побудови,

представленою в розділі 2. Вхідними даними є: базові події реакції КОС на перетин РО зон контролю з схемою встановлення сейсмічних датчиків {1+1}, компоненти вектора стану, показники ефективності складових КОС. Розроблений опорний граф станів представлений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Опорний граф станів: модель реакції комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об'єктом зон контролю з схемою розміщення СД {1+1}

№ кроку	Останній нерозглянутий стан, і актуальна(ні) для нього БП	Ймовірності альтернативного продовження процесу	Сформований вектор стану							№ стану	Перехід з стану в стан	Формули розрахунку інтенсивностей переходів із стану в стан
			V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Початковий стан	–	1	0	0	0	0	0	0	1	–	–
2	1 БП1 (ЗБП2) (ЗБП3)	$(1-P_{sd})$	2	2	0	0	0	0	0	2	1 → 2	$L_1\ (1-P_{sd})$
		$P_{sd}P_{pk}P_{pp}$	2	1	1	1	0	0	0	3	1 → 3	$L_1\ P_{sd}P_{pk}P_{pp}$
		$P_{sd}P_{pk}(1-P_{pp})$	2	1	1	2	0	0	0	4	1 → 4	$L_1\ P_{sd}P_{pk}(1-P_{pp})$
		$P_{sd}(1-P_{pk})P_{pp}$	2	1	2	1	0	0	0	5	1 → 5	$L_1\ P_{sd}(1-P_{pk})P_{pp}$
		$P_{sd}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$	2	1	2	2	0	0	0	6	1 → 6	$L_1\ P_{sd}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$
3	2 БП4 (ЗБП5) (ЗБП6)	$(1-P_{sb})$	3	2	0	0	2	0	0	7	2 → 7пс	$L_2\ (1-P_{sb})$
		$P_{sb}P_{pk}P_{pp}$	3	2	0	0	1	1	1	8	2 → 8пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}P_{pp}$
		$P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$	3	2	0	0	1	1	2	9	2 → 9пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$
		$P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$	3	2	0	0	1	2	1	10	2 → 10пс	$L_2\ P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$
		$P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$	3	2	0	0	1	2	2	11	2 → 11пс	$L_2\ P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$
4	3 БП4 (ЗБП5) (ЗБП6)	$(1-P_{sb})$	3	1	1	1	2	0	0	12	3 → 12пс	$L_2\ (1-P_{sb})$
		$P_{sb}P_{pk}P_{pp}$	3	1	1	1	1	1	1	13	3 → 13пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}P_{pp}$
		$P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$	3	1	1	1	1	1	2	14	3 → 14пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$
		$P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$	3	1	1	1	1	2	1	15	3 → 15пс	$L_2\ P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$
		$P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$	3	1	1	1	1	2	2	16	3 → 16пс	$L_2\ P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$
5	4 БП4 (ЗБП5) (ЗБП6)	$(1-P_{sb})$	3	1	1	2	2	0	0	17	4 → 17пс	$L_2\ (1-P_{sb})$
		$P_{sb}P_{pk}P_{pp}$	3	1	1	2	1	1	1	18	4 → 18пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}P_{pp}$
		$P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$	3	1	1	2	1	1	2	19	4 → 19пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$
		$P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$	3	1	1	2	1	2	1	20	4 → 20пс	$L_2\ P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$
		$P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$	3	1	1	2	1	2	2	21	4 → 21пс	$L_2\ P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$
6	5 БП4 (ЗБП5) (ЗБП6)	$(1-P_7)$	3	1	2	1	2	0	0	22	5 → 22пс	$L_2\ (1-P_{sb})$
		$P_{sb}P_{pk}P_{pp}$	3	1	2	1	1	1	1	23	5 → 23пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}P_{pp}$
		$P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$	3	1	2	1	1	1	2	24	5 → 24пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$
		$P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$	3	1	2	1	1	2	1	25	5 → 25пс	$L_2\ P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$
		$P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$	3	1	2	1	1	2	2	26	5 → 26пс	$L_2\ P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$
7	6 БП4 (ЗБП5) (ЗБП6)	$(1-P_{sb})$	3	1	2	2	2	0	0	27	6 → 27пс	$L_2\ (1-P_{sb})$
		$P_{sb}P_{pk}P_{pp}$	3	1	2	2	1	1	1	28	6 → 28пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}P_{pp}$
		$P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$	3	1	2	2	1	1	2	29	6 → 29пс	$L_2\ P_{sb}P_{pk}(1-P_{pp})$
		$P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$	3	1	2	2	1	2	1	30	6 → 30пс	$L_2\ P_{sb}(1-P_{pk})P_{pp}$
		$P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$	3	1	2	2	1	2	2	31	6 → 31пс	$L_2P_{sb}(1-P_{pk})(1-P_{pp})$

Примітка: пс – поглинаючий стан.

4.4.2.2 Розроблення структурно-автоматної моделі на основі опорного

графа станів, за методикою представленою в розділі 2. Вхідними даними є: базові події і опорний граф станів.

Зауважимо, що кількість варіантів наступного стану, після того як відбулася базова подія залежить від кількості альтернативних продовжень випадкового процесу. В даному випадку, після того як відбулася базова подія БП1 існує 5 альтернативних продовжень випадкового процесу. Альтернативні продовження обумовлені зведеними базовими подіями ЗБП2 і ЗБП3. Після того, як відбулася базова подія БП4, існує також 5 альтернативних продовжень випадкового процесу. Альтернативні продовження обумовлені зведеними базовими подіями ЗБП5 і ЗБП6.

Визначені компоненти структурно-автоматної моделі заносимо в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 − Структурно-автоматна модель реакції комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об’єктом зон контролю з схемою розміщення СД {1 + 1}

БП	**Опис ситуації**	**ФРІПвНС**	**ПМКВС**
1	2	3	4
БП1 (ЗБП2) (ЗБП3)	V_1=1	L1*(1 - Psd)	V1:= 2; V2:= 2
		L1*Psd*Ppk*Ppp	V1:= 2; V2:= 1; V3:= 1; V4:= 1
		L1*Psd*Ppk*(1 - Ppp)	V1:= 2; V2:= 1; V3:= 1; V4:= 2
		L1*Psd*(1 - Ppk)*Ppp	V1:= 2; V2:= 1; V3:= 2; V4:= 1
		L1*Psd*(1 - Ppk)*(1 - Ppp)	V1:= 2; V2:= 1; V3:= 2; V4:= 2
БП4 (ЗБП5) (ЗБП6)	V_1=2	L2*(1-Psb)	V1:= 3; V5:= 2
		L2*Psb*Ppk*Ppp	V1:= 3; V5:= 1; V6:= 1; V7:= 1
		L2*Psb*Ppk*(1 - Ppp)	V1:= 3; V5:= 1; V6:= 1; V7:= 2
		L2*Psb*(1 - Ppk)*Ppp	V1:= 3; V5:= 1; V6:= 2; V7:= 1
		L2*Psb*(1 - Ppk)*(1 - Ppp)	V1:= 3; V5:= 1; V6:= 2; V7:= 2

Аналогічно здійснено розроблення структурно-автоматних моделей реакції комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об’єктом зон

контролю з схемами розміщення СД {1+2}, {2+1}, {2+2}, {1+0}, {2+0} на маршруті ймовірного пересування РО. Розмірності графів станів і переходів представлено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 − Розмірності моделей реакції КОС на перетин РО зон контролю (моделі у вигляді графа станів і переходів)

Схеми розміщення СД	**Розмірність моделі**	**Схеми розміщення СД**	**Розмірність моделі**
КОС зі схемою {1 + 0}	6 станів і 5 переходів	КОС зі схемою {2 + 1}	151 стан і 150 переходів
КОС зі схемою {2 + 0}	26 станів і 25 переходів	КОС зі схемою {1 + 2}	131 стан і 130 переходів
КОС зі схемою {1 + 1}	31 стан і 30 переходів	КОС зі схемою {2 + 2}	651 стан і 650 переходів

На основі розроблених структурно-автоматних моделей реакції комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об’єктом зон контролю за допомогою алгоритму, представленого в розділі 2, формується модель у вигляді графа станів і переходів. Якщо за цим графом скласти модель у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена, то це означає, що сейсмічний датчик може фіксувати РО в довільній точці його перебування в зоні контролю. Відповідно інтервали часу перебування рухомого об’єкта в зоні контролю до моменту, коли він був зафіксований сейсмічним датчиком будуть представлені в моделі експоненційним законом розподілу. Це означає, що найбільша частота фіксації РО буде на початку зони контролю. В той час, коли в дійсності, найбільша частота фіксації РО буде припадати на середину зони контролю, ближче до СД. Це обумовлено тим, що місце встановлення СД ділить зону контролю навпіл. На рисунку 4.13 показана гістограма розподілу ймовірностей для інтервалів часу перебування РО в зоні контролю до моменту, коли він був зафіксований сейсмічним датчиком. На основі наведених міркувань (наведеного обґрунтування) прийнято , що реальний розподіл ймовірностей доцільно апроксимувати законом Ерланга.

Слід прийняти до уваги, що використання закону розподілу Ерланга дає можливість розрізняти властивості ґрунтів, на яких розміщуються СД. А

саме вибір порядку закону розподілу Ерланга дозволяє розрізняти тип ґрунту: м’який, середній та твердий (мерзлий). На основі якісного аналізу для проведення досліджень за допомогою моделі реакції комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об’єктом зон контролю пропонується використовувати такі значення порядку закону розподілу Ерланга: для твердих ґрунтів Ке = 2 - 3; для середніх ґрунтів Ке = 4 - 11; для м’яких ґрунтів Ке = 12 - 60. Для конкретного типу сейсмічного датчика значення порядку закону розподілу Ерланга для різних типів ґрунтів слід уточнювати експериментально.

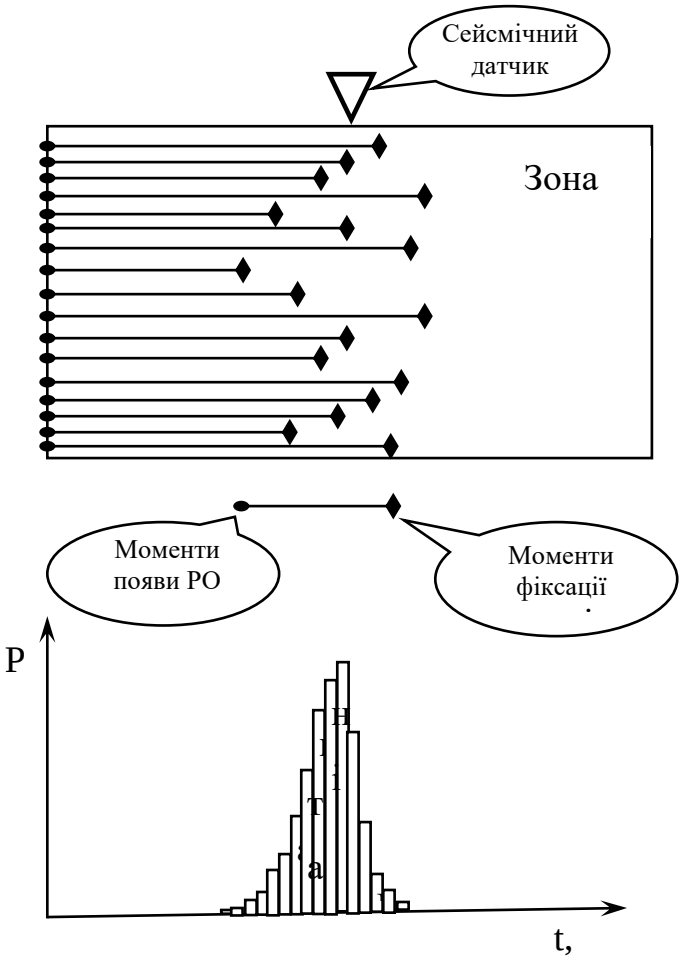

Рисунок 4.13 – Гістограма розподілу ймовірностей для інтервалів часу перебування РО в зоні контролю від моменту появи і до моменту, коли він був зафіксований СД

Отже для підвищення ступеня адекватності моделей, яке забезпечить використання закону розподілу Ерланга, необхідно застосувати методику модифікації структурно-автоматних моделей представлену в розділі 3.

Модифікована структурно-автоматна модель реакції КОС на перетин рухомим об’єктом зон контролю зі схемою розміщення сейсмічних датчиків {1+1} підчас виконання розвідувальної функції з використанням закону розподілу Ерланга представлена в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Модифікована структурно-автоматна модель реакції КОС на перетин рухомим об’єктом зон контролю зі схемою розміщення сейсмічних датчиків {1+1}

Умова та обставини	**ФРІП**	**ПМКВС**
БП1 (ЗБП2) (ЗБП3) Фіксація РО в дальній зоні контролю ($СД_1$)		
(Ke1>1) AND (V1=1) AND (V8=0)	Ke1∗L1∗(1-Psd)	V1:=2; V2:=1; V8:=1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND ((V8>0) AND (V8<(Ke1-1)))	Ke1∗L1∗(1-Psd)	V8:=V8+1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=1) AND (V8=(Ke1-1))	Ke1∗L1∗(1-Psd)	V1:=2; V2:=1; V8:=0
(Ke1>1) AND (V1=1) AND (V8=0)	Ke1∗L1∗Psd∗(1-Ppk)∗Ppp	V1:=2; V2:=2; V4:=1; V8:=1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=2) AND (V4=1) AND ((V8>0) AND (V8<(Ke1-1)))	Ke1∗L1∗Psd∗(1-Ppk)∗Ppp	V8:=V8+1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=2) AND (V4=1) AND (V8=(Ke1-1))	Ke1∗L1∗Psd∗(1-Ppk)∗Ppp	V1:=2; V2:=2; V4:=1; V8:=0
(Ke1>1) AND (V1=1) AND (V8=0)	Ke1∗L1∗Psd∗(1-Ppk)∗(1-Ppp)	V1:=2; V2:=2; V4:=2; V8:=1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=2) AND (V4=2) AND ((V8>0) AND (V8<(Ke1-1)))	Ke1∗L1∗Psd∗(1-Ppk)∗(1-Ppp)	V8:=V8+1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=2) AND (V4=2) AND (V8=(Ke1-1))	Ke1∗L1∗Psd∗(1-Ppk)∗(1-Ppp)	V1:=2; V2:=2; V4:=2; V8:=0
(Ke1>1) AND (V1=1) AND (V8=0)	Ke1∗L1∗Psd∗Ppk∗Ppp	V1:=2; V2:=3; V4:=1; V8:=1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=3) AND (V4=1) AND ((V8>0) AND (V8<(Ke1-1)))	Ke1∗L1∗Psd∗Ppk∗Ppp	V8:=V8+1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=3) AND (V4=1) AND (V8=(Ke1-1))	Ke1∗L1∗Psd∗Ppk∗Ppp	V1:=2; V2:=3; V4:=1; V6:=1; V8:=0
(Ke1>1) AND (V1=1) AND (V8=0)	Ke1∗L1∗Psd∗Ppk∗(1-Ppp)	V1:=2; V2:=3; V4:=2; V8:=1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=3) AND (V4=2) AND ((V8>0) AND (V8<(Ke1-1)))	Ke1∗L1∗Psd∗Ppk∗(1-Ppp)	V8:=V8+1
(Ke1>1) AND (V1=2) AND (V2=3) AND (V4=2) AND (V8=(Ke1-1))	Ke1∗L1∗Psd∗Ppk∗(1-Ppp)	V1:=2; V2:=3; V4:=2; V8:=0
БП4 (ЗБП5) (ЗБП6) Фіксація РО в ближній зоні контролю ($СД_2$)		
(Ke2>1) AND (V1=2) AND (V8=0) AND (V9=0)	Ke2∗L2∗(1-Psb)	V1:=3; V3:=1; V9:=1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=1) AND (V8=0) AND ((V9>0) AND (V9<(Ke2-1)))	Ke2∗L2∗(1-Psb)	V9:=V9+1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=1) AND (V8=0) AND (V9=(Ke2-1))	Ke2∗L2∗(1-Psb)	V1:=3; V3:=1; V9:=0
(Ke2>1) AND (V1=2) AND (V8=0) AND (V9=0)	Ke2∗L2∗Psb∗(1-Ppk)∗Ppp	V1:=3; V3:=2; V5:=1; V9:=1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=2) AND (V5=1) AND (V8=0) AND ((V9>0) AND (V9<(Ke2-1)))	Ke2∗L2∗Psb∗(1-Ppk)∗Ppp	V9:=V9+1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=2) AND (V5=1) AND (V8=0) AND (V9=(Ke2-1))	Ke2∗L2∗Psb∗(1-Ppk)∗Ppp	V1:=3; V3:=2; V5:=1; V9:=0
(Ke2>1) AND (V1=2) AND (V8=0) AND	Ke2∗L2∗Psb∗(1-Ppk)∗(1-Ppp)	V1:=3; V3:=2;

Умова та обставини	ФРІП	ПМКВС
(V9=0)		V5:=2; V9:=1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=2) AND (V5=2) AND (V8=0) AND ((V9>0) AND (V9<(Ke2-1)))	Ke2∗L2∗Psb∗(1-Ppk)∗(1-Ppp)	V9:=V9+1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=2) AND (V5=2) AND (V8=0) AND (V9=(Ke2-1))	Ke2∗L2∗Psb∗(1-Ppk)∗(1-Ppp)	V1:=3; V3:=2; V5:=2; V9:=0
(Ke2>1) AND (V1=2) AND (V8=0) AND (V9=0)	Ke2∗L2∗Psb∗Ppk∗Ppp	V1:=3; V3:=3; V5:=1; V9:=1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=3) AND (V5=1) AND (V8=0) AND ((V9>0) AND (V9<(Ke2-1)))	Ke2∗L2∗Psb∗Ppk∗Ppp	V9:=V9+1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=3) AND (V5=1) AND (V8=0) AND (V9=(Ke2-1))	Ke2∗L2∗Psb∗Ppk∗Ppp	V1:=3; V3:=3; V5:=1; V7:=1; V9:=0
(Ke2>1) AND (V1=2) AND (V8=0) AND (V9=0)	Ke2∗L2∗Psb∗Ppk∗(1-Ppp)	V1:=3; V3:=3; V5:=2; V9:=1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=3) AND (V5=2) AND (V8=0) AND ((V9>0) AND (V9<(Ke2-1)))	Ke2∗L2∗Psb∗Ppk∗(1-Ppp)	V9:=V9+1
(Ke2>1) AND (V1=3) AND (V3=3) AND (V5=2) AND (V8=0) AND (V9=(Ke2-1))	Ke2∗L2∗Psb∗Ppk∗(1-Ppp)	V1:=3; V3:=3; V5:=2; V9:=0

Запропонована методика синтезу і розроблені математичні моделі реакції комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об’єктом зон контролю дозволяють обґрунтовувати значення основних показників ефективності складових комплексу охоронної сигналізації на етапі системотехнічного проектування. Проектант може вибирати прийнятні для розроблення значення показників ефективності складових КОС, виходячи з заданого замовником значення показника ефективності КОС – ймовірності виконання завдання.

Запропоновані в дисертаційній роботі методи, методики і програмний засіб також були використані підчас розроблення структурно-автоматних моделей об’єктів дослідження для таких методик:

– методика надійнісного синтезу бортової навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарату [42; 144];

– методика оцінки ризику експлуатації критичних програмно-технічних комплексів [40; 62].

Автоматизоване розроблення структурно-автоматних моделей та високий ступінь адекватності дискретно-неперервних стохастичних моделей

відмовостійких програмно-технічних комплексів, зробило можливим підняти коректність і достовірність результатів розв’язання задач синтезу структури, алгоритмів функціональної і надійнісної поведінки та показників ефективності і надійності їх складових. Високий ступінь адекватності моделей забезпечується за рахунок представлення тривалостей процедур і інтервалів часу між сусідніми подіями в потоках подій законом розподілу Ерланга замість експоненційного закону розподілу. А також врахування ймовірностей альтернативного продовження процесів.

4.5. Висновки до розділу 4

1. Розроблено програмний засіб, призначений для розроблення опорного графа станів та валідації структурно-автоматних моделей. Програмний засіб розроблявся як компонент програмного комплексу ASNA-2. Розроблений програмний засіб може бути використаним при проектуванні складних технічних систем з високими вимогами до адекватності розроблюваних моделей.

2. Розроблений програмний засіб надає: зручні засоби побудови опорного графа станів і переходів за даним набором базових подій та компонент вектора стану; засоби побудови структурно-автоматної моделі на основі опорного графа, редагування структурно-автоматної моделі, формування графів станів та переходів, використання розподілу Ерланга для опису тривалостей перебігу процесів у системі, що моделюється.

3. Для реалізації програмного засобу, було обрано платформу Electron, мову програмування TypeScript, бібліотеки React та Office Ui Fabric.

4. Для наочності розміру побудованих графів станів та переходів, було реалізовано можливість візуалізації графів. Для візуалізації графів було використано бібліотеки D3 та D3-Dagre.

5. Використання розроблених методів, методик та програмного засобу для розроблення структурно-автоматних моделей поведінки комплексів відповідального призначення підтвердили їх ефективність.

Результати розділу 4 представлені в публікаціях: [39; 40; 42; 62; 92; 93; 144; 173]

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі представлено розв’язання актуального наукового завдання розроблення математичного забезпечення, в основу якого покладено структурно-автоматну модель, і відповідного програмного засобу для автоматизації процесу розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів та переходів.

Основні наукові та прикладні результати полягають в наступному:

1. Удосконалено технологію розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей в частині розроблення графа станів та переходів, а саме запропоновано метод визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів та переходів, в якому інтелектуальне розв’язання задачі замінено формалізованим. Це стало можливим за рахунок перенесення інтелектуальної складової в значно меншому об’ємі на розроблення опорного графа станів.

2. Так як ступінь адекватності дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів за рахунок врахування ймовірностей альтернативних продовжень процесів забезпечує опорний граф станів та переходів, запропоновано формалізований метод його побудови на основі базових подій. Цей метод покладено в основу методики, на основі якої розроблено алгоритм програми і програмний модуль для комп’ютерної підтримки процесу побудови опорного графа станів.

3. Для виявлення можливих помилок в структурно-автоматних моделях та їх усунення запропоновано метод їх валідації, який прискорює локалізацію помилок і відповідно зменшує затрати часу на їх пошук і виправлення. Розроблено алгоритм, в якому реалізовано запропонований метод валідації структурно-автоматних моделей.

4. Для розроблення надійнісних і функціональних дискретно-неперервних стохастичних моделей немарковського типу забезпечено

можливість автоматизувати процес трансформації графа станів та переходів завдяки запропонованому методу модифікації структурно-автоматних моделей для використання методу фаз Ерланга.

5. Підвищення ступеня адекватності дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів за рахунок врахування реальних законів розподілу для тривалостей процедур та інтервалів часу між сусідніми подіями в потоках подій і альтернативних продовжень випадкових процесів після закінчення процедур контролю, діагностики, перемикання і відновлення зробило можливим підняти достовірність показників надійності та ефективності, а відповідно і коректність розв’язання задач синтезу алгоритмів надійнісної і функціональної поведінки програмно-технічних комплексів через багатоваріантний аналіз.

6. Розроблено прототип програмного засобу для комп’ютерної підтримки технології розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів та переходів, який включає в себе програмні модулі «Побудова опорного графа станів на основі базових подій», «Визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів», «Валідація структурно-автоматних моделей».

7. Автоматизоване розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів скорочує витрати часу на виконання проектних завдань та зменшує ймовірність внесення помилок, що дуже важливо, коли таке завдання виконується на етапі системотехнічного проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Almudena, K. A Markov-Based Channel Model Algorithm for Wireless Networks / K. Almudena, Y. Zhao Ben, D. J. Anthony, L. Reiner // Computer Science Division, UC Berkeley, Berkeley, CA, USA; Ericsson Research, Herzogenrath, Germany. – Wireless Networks, №9, P. 189 – 199, 2003. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.cs.berkeley.edu/~almudena/publications/winet03.pdf)
2. Apache Subversion source version control system [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://subversion.apache.org/
3. Barron, Y. Analysis of R-out-of-N repairable systems: the case of phase-type distributions / Y. Barron, E. Frostig, B. Levikson // Adv. in Appl. Probab. – 2004, vol. 36, № 1. – P. 116 – 138.
4. Bogliolo, A. // FELLOW, IEEE Specification and Analysis of Power-Managed / A. Bogliolo, L. Benini, E. Lattanzi, G. de Micheli [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.sti.uniurb.it/bogliolo/e-publ/IEEEproc04.pdf)
5. Butler, R.W. The SURE approach to reliability analysis // IEEE Transactions on Reliability. Vol. 41, № 2. – 1992. – P. 210 – 218.
6. C# Coding Conventions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://msdn.microsoft.com/en-us/library/vstudio/ff926074.aspx
7. Cao, Y. System Availability with Non-Exponentially Distributed Outages / Y. Cao, H. Sun, K. Trivedi, J. Han // IEEE Transactions on Reliability. Vol. 51, № 2. – 2002. – P. 193 – 198.
8. Carrasco, J. A. Bounding Steady-state Availability Models with Phase Type Repair Distributions // Proc. International Computer Performance and Dependability Symposium (IPDS'98). – Durham, North Carolina. – P. 259 – 269.
9. Chibesakunda, M.K. A Methodology for Analyzing Power Consumption in Wireless Communication Systems / M. K. Chibesakunda, P. S. Kritzinger // DNA Research Group, University of Cape Town, South Africa, January 3,

2004 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://people.cs.uct.ac.za/~mchibesa/ieepaper.pdf)

10. Chong, C. C. Evaluation of the Time-Evolutionary Directional Indoor Channel Model / C. C. Chong, D. I. Laurenson, S. McLaughlin: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/document/1353604/
11. Cuevas-Ruíz, J. L. Channel Modeling and Simulation in HAPS Systems / J. L. Cuevas-Ruíz, J. A. Delgado-Penín // Signal Theory and Communications Department (TSC): [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.590.8848&rep=rep1&type=pdf
12. Cuevas-Ruíz J.L.. Channel model based on semi-Markovian processes. An approach for HAPS system / J.L. Cuevas-Ruíz; J.A. Delgado-Penín/ CONIELECOMP'04, 16-18 February , 2004, Veracruz, Mexico – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.tsc.upc.es/haps/docs/abstract_channel_model.pdf
13. Dharmaraja, S. Performance Analysis of Cellular Networks with Generally Distributed Hand of Interarrival Times / S. Dharmaraja, K. S. Trivedi, D. Logothetis // (CACC, Dept. of ECE, Duke University Durham, NC 27708, USA), Atmel Corporation, Athens, (GREECE): [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.ee.duke.edu/~kst/wireless/finalspects.pdf)
14. Farrell, J. A. Real-Time Differential Carrier Phase GPS-Aided / J. A. Farrell, T. D. Givargis, M. J. Barth // Ins IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 8, № 4, july 2000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.ics.uci.edu/~givargis/docs/J2.pdf)
15. Fedasyuk, D. Method of developing the behavior models in form of states diagram for complex information systems [Text] / D. Fedasyuk, S. Volochiy // Computer science and information technologies: Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference CSIT 2015. – Lviv, 2015. – P. 5 - 8.

16. Fedasyuk, D. Method of Developing the Structural-Automaton Models of Fault-Tolerant Systems [Text] / Dmytro Fedasyk, Serhiy Volochiy // Proceedings 14th International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)”, 21 – 25 February 2017, Polyana, Ukraine. – P. 22 – 26.
17. Hassett, T. Time-Varying Failure Rate in the Availability & Reliability Analysis of Repairable Systems / T. Hassett, D. Dietrich, F. Szidarovszky // IEEE Transactions on Reliability. Vol. 44, № 1. – 1995. – P. 155 – 160.
18. Ho, J. Throughput and Buffer Analysis for GSM General Packet Radio Service (GPRS) / J. Ho, Y. Zhu, S. Madhavapeddy (http://engr.smu.edu/EETS/8315/wcnc99_traffic_models.pdf)
19. Hokstad, P. The modeling of degraded and critical failures for components with dormant failures | P. Hokstad, A. T. Frovig // Reliability Engineering & System Safety J. – 1996, vol. 51, № 2. – P. 189 – 199.
20. 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.
21. Hueda, M.R. On the Markovian Approximation for Block-Errors in DS-CDMA Transmissions over Slow Fading Channels with Multicarrier Transmit Diversity. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://lcd.efn.unc.edu.ar/frames/publicaciones/archivos/lcd_0007.pdf)
22. Janssen, J. Discrete Time Homogeneous and non-Homogeneous semi-Markov Reliability Models / J. Janssen, A. Blasi, R. Manca // Proc. International conference on mathematical methods in reliability. Methodology and practice, 2002. – Trondheim, Norway. – 2002.
23. Janssen, J. Numerical Solution of non-Homogeneous semi-Markov Processes in Transient Case / J. Janssen, R. Manca // Methodology and Computing in Applied Probability. Vol. 3, № 3. – 2001. – P. 271 – 294.

24. Jordán, J., Barceló F. Statistical Modelling of Channel Occupancy in Trunked PAMR Systems Teletraffic Contributions for the Information Age (ITC15), V. Ramaswami and P. E. Wirth (Editors), Elsevier Science B.V., June 1997. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.entel.upc.es/barcelo/Publicaciones/1997-ITC.pdf)
25. Kay, J. Quality of Service Analysis and Control for Wireless Sensor Networks / J. Kay, J. Frolik 0-7803-8815-1/04/$20.00 '2004 IEEE [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.ececs.uc.edu/~cdmc/mass/mass2004/35061.pdf)
26. Klemm, A. Traffic Modeling and Characterization for UMTS Networks / A. Klemm, C. Lindemann, M. Lohmann [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.cs.ucy.ac.cy/courses/EPL653/papers/Traffic%20modeling%20and%20characterization%20for%20UMTS.pdf)
27. Kochs, Hans–Dieter: Zuverlässigkeit Elektrotechnischer Anlagen: Einführung in die Methodik, die Verfaren und ihre Anwendung / H.–D. Kochs. – Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer-Verlag, 1984. – 394 s.
28. Leemis, L. Nonparametric Estimation of the Intensity Function for a Nonhomogeneous Poisson Process // Management Science. – 1991, vol. 37, № 7. – P. 886 – 900.
29. Leemis, L. Variate Generation for Nonhomogeneous Poisson Processes with Time Dependent Covariates / L. Leemis, L. Shih // J. of Statistical Computation and Simulation. – 1993, vol. 44. – P. 165 – 186.
30. Leemis, L. Nonparametric Estimation of the Cumulative Intensity Function for a Nonhomogeneous Poisson Process from Overlapping Realizations / L. Leemis, B. L. Arkin // Management Science. – 2000, vol. 46, № 7. – P. 989 – 998.
31. Liang, Yin. Application of semi-Markov process and CTMC to evaluation of UPS system availability / Yin Liang, R. M. Fricks, K. S. Trivedi // Proc.

Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002. – St. Louis, USA. – 2002. – P. 584 – 591.

32. Limnios N. Semi-Markov Processes and Reliability / N. Limnios, G. Oprisan. – Boston: Birkhauser, 2001. – 222 p.
33. Lefebvre, Ya. Using the phase method to model degradation and maintenance efficiency // International J. of Reliability, Quality and Safety Engineering. – 2003, vol. 10, № 4. – P. 383 – 405.
34. Mandzij, B. Kompleksowe modelowanie systemu informatycznego z rezerwowaniem funkcjonalnym / B. Mandzij, B. Woloczij, L. Ozirkowskyj, D. Ulybin // Prace II Krajowego Sympozjumu „Modelowanie i symulacja komputerowa w technice" MiS'2003, Lodz: 2003. – S. 133 – 136.
35. Morley, G. D. Strategies to Maximize Carried Traffic in Dual-Mode Cellular Systems / G. D. Morley, W. D. Grover // IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 49, № 2, march 2000. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.ee.ualberta.ca/~grover/pdf/Morley_grover_JVT_2000.pdf)
36. Neuts, M. Repairable models with operating and repair times governed by phase type distributions / M. Neuts, R. Perez-Ocon, I. Torres-Castro // Advances in Applied Probability. – 2000, vol. 32, № 2. – P. 468 – 479.
37. Newton J. Comment on: Time-Varying Failure Rate in the Availability & Reliability Analysis of Repairable Systems // IEEE Transactions on Reliability. Vol. 45, № 1. – 1996. – P. 27.
38. Nypan, T. A cellular positioning system based on database comparison – The hidden Markov model based estimator versus the Kalman filter / T. Nypan, O. Hallingstad / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.norsig.no/norsig2002/Proceedings/papers/cr1070.pdf)
39. Onishchenko, V.A. Structural-automaton Models of the RSC Reaction on the MO Crossing TWO Control Zones with Layouts of Seismic Sensors {2+1} and {1+2} [Text] / V.A. Onishchenko, S.B. Volochiy // Перспективи розвитку

озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 11 – 12 травня 2017 року). – Львів: НАСВ, 2017. – С. 119 – 120.

40. Ozirkovskyy, L. The Automation of the Exploitation Risks Assessment of the Navigation Information System of Air Drones [Text] / L. Ozirkovskyy, Yu. Pashchuk, A. Mashchak, S. Volochiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XIII International Conference TCSET'2016, Februaru 23 – 26. – Lviv, 2016. – P. 140 – 144.
41. 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, Slovakia. – 2016. – Vol. 2. – Issue 2. – pp. 1 – 10.
42. Pashchuk, Yu. Reliability Synthesis for UAV Flight Control System / Yuriy Pashchuk, Yuriy Salnyk, Serhiy Volochiy // Proceedings of the 13th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, Kyiv, Ukraine, May 15-18, 2017, p. 569 – 582.
43. Perez-Ocon R. A multiple system governed by a quasi-birth-and-death process / R. Perez-Ocon, D. Montoro-Cazorla // Reliability Engineering & System Safety J. – 2004, vol. 84, № 2. – P. 187 – 196. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832003002308
44. Perez-Ocon R. Transient Analysis of a Repairable System, Using Phase-Type Distributions and Geometric Processes / R. Perez-Ocon, D. Montoro-Cazorla // IEEE Transactions on Reliability. – 2004, vol. 53, № 2. – P. 185 – 192.
45. Pérez-Romero J. Analysis of a Type II Hybrid ARQ Strategy in a DS-CDMA Packet Transmission Environment / J. Pérez-Romero, R. Agustí, O. Sallent // IEEE Transactions on Communications, Vol. 51, № 8, august 2003.

[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://scholar.google.com/citations?user=hJYxus0AAAAJ&hl=es

46. Perman, M. Semi-Markov Models with an Application to Power-Plant Reliability Analysis / M. Perman, A. Senegacnik, M. Tuma // IEEE Transactions on Reliability. Vol. 46, № 4. – 1997. – P. 526 – 532. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=15181
47. Pievatolo A. Semi-Markov Processes for Power System Reliability Assessment With Application to Uninterruptible Power Supply // A. Pievatolo, E. Tironi / IEEE Transactions on Power Systems, 19(3), 2004, P.1326 – 1333. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/3267115
48. Platis, A. N. Asymptotik availability of system modeled by cyclic non-homogeneous Markov chains [1-substation reliability] / A. N. Platis, N. E. Limnios, Du M. Le // Proc. Annual Realiability and Maintainability Symposium, 1997. – St. Louis, USA. – 1997. – P. 293 – 297.
49. Platis, A. N. Performability of Electric-Power Systems Modeled by Non-Homogeneous Markov Chains / A. N. Platis, N. E. Limnios, Du M. Le // IEEE Transactions on Reliability. Vol. 45, № 4. – 1996. – P. 605 – 610.
50. Podolyak, U. Automation of Modeling Discrete-Continious Stochastic Systems on Basis of Representation in Class of General Petri Nets // Пр. міжнар. наук.-техн. конф. TCSET'2000 "Сучасні проблеми засобів телекомунікації, комп'ютерної інженерії та підготовки кадрів". – Львів: Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка", 2000. – С. 26.
51. Rapid application development [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://en.wikipedia.org/wiki/Rapid_application_development
52. Redmine project management web application [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.redmine.org/
53. Schwendener, R. Indoor Radio Channel Model for Protocol Evaluation of

Wireless Personal Area Networks. (http://www.nari.ee.ethz.ch/wireless/pubs/files/pimrc02.pdf)

54. Smotherman, M. A non-homogeneous Markov model for phased-mission reliability analysis / M. Smotherman, K. Zemoudeh // IEEE Transactions on Reliability. Vol. 38, № 5. – 1989. – P. 585 – 590.
55. Sun, H. The failure of MTTF in availability evaluation / H. Sun, J.J. Han // Proc. Annual Realiability and Maintainability Symposium, 2002. – St. Louis, USA. – 2002. – P. 279 – 284.
56. Thümmler, A. Stochastic Modeling and Analysis of 3G Mobile Communication Systems // Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften der Universität Dortmund am Fachbereich Informatik. – Dortmund: 2003. – 141 p. (http://eldorado.uni-dortmund.de:8080/FB4/ls4/forschung/2003/Thuemmler/Thuemmlerunt.pdf0
57. Top-Down Design [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.pcmagazine.ru/encyclopedia/term.php?ID=4473.
58. Trivedi, K. S. Performability modelling of wireless communication systems / K. S. Trivedi, Ma Xiaomin, S. Dharmaraja // International Journal of Communication Systems, Int. J. Commun. Syst. 2003, №16. – P. 561–577 (DOI: 10.1002/dac.605), [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.ee.duke.edu/~kst/wireless/CommSys.pdf)
59. Turin, W. Hidden Markov Modeling of Flat Fading Channel / W. Turin, R. van Nobelen // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16, №9, december 1998 / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://tango.isti.cnr.it/docs/wichita/TurinMarkovModeling.pdf)
60. Tutschku, K. Demand-based Radio Network Planning of Cellular Mobile Communication systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.info3.informatik.uni-wuerzburg.de/TR/tr177.pdf)
61. Volochiy, S. Formalized Development of the State Transition Graphs Using the Erlang Phase Method / Serhiy Volochiy, Dmytro Fedasyuk, Ratibor Chopey //

Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: Proceedings of the 9th IEEE International Conference, 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania. – P. 1098 – 1101.

62. Volochiy, B. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method [Electronic sourse] / 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. Режим доступу: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7432990.
63. Volochiy B. Synthesis of Guard Signaling Complex Structure with a Glance of Possible Layouts of Seismic Sensors [Text] / Bohdan Volochiy, Volodymyr Onishchenko, Yuriy Salnik // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XIII International Conference TCSET'2016, Februaru 23 – 26. – Lviv, 2016. – P. 279 – 283.
64. Vornefeld, U. Analytical Concepts for Packet Switching Mobile Radio Network Dimensioning [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.comnets.rwth-aachen.de/.../pi1/passdownload.php?downloaddata=129%7C/project/cn/archive/picarddownload/)
65. Wübbena, G. State Space Approach for Precise Real Time Positioning in GPS Reference Networks / G. Wübbena, S. Willgalis [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://www.geopp.de/download/kis2001.pdf)
66. Zeng, Q. Handoff in Wireless Mobile Networks / Q. Zeng, D. P. Agrawal [Електронний ресурс]. – Режим доступу: (http://media.wiley.com/product_data/excerpt/28/04714190/0471419028.pdf)
67. Zhang, T. Availability and reliability of system with dependent components and time-varyig failure and repair rates / T. Zhang, M. Horigome // IEEE

Transactions on Reliability. Vol. 50, № 2. – 2001. – P. 151 – 158. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/document/963122/

68. Zaidi, Z.R. Mobility Modeling and Management in Wireless Networks / Spring 2004, George Mason University, Fairfax, Virginia. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://pdfs.semanticscholar.org/4ea1/8557a1768b2bf016dd6005158f4e299be8b0.pdf
69. Zhang, T. Availability and reliability of k-out-of-(M+N):G warm standby systems. // T. Zhang, M. Xie, M. Horigome / Reliability Engineering and System Safety, 91 (4), 2006. – P. 381-387. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2005.02.003
70. Windchill Quality Solutions (Relex) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.crimsonquality.com/
71. Windchill Markov (formerly Relex Markov) / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.crimsonquality.com/products/markov/
72. Möbius: Model-Based Environment for Validation of System Reliability, Availability, Security and Performance / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.mobius.uiuc.edu/
73. Reliasoft: RBDs, fault trees and Markov diagrams / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.reliasoft.com/products/reliability-analysis/blocksim
74. RAM Commander: Reliability and Safety Software / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://aldservice.com/images/stories/aldv10low_res.pdf
75. Абрамов О. В. Обеспечение надежности технических систем на основе функционально-параметрического подхода // Труды междунар. научной конфер. “Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем”. Под ред. А. Н. Андреева, А. В. Блинова, Н. К. Юркова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1998.

– С. 8 – 9.

76. Абчук В. А. Справочник по исследованию операций / В. А. Абчук, Ф. А. Матвейчук, Л. П. Томашевский // Под общ. ред. Ф. А. Матвейчука. – М.: Воениздат, 1979. – 368 с.
77. Аврамчук Е. Ф. Технология системного моделирования // Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов, В.В. Калашников, Б.В. Немчинов, Н.Я. Ривес, Б.Ф. Фомин, М. Франк, А. Явор. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 520 с.
78. Агеев В. М. Автоматизация проектирования бортовых информационно-измерительных систем / В. М. Агеев, Н. В. Павлова, В. А. Сергейчик // Под ред. В. В. Петрова. – М.: Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1985. – 64 с.
79. Адерихин, И. В. Метод и математические модели оценивания готовности судовых радиотехнических средств // И. В. Адерихин, М. Г. Воротынцева, Л. В. Цветкова, Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ., 2015, № 3 – С. 49–59.
80. Адерихина, Е. И. Метод и математические модели оценивания готовности однокамерных судоходных шлюзов / автореферат диссертации к.т.н. по спец. 05.22.19. – М.: 2000. – 20 с.
81. Альгин В.Б. Расчет реальной надежности машин. Методики, программные средства, примеры [Электронный ресурс] / В.Б. Альгин, А.В. Вербицкий, Д.В. Мишута, С.В. Сиренко // Механика машин, механизмов и материалов. – Минск, Республика Беларусь, 2011. – № 2 (15). – С. 11 – 17. – Режим доступа: http://mmmm.by/pdf/ru/2011/2_2011/2.pdf. – 31.01.2016 г.
82. Архітектурний шаблон MVC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://uk.wikipedia.org/wiki/Модель-вид-контролер.
83. Богуславский Л. Б. Основы построения вычислительных сетей для автоматизированных систем / Л. Б. Богуславский, В. И. Дрожжинов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

84. Беккер П. Проектирование надежных электронных схем / П. Беккер, Ф. Йенсен: Пер. с англ. Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Сов. радио, 1977. – 256 с.
85. 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.
86. Бохманн Д. Двоичные динамические системы / Д. Бохманн, Х. Постгофф // Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
87. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
88. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.
89. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
90. Волковский С.А. Автоматизированное проектирование радиосистем комплексов летательных аппаратов / С.А. Волковский, Е. И. Оноприенко, Н. А. Важенин, А. В. Догаев // Под ред. В. Т. Фролкина и В. Н. Типугина. – М.: Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1982. – 50 с.
91. Волочій Б.Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем [Текст] / Б.Ю. Волочій. – Львів: Вид-во Національного університету „Львівська політехніка”, 2004. – 220 с.
92. Волочій, С.Б. Синтез показників ефективності складових комплексу охоронної сигналізації на сейсмічних датчиках [Текст] / С.Б. Волочій, В.А. Онищенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 1 (245). – С. 178 – 185.
93. Волочій, С.Б. Методика визначення прийнятних для розробника показників ефективності комплексу охоронної сигналізації [Текст] / С.Б. Волочій, В.А. Онищенко // Proceedings Vth International Scientific

Practical Conference “Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems” 3–5 November 2016, Chernivtsi, Ukraine, 2016. – P. 64 – 65.

94. Волочій Б.Ю. Надійнісна модель відмовостійкої програмно-апаратної системи на основі мажоритарної структури з ковзним резервуванням та автоматичним перезавантаженням програмного забезпечення [Текст] / Волочій Б.Ю., Озірковський Л.Д., Муляк О.В., Змисний М.М. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи, № 5 (64). - Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", 2013. - С. 221 - 226.
95. Волочій Б.Ю. Проектування відмовостійких систем для джерел безперебійного електроживлення [Текст] // Б.Ю. Волочій, Д.С. Кузнєцов / Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ, 2012. – Вип. 48. – С. 149-158.
96. Волочий Б. Проектирование эффективных стратегий технического обслуживания. Математические модели, алгоритмы и методики [Электронный ресурс] // Богдан Волочий, Леонид Озирковский, Игорь Кулик. – Германия: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 160 с. – URL: Режим доступу: https://www.lap-publishing.com/.../978-3-659-63366-9/
97. Волочій Б.Ю. Системотехнічне проектування телекомунікаційних мереж. Практикум: навчальний посібник / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 128 с.
98. Волочій Б.Ю. Метод побудови моделей поведінки складних систем немарковського типу у вигляді графа станів і переходів [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, І.В. Кулик // Комп’ютинг, 2012, том 10, випуск 3. – С. 262 - 271.
99. Волочій Б.Ю. Удосконалення технології моделювання дискретно-

неперервних стохастичних систем з використанням методу фаз Ерланга [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, І.В. Кулик // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Серія - Радіотехніка. Радіоапаратобудування. - Київ, 2012. - Вип. 48. - С. 159 - 167.

100. Волочій Б.Ю. Формалізація побудови моделей дискретно-неперервних стохастичних систем з використанням методу фаз Ерланга [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, І.В. Кулик // Відбір і обробка інформації (міжвідомчий збірник наукових праць). – Львів: Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, № 36(112), 2012. – С. 39 - 47.
101. Гліненко Л. К. Основи моделювання технічних систем / Л. К. Гліненко, О. Г. Сухоносов. – Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2003. – 176 с.
102. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности. – М., Высшая школа, 1977. – 160 с.
103. Голованов О. В. Моделирование сложных дискретных систем на ЭВМ третьего поколения: (Опыт применения GPSS) / О. В. Голованов, С. Г. Дуванов, В. Н. Смирнов. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.
104. Грешилов А. А. Анализ и синтез стохастических систем. Параметрические модели и конфлюентный анализ. – М.: Радио и связь, 1990. – 320 с.
105. Давыдов Э. Г. Исследование операций. – Москва: Высшая школа, 1990. – 383 с.
106. Денисьева О. М. Системы массового обслуживания с ограниченным ожиданием. – М.: Радио и связь, 1986. – 112 с.
107. Джонс Дж. К. Методы проектирования: Пер. с англ. – 2-е изд., доп. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
108. Дивак М.П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними. – Тернопіль: Видавництво ТНЕУ «Економічна

думка», 2011. – 216 с.

109. Дивак М. П. Архітектура програмної системи для моделювання статичних систем на основі аналізу інтервальних даних / М.П. Дивак; І.С.Олійник // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. − 2017. − V. 2, N. 39/− P. 70 - 81.
110. Дивак М. П. Програмна система для дослідження процесів ідентифікації зворотнього гортанного нерва / Дивак М. П., Падлецька Н. І., Пукас А. В. та ін. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 3 (52). – С. 131-137.
111. Дивак М.П. Особливості комп’ютерної реалізації методу локалізації параметрів інтервальних моделей із виділенням «насиченого блоку / М. П. Дивак , А. В. Пукас , І. С. Олійник // Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія. – 2014. – № 2(30). – С. 59 - 71.
112. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
113. Зайцев В. С. Системный анализ операторской деятельности. – М.: Радио и связь, 1990. – 119 с.
114. Захаров Г.П. Методы исследования сетей передачи данных. – М.: Радио и связь, 1982. – 208 с.
115. Иыуду К.А. Математические модели отказоустойчивых вычислительных систем / К.А. Иыуду, С.А. Кривощеков. – М.: Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1989. – 144 с.
116. Калашников И.Д. Надежностное проектирование цифровых радиосистем / И. Д. Калашников, Р. Б. Мазепа. – М.: Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1984. – 50 с.
117. Каштанов В.А. Полумарковские модели процессов технического обслуживания. – М.: Знание, 1987. – 91 с.
118. Каштанов В.А. Теория надежности сложных систем (теория и практика) / В.А. Каштанов, А.И. Медведев. – М.: "Европейский центр по качеству",

2002. – 470 с.

119. Кёниг Д., Штоян Д. Методы теории массового обслуживания / Пер. с нем.; Под ред Г. П. Климова. – М.: Радио и связь, 1981. – 128 с.
120. Кирик М. Програмні засоби для моделювання та оптимізації інформаційних мереж / М. Кирик, О. Тимченко // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. Випуск 26. – Київ: 2004. – С. 131 – 134.
121. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. И. И. Грушко; Под ред. В. И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
122. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.
123. Коваленко И.Н. Расчет вероятностных характеристик систем. – К.: Техніка, 1982. – 96 с.
124. Козлов Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. – М.: Сов. радио, 1975. – 472 с.
125. Кокс Д.Р., Смит У.Л. Теория очередей. Пер. с англ. В.В. Рыбакова, Ю.Б. Рождественского; Под ред. А.Д. Соловьева. – М.: Мир, 1966. – 218 с.
126. Кокс Д.Р. Теория восстановления / Кокс Д.Р., Смит В.Л. Пер. с анг. В.В. Рыкова и Ю.К.Беляева; Под ред. Ю.К. Беляева. – М.: Сов. радио, 1967. – 299 с.
127. Королюк В.С. Стохастические модели систем / Отв. ред. А.Ф. Турбин. – К.: Наукова думка, 1989. – 208 с.
128. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин. – К.: Наукова думка, 1976. – 181 с.
129. Кочегаров В.А. Проектирование систем распределения информации. Марковские и немарковские модели / В.А. Кочегаров, Г.А. Фролов. – М.:

Радио и связь, 1991. – 216 с.

130. Креденцер Б.П. Технічне обслуговування систем з почасовою надмірністю / Б.П. Креденцер, С.В. Лєнков, А.І. Міночкін, Д.І. Могилевич, М.І. Резніков. – К.: ВІТІ НТУУ "КПІ", 2009. – 172 с.
131. Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем. – М.: Сов. радио, 1975. – 264 с.
132. Майер, А. Разработка методов повышения надежности процесса эксплуатации вычислительных систем [Текст]: дис. на соискание академической степени доктора / Майер Александр. – Грузия, Тбилиси, Грузинский технический университет, 2008. – 144 с. Режим доступа: http://www.nplg.gov.ge/dlibrary/collect/0002/000342/Georgian%20Technical%20University%20-%20Alexander%20Mayer%20-%20Dissertation.pdf (9.10.2016)
133. Макконел С. Совершенный код. - СПб.:Питер, 2005. – 114с.
134. Малышев Н.Г. Структурно-автоматные модели технических систем. – М.: Радио и связь, 1986. – 168 с.
135. Мандзій Б.А. Автоматизація побудови моделей надійності резервованих та відновлюваних складних технічних систем [Текст] / Б.А. Мандзій, Л.Д. Озірковський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2013. – № 2/4 (62). – С. 44 – 49.
136. Мартин Дж. Системный анализ передачи данных. Том 2 Проектирование систем передачи данных / Дж. Мартин: Пер. с англ. / Под ред. В.С. Лапина. – М.: Мир, 1975. – 431 с.
137. Матвійчук Я.М. Математичне моделювання динамічних систем: теорія і практика. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І.Франка, 2000. – 215 с.
138. Методология RAD [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://citforum.ru/database/case/glava1_3_2.shtml
139. Надежность технических систем: Справочник / Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. и др. Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь,

1985. – 608с.

140. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т. 4: Методы подобия в надежности / Под общ. ред. В.А. Мельникова и Н.А. Северцева. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
141. Надежность и живучесть систем связи / Б.Я. Дудник, В.Ф. Овчаренко, В.К. Орлов, Б.Ф. Филин, А.В. Холин, А.В. Шурмин; Под ред. Б.Я. Дудника. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.
142. Озірковський Л. Д. Марковська модель як засіб комплексного моделювання інформаційних систем з функціональним резервуванням / Л. Д. Озірковський, Д. О. Улибін // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. Вісник Національного університету „Львівська політехніка" № 470. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка", 2003. – С. 101 – 109.
143. Основные положения и методические основы решения задач оценки надежности, безопасности и риска систем на основе технологии автоматизированного моделирования, реализованной в программных комплексах RELEX, ACM И RISK SPECTRUM [Электронный ресурс]: Отчет о НИР / ФГУП Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ»; отв. исп. Ершов Г.А., Можаев А.С., Викторова А.С. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 12 – 20. – Режим доступа: http://www.szma.com/nir_technology_2004.pdf
144. Пащук, Ю.М. Обґрунтування вибору відмовостійких конфігурацій для складових бортового комплексу навігації та управління безпілотного літального апарата [Текст] / Ю.М. Пащук, Ю.П. Сальник, С.Б. Волочій // Тринадцята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: тези доповідей, 12 – 13 квітня 2017 року. – Х.: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2017. – С. 143.

145. Половко А.М. Основы теории надежности [Текст] / А.М. Половко, С.В. Гуров. – Санкт-Петербург: БХВ Петербург, 2008. – 704 с.
146. Половко А.М. Основы теории надежности. Практикум [Текст] / А.М. Половко, С.В. Гуров. – Санкт-Петербург: БХВ Петербург, 2006. – 557 с.
147. Попов В. А. Анализ систем обслуживания с гиперэкспоненциальными и эрланговскими потоками / В. А. Попов, О. Ю. Мироненко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2004. – № 3. – С. 80 – 88. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2004_3_16.
148. Порівняння C# і Java [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ru.wikipedia.org/wiki/Сравнение_C_Sharp_и_Java.
149. Програмний комплекс Windchill Quality Solutions (formerly Relex) [Electronic source] / Режим доступу: http://www.crimsonquality.com/products/markov/. – 28.03.2016 р.
150. Програмний комплекс ITEM Software [Electronic source] http://www.itemuk.com/markov.html. – 28.03.2016 р.
151. Програмний комплекс RAM Commander – Markov Chains Module [Electronic source] http://www.sohar.com/downloads/download-reliability-and-safety-software.html. – 28.03.2016 р.
152. Програмний комплекс ISOGRAPH [Electronic source] http://www.isograph.com/software/reliability-workbench/markov-analysis/
153. Проектирование отказоустойчивых микропроцессорных информационно-измерительных систем / Б.Ю. Волочий, И.Д. Калашников, Р.Б. Мазепа, Б. А. Мандзий. – К.: Выща школа, 1987. – 152 с.
154. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем.: Пер. с нем. под ред. проф. Б. А. Козлова. – М.: Мир, 1979. – 454 с.
155. Райншке К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райншке, И. А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.

156. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. – М.: Сов. радио, 1971. – 520 с.
157. Северцев Н. А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке. – М.: Высшая школа, 1989. – 432 с.
158. Сильвестров Д. С. Пакеты прикладных программ статистического анализа / Д. С. Сильвестров, Н. А. Семенов, В. В. Марищук. – К.: Техніка, 1990. – 176 с.
159. Системное проектирование радиоэлектронных предприятий с гибкой автоматизированной технологией / В. Н. Волкова, А. П. Градов, А. А. Денисов и др. Под ред. В. А. Мясникова и Ф. Е. Темникова. – М.: Радио и связь, 1990. – 296 с.
160. Советов Б.Я. Построение сетей интегрального обслуживания / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 332 с.
161. Современные методы проектирования / Под ред. Б. Н. Петрова, В. В. Солодовникова, Ю.И. Топчеева. – М.: Машиностроение, 1967. – 704 с.
162. Соколов Ю.Н. Применение компьютерных технологий для оценивания надежности и безопасности программно-технических комплексов [Текст] / Ю.Н. Соколов, В.С. Харченко, В.М. Илюшко, Ю.Л. Поночовный, М.Ф. Бабаков / Под ред. Ю.Н. Соколова и В.С. Харченко – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", 2013. – 458 с.
163. 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.
164. Тараканов К.В. Аналитические методы исследования систем /

К.В. Тараканов, Л.А. Овчаров, А.Н. Тарышкин. – М.: Сов. радио, 1974. – 240 с.

165. Труханов, В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытаний опытных образцов. – М.: Машиностроение, 2003. – 320 с.
166. Федасюк, Д.В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей дискретно-неперервних стохастичних систем [Текст] / Д.В. Федасюк, С.Б. Волочій // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", 2016. – № 6 (80). – С. 24 – 34.
167. Федасюк, Д.В. Структурно-автоматна модель відмовостійких систем для автоматизації використання методу фаз Ерланга [Текст] / Д.В. Федасюк, С.Б. Волочій // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут". – 2016. – № 3 (77). – С. 78 – 92.
168. Федасюк, Д.В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з альтернативними продовженнями випадкових процесів після процедур контролю, перемикання і відновлення / Д.В. Федасюк, С.Б. Волочій // Вісник національного університету "Львівська політехніка" № 864. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2017. – Львів, Вид-во НУ «Львівська політехніка». – С. 49 – 62.
169. Хенлі Е. Дж. Надійнісне проектування технічних систем і оцінка риску / Е. Дж. Хенлі, Х. Кумамото // Пер. з англ: під ред. Зареніна Ю.Г. – К.: Вища школа, 1987. – 544 с.
170. Щенников Ю. Ф. Проектирование управляющих вычислительных комплексов для АСУ ТП / Ю. Ф. Щенников, Ю. М. Воронин, В. Я. Петров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
171. Щербовських С. В. Математичні моделі надійності ремонтованих об’єктів на основі розширення простору станів / Дисертація на здобуття

наукового ступеня к.т.н. – Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2005. – 201 с.

172. 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.
173. Яковина В.С. Програмний модуль для розробки моделей поведінки складних технічних систем [Текст] / В.С. Яковина, С.Б. Волочій // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті (СІТЕМ-2012) : Матеріали ІІІ-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Львів, 2012. – С. 234 – 237.

Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Федасюк, Д.В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей дискретно-неперервних стохастичних систем [Текст] / Д.В. Федасюк, С.Б. Волочій // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", 2016. – № 6 (80). – С. 24 – 34. (eLIBRARY.RU; Index Copernicus; INSPEC).

2. Федасюк, Д.В. Структурно-автоматна модель відмовостійких систем для автоматизації використання методу фаз Ерланга [Текст] / Д.В. Федасюк, С.Б. Волочій // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут". – 2016. – № 3 (77). – С. 78 – 92. (eLIBRARY.RU; Index Copernicus; INSPEC).

3. Федасюк, Д.В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з альтернативними продовженнями випадкових процесів після процедур контролю, перемикання і відновлення / Д.В. Федасюк, С.Б. Волочій // Вісник національного університету "Львівська політехніка" № 864. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2017. – Львів, Вид-во НУ «Львівська політехніка». – С. 49 – 62.

4. Волочій, С.Б. Синтез показників ефективності складових комплексу охоронної сигналізації на сейсмічних датчиках [Текст] / С.Б. Волочій, В.А. Онищенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – №1 (245). – С. 178 – 185. (Google Scholar; Index Copernicus; РИНЦ; Polish Scholarly Bibliography)

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, Slovakia. – 2016. – Vol. 2. – Issue 2. – pp. 1 – 10.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Fedasyuk, D. The Verification of Structural Automaton Models of Behavior Algorithms of Complex Information Systems // Dmytro Fedasyuk, Vitaliy Yakovyna, Serhiy Volochiy / 11th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications ICTERI 2015 (Ukraine, Lviv, 2015); (Дати проведення: 14 – 16 травня 2015 р., форма участі – очна доповідь).

2. Fedasyuk, D. Method of developing the behavior models in form of states diagram for complex information systems [Text] / D. Fedasyuk, S. Volochiy / Computer science and information technologies: Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference CSIT 2015. – Lviv, 2015. – P. 5 – 8. (SCOPUS). (Дати проведення: 14 – 17 вересня 2015 р., форма участі – очна доповідь).

3. Volochiy, B. Safety Estimation of Critical NPP I&C Systems via State Space Method [Electronic sourse] / 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. (SCOPUS). Режим доступу: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7432990. (Дати проведення: 15 – 18 лютого 2016 р., форма участі – співдоповідач).

4. Fedasyuk, D. Method of the Structural-Automaton Model Development for Diskrete-Continuous Stochastic Systems / Dmytro Fedasyk, Serhiy Volochiy // International Scientific Technical Conference “DEpendable Systems, SERvices and Technologies CYBER FORUM DESSERT B2S-S2B” (Ukraine, Kharkiv-Kyiv-Chernivtsi, 2016); (Дати проведення: 21 – 23 травня 2016 р., форма участі – очна доповідь).

5. Fedasyuk, D. Method of Developing the Structural-Automaton Models of Fault-Tolerant Systems [Text] / Dmytro Fedasyk, Serhiy Volochiy // Proceedings 14th International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)”, 21 – 25 February 2017, Polyana, Ukraine. – P. 22 – 26. (SCOPUS). (Дати проведення: 21 – 25 лютого 2017 р., форма участі – очна доповідь).

6. Pashchuk, Yu. Reliability Synthesis for UAV Flight Control System / Yuriy Pashchuk, Yuriy Salnyk, Serhiy Volochiy // Proceedings of the 13th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, Kyiv, Ukraine, May 15-18, 2017, p. 569 – 582. (SCOPUS). (Дати проведення: 15 – 18 травня 2017 р., форма участі – співдоповідач)

7. Ozirkovskyy, L. The Automation of the Exploitation Risks Assessment of the Navigation Information System of Air Drones [Text] / L. Ozirkovskyy, Yu. Pashchuk, A. Mashchak, S. Volochiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XIII International Conference TCSET'2016, Februaru 23 – 26. – Lviv, 2016. – P. 140 – 144. (SCOPUS). (Дати проведення: 23 – 26 лютого 2016 р., форма участі – співдоповідач).

8. Volochiy, S. Formalized Development of the State Transition Graphs Using the Erlang Phase Method / Serhiy Volochiy, Dmytro Fedasyuk, Ratibor Chopey // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: Proceedings of the 9th IEEE International Conference, 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania. – P. 1098 – 1101. (SCOPUS). (Дати проведення: 21 – 23 вересня 2017 р., форма участі – співдоповідач).

9. Яковина, В.С. Програмний модуль для розробки моделей поведінки складних технічних систем [Текст] / В.С. Яковина, С.Б. Волочій // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті (CITEM-2012) :

Матеріали ІІІ-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції, 21 листопада 2012, Львів. – Львів, 2012. – С. 234 – 237. (Дата проведення: 21 листопада 2012 р., форма участі – очна доповідь).

10. Волочій, С.Б. Методика визначення прийнятних для розробника показників ефективності комплексу охоронної сигналізації [Текст] / С.Б. Волочій, В.А. Онищенко // Proceedings Vth International Scientific Practical Conference “Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems” 3 – 5 November 2016, Chernivtsi, Ukraine, 2016. – P. 64 – 65. (Дати проведення: 3 – 5 листопада 2016 р., форма участі – співдоповідач).

11. Пащук, Ю.М. Обґрунтування вибору відмовостійких конфігурацій для складових бортового комплексу навігації та управління безпілотного літального апарата [Текст] / Ю.М. Пащук, Ю.П. Сальник, С.Б. Волочій // Тринадцята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: тези доповідей, 12 – 13 квітня 2017 року. – Х.: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2017. – С. 143. (Дати проведення: 12 – 13 квтня 2017 р., форма участі – співдоповідач).

12. Onishchenko, V.A. Structural-automaton Models of the RSC Reaction on the MO Crossing TWO Control Zones with Layouts of Seismic Sensors {2+1} and {1+2} [Text] / V.A. Onishchenko, S.B. Volochiy // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 11 – 12 травня 2017 року). – Львів: НАСВ, 2017. – С. 119 – 120. (Дати проведення: 11 – 12 травня 2017 р., форма участі – співдоповідач).

Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертації

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

_____ проф. Н.І. Чухрай

«__» _____ 2017 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Волочія Сергія Богдановича на тему «Математичне та програмне забезпечення для дискретно-неперервного стохастичного моделювання відмовостійких програмно-технічних комплексів», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Комісія у складі начальника науково-дослідної частини, к.т.н., доцента Жук Л.В., завідувача відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г.В., заступника начальника планово-фінансової групи Чулой Т.М., завідувача кафедри програмного забезпечення, д.т.н., проф. Яковини В.С. цим актом підтверджує, що результати дисертаційної роботи Волочія Сергія Богдановича на тему «Математичне та програмне забезпечення для дискретно-неперервного стохастичного моделювання відмовостійких програмно-технічних комплексів» використані при виконанні науково-дослідних робіт ДБ/ПНРЛ «Розроблення моделей, методів та алгоритмів для автоматизованої оцінки показників надійності радіоелектронних та електромеханічних пристроїв та систем» (№ держреєстрації 0110U001098), ДБ/ТРИКАФ «Розроблення моделей надійності, ризику та безпечності програмно-апаратних технічних систем» (№ держреєстрації 0113U001371) та ДБ/РИЗИК «Розробка математичного забезпечення для програмного засобу аналізу функціональної безпечності та надійності програмно-апаратних систем відповідального призначення» (№ держреєстрації 0117U004458), а саме:

- розроблено метод визначення компонент структурно-автоматних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів на основі опорного графа станів;
- удосконалено метод валідації структурно-автоматних моделей;
- розроблено метод модифікації структурно-автоматних моделей, який забезпечує використання закону розподілу Ерланга в процесі побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів;
- удосконалено метод побудови опорного (тестового) графа станів на основі базових подій.

Запропоновані методи та методики покладені в основу програмного забезпечення, яке призначено для проектантів і забезпечує комп'ютерну підтримку процесу розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів.

Начальник НДЧ, к.т.н., доц. _____ Жук Л.В.

Зав. відділу НОСНД, к.т.н. _____ Лазько Г.В.

Заст. начальника ПФГ _____ Чулой Т.М.

Зав. каф. ПЗ, д.т.н., доц. _____ Яковина В.С.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник начальника
Національної академії сухопутних військ
імені гетьмана Петра Сагайдачного з наукової роботи

полковник А.В. СЛЮСАРЕНКО

"20" 10 2017 р.

АКТ
про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи
Волочія Сергія Богдановича
аспіранта кафедри програмного забезпечення
Національного університету «Львівська політехніка»

Комісія у складі: голови – начальника Наукового центру Сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного полковника, к.т.н. Хаустова Д.Є., членів комісії – начальника науково-дослідного відділу (застосування Сухопутних військ у міжнародних операціях, стабілізаційних та специфічних діях) Наукового центру Сухопутних військ підполковника, к.т.н., с.н.с. Сальника Ю.П., старшого наукового співробітника працівника ЗС України Онищенка В.А. та наукового співробітника працівника ЗС України Пащука Ю.М. склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Волочія Сергія Богдановича, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії), використані в науково-дослідних роботах за шифрами «Бар'єр-СП», «Дрон-СВ» та «Сокіл».

До використання були прийняті:

метод та методика визначення компонент структурно-автоматних моделей поведінки програмно-технічних систем на основі опорного графа станів;

метод та методика валідації структурно-автоматних моделей;

метод та методика модифікації структурно-автоматних моделей, який забезпечує використання закону розподілу Ерланга в процесі побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей функціональної і надійнісної поведінки програмно-технічних систем;

метод побудови опорного (тестового) графа станів на основі базових подій.

Прийняті методи та методики використані в процесі розроблення моделей реакції розвідувально-сигналізаційного комплексу (РСК) на перетин рухомим об'єктом двох зон контролю з різними схемами розміщення сейсмічних датчиків та в процесі розроблення надійнісних моделей бортового комплексу навігації та управління безпілотного літального апарата.

Розроблені моделі покладено в основу:

1) методики надійнісного синтезу бортового комплексу навігації та управління безпілотного літального апарата;
2) методики синтезу показників ефективності складових РСК;
3) методики синтезу структури РСК.

Використання перелічених вище методів та методик дозволило забезпечити необхідний для розв'язання задач структурного і параметричного синтезу об'єктів проектування ступінь адекватності аналітичних моделей об'єктів проектування, скоротити терміни отримання результатів досліджень через зменшення працеємності їх виконання.

Даний Акт не є підставою для фінансових взаєморозрахунків.

Голова комісії: начальник Наукового центру Сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, к.т.н.
полковник Д.Є. Хаустов

Члени комісії: начальник науково-дослідного відділу (застосування Сухопутних військ у міжнародних операціях, стабілізаційних та специфічних діях) Наукового центру Сухопутних військ, к.т.н., с.н.с,
підполковник Ю.П. Сальник

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу (застосування Сухопутних військ у міжнародних операціях, стабілізаційних та специфічних діях) Наукового центру Сухопутних військ
працівник ЗС України В.А. Онищенко

Науковий співробітник науково-дослідного відділу (застосування Сухопутних військ у міжнародних операціях, стабілізаційних та специфічних діях) Наукового центру Сухопутних військ
працівник ЗС України Ю.М. Пащук

Складений акт розглянуто і схвалено на засіданні науково-технічної ради Наукового центру Сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. Протокол № 11 від 13. 10. 2017 р.

Секретар НТР Наукового центру Сухопутних військ, к.т.н.,
підполковник Є.В. Рижов

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з науково-педагогічної роботи
НУ «Львівська політехніка»
_____ доц. Давидчак О.Р.
«11» ____10____ 2017 р.

АКТ

про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи
Волочія Сергія Богдановича
«Математичне та програмне забезпечення для дискретно-неперервного стохастичного моделювання відмовостійких програмно-технічних комплексів»
у навчальному процесі кафедри «Програмне забезпечення»

Даний акт складено комісією у складі:
д.т.н., проф. Медиковський М.О. – директор Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій;
д.т.н., доц. Яковина В.С. – завідувач кафедри програмного забезпечення, лектор дисципліни;
к.т.н., доц. Сенів М.М. – доцент кафедри програмного забезпечення,
про те, що в навчальному процесі кафедри програмного забезпечення використано результати кандидатської дисертаційної роботи «Математичне та програмне забезпечення для дискретно-неперервного стохастичного моделювання відмовостійких програмно-технічних комплексів», а саме для студентів спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» в лекційному курсі та практикумі дисципліни «Основи теорії надійності програмних систем».

Для студентів вивчення нового методу розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей відкриває можливість виконувати дослідження надійності складних програмно-апаратних систем. В процесі розроблення моделей студент вчиться вибирати необхідний ступінь їх адекватності. При цьому затрати часу на розроблення і дослідження моделей є суттєво нижчими, ніж підчас використання традиційної технології розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей.

Члени комісії _____ Медиковський М.О.
_____ Яковина В.С.
_____ Сенів М.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з науково-педагогічної роботи
НУ «Львівська політехніка»
_____ доц. Давидчак О.Р.
«24» 10 2017 р.

АКТ

про впровадження результатів кандидатської дисертаційної роботи
Волочія Сергія Богдановича
«Математичне та програмне забезпечення для розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів»
у навчальному процесі кафедри «Теоретична радіотехніка та радіовимірювання»

Даний акт складено комісією у складі:

– д.т.н., проф. Стрихалюк Б.М., голова методичної ради Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, декан повної вищої освіти;

– к.т.н., доц. Озірковський Л.Д., декан базової вищої освіти Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;

– к.т.н., проф. Кіселичник М.Д., завідувач кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань

про те, що в навчальному процесі кафедри «Теоретична радіотехніка та радіовимірювання» впроваджено результати кандидатської дисертаційної роботи «Математичне та програмне забезпечення для розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів», а саме для аспірантів та студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» в лекційних курсах та практикумах дисциплін: «Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем» (для аспірантів) і «Системотехнічне проектування телекомунікаційних систем та мереж» (для студентів магістратури).

Вивчення удосконаленої технології розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей дає змогу аспірантам і студентам виконувати дослідження складних технічних систем, рішати задачі структурного та параметричного синтезу. В процесі розроблення моделей практично відсутнє обмеження на ступінь їх адекватності. При цьому затрати часу на розроблення і дослідження моделей є суттєво нижчими, ніж підчас використання традиційної технології розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей.

Члени комісії _____ Стрихалюк Б.М.

_____ Озірковський Л.Д.

_____ Кіселичник М.Д.

Додаток В. Методика розроблення графа станів без альтернативних переходів на основі базових подій

Методику розроблення графа станів без альтернативних переходів подаємо разом з прикладом її реалізації для відмовостійкої системи з мажоритарним резервуванням за правилом "2 із 3". Конфігурація відмовостійкої системи представлена на рисунку ДВ.1, де використані такі позначення: ПАС – програмно-апаратна система, МЕ – мажоритарний елемент. Для несправних програмно-апаратних систем передбачено відновлення (заміна). Кількість відновлень обмежена. Мажоритарний елемент відновленню не підлягає.

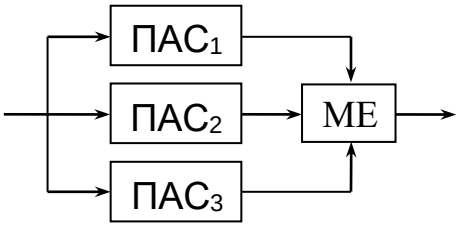

Рисунок ДВ.1 – Конфігурація відмовостійкої системи з мажоритарним резервуванням

Параметри відмовостійкої системи, які треба відобразити в моделі:

- інтенсивність відмов ПАС – $\lambda_{ПАС}$;
- інтенсивність відмов МЕ – $\lambda_{МЕ}$;
- кількість обумовлених відновлень (замін) ПАС – $k_{в;}$
- середнє значення тривалості відновлення (заміни) ПАС – $t_{в}$.

Визначення базових подій. Для визначення базових подій необхідно прийняти до уваги всі процеси і процедури, які відображені (враховані) в алгоритмі поведінки об'єкта дослідження. Для процедур властивими є події, які представляють їх початок і закінчення. Кожна процедура характеризуються середнім значенням її тривалості. Події, що представляють закінчення процедури вважаються базовими подіями [91, с. 65 - 68].

До базових подій також відносяться події зовнішніх і внутрішніх процесів, з якими взаємодіє об'єкт дослідження в процесі функціонування і які впливають на його стан. Наприклад, збої в роботі програмно-апаратної

системи, надходження заявок в систему масового обслуговування. Процеси характеризуються середнім значенням інтервалу часу між сусідніми подіями.

Для визначення базових подій, події, що стосуються кожної процедури і кожного процесу, зручно (доцільно) представляти парами. Для відмовостійкої системи, що розглядається, такі події подані в таблиці ДВ.1.

Таблиця ДВ.1 – Події надійнісної поведінки відмовостійкої системи з мажоритарним резервуванням

Пор. №	Подія - початок	Подія - закінчення	Сер. знач. тривалості
1	Початок роботи ПАС (з моменту початку експлуатації або з моменту закінчення чергового відновлення)	БП1: Відмова ПАС	$1/\lambda_{ПАС}$
2	Початок роботи МЕ (з моменту початку експлуатації)	БП2: Відмова МЕ	$1/\lambda_{МЕ}$
3	Початок процедури відновлення несправної ПАС	БП3: Закінчення процедури відновлення несправної ПАС	$t_в$

Обґрунтування компонент вектора, який має представляти стан об'єкта дослідження. Компонента V1 представляє поточне значення кількості працездатних ПАС. Ця компонента може приймати такі значення: V1 = 3 – справними є 3 ПАС, V1 = 2 – справними є 2 ПАС, V1 = 1 – справною є 1 ПАС. Початкове значення компоненти V1 = 3.

Компонента V2 представляє стан МЕ. Ця компонента може приймати такі значення: V2 = 1 – МЕ справний, V2 = 0 – МЕ несправний; початкове значення компоненти V2 = 1.

Компонента V3 представляє поточне значення кількості використаних відновлень. Ця компонента може приймати такі значення: V3 = 0, 1, ..., $k_в$. Початкове значення компоненти V3 = 0.

Компонента V4 відображає можливість відновлення ПАС. Ця компонента може приймати такі значення: V4 = 1 – відновлення ПАС можливе, V4 = 0 – відновлення ПАС не можливе. Початкове значення компоненти V4 = 1.

Умова виникнення критичної відмови (КВ) для відмовостійкої системи,

що розглядається, формулюється так: критична відмова настає тоді, коли залишається одна працездатна ПАС або втрачає працездатність МЕ. Формалізоване представлення умови виникнення КВ має такий вигляд: (V1=1) OR (V2=0).

ДВ.1 Розроблення опорного графа станів за методикою побудови графа станів на основі базових подій. Вхідними даними є: базові події алгоритму поведінки відмовостійкої системи, компоненти вектора стану, параметри відмовостійкої системи. Кількість обумовлених відновлень для програмно-апаратних систем $k_в = 2$. Результати побудови заносимо в таблицю ДВ.2, де в колонку 1 заносимо номер кроку; в колонку 2 – номер попереднього стану, що розглядається, і номер актуальної базової події; в колонки 3, 4, 5 і 6 – значення компонент вектора стану, що наступає після базової події; в колонку 7 – присвоєний номер стану; в колонку 8 – номер попереднього стану, з якого здійснюється перехід (номер стану береться з колонки 2), і номер наступного стану, в який здійснюється перехід (номер стану береться з колонки 7); в колонку 9 – формула розрахунку значення інтенсивності базової події, яка розглядається на цьому кроці.

Розроблення графа станів здійснюється в такій послідовності:

Крок 1. Формуємо початковий стан графа (ПСГ): V1 = 3, V2 = 1, V3 = 0, V4 = 1. Присвоюємо йому №1.

Крок 2. Розглядаємо стан 1. Визначаємо, чи є актуальною для цього стану базова подія БП1: Так, вона є актуальною так як всі ПАС до цієї події були працездатними. БП1 ініціює зменшення кількості працездатних ПАС V1:= V1 - 1 = 2 і початок процедури відновлення несправної ПАС V3:= 1. Так як цей стан (V1 = 2, V2 = 1, V3 = 1, V4 = 1) отримано вперше, то йому присвоюється №2. Фіксується перехід із стану 1 в стан 2. В стані 1 є справними і працюють всі ПАС. Тому інтенсивність БП1 визначається за формулою $3\lambda_{ПАС}$.

Крок 3. Продовжуємо розгляд стану 1. Визначаємо чи є актуальною для цього стану базова подія БП2: так, вона є актуальною бо МЕ є працездатним. БП2 ініціює зміну компоненти V2:= 0. Цей стан (V1 = 3, V2 = 0, V3 = 0, V4 = 1) отримано вперше. Так як він представляє критичну відмову відмовостійкої системи, для нього присвоюємо позначення КВ. Фіксується перехід із стану 1 в стан КВ. Інтенсивність БП2 визначається параметром λ_{ME}.

Ці і всі подальші результати побудови опорного графа станів на *кроках з 3 до 15* представлені в таблиці ДВ2.

Таблиця ДВ.2 – Опорний граф станів і переходів для відмовостійкої системи з кількістю відновлень ПАС $k_в$ =2

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна БП	Наступний стан після реалізації БП				№ стану	Перехід з стану в стан	Формули для розрахунку інтенсивності БП
		V1	V2	V3	V4			
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	ПСГ	3	1	0	1	1	-	-
2	1БП1	2	1	1	1	2	$1 \to 2$	$3\lambda_{ПАС}$
3	1БП2	3	0	0	1	КВ	$1 \to$ КВ	λ_{ME}
4	2БП1	1	1	1	1	КВ	$2 \to$ КВ	$2\lambda_{ПАС}$
5	2БП2	2	0	1	1	КВ	$2 \to$ КВ	λ_{ME}
6	2БП3	3	1	1	1	3	$2 \to 3$	$1/ t_в$
7	3БП1	2	1	2	1	4	$3 \to 4$	$3\lambda_{ПАС}$
8	3БП2	3	0	1	1	КВ	$3 \to$ КВ	λ_{ME}
9	4БП1	1	1	2	1	КВ	$4 \to$ КВ	$2\lambda_{ПАС}$
10	4БП2	2	0	2	1	КВ	$4 \to$ КВ	λ_{ME}

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна БП	Наступний стан після реалізації БП				№ стану	Перехід з стану в стан	Формули для розрахунку інтенсивності БП
		V1	V2	V3	V4			
11	4БП3	3	1	2	1	5	$4 \to 5$	$1/ t_в$
12	5БП1	2	1	2	0	6	$5 \to 6$	$3\lambda_{ПАС}$
13	5БП2	3	0	2	1	КВ	$5 \to$ КВ	$\lambda_{МЕ}$
14	6БП1	1	1	2	0	КВ	$6 \to$ КВ	$2\lambda_{ПАС}$
15	6БП2	2	0	2	0	КВ	$6 \to$ КВ	$\lambda_{МЕ}$

ДВ.2 Методика розроблення структурно-автоматних моделей без альтернативних переходів на основі опорного графа станів

Вхідними даними методики розроблення структурно-автоматних моделей без альтернативних переходів є: базові події і опорний граф станів, побудований на основі базових подій (таблиця ДВ.2). Компонентами структурно-автоматної моделі є:

- базові події;
- формалізований опис всіх ситуацій, в яких може відбуватися базова подія (складаємо для кожної базової події);
- формули розрахунку інтенсивностей базової події (формули компонуються для кожної ситуації);
- правила модифікації компонент вектора стану (правила складаються (формуються) для кожної ситуації).

Для складання формалізованого опису всіх ситуацій, в яких може відбуватися базова подія, необхідно їх виявити. Виявлення ситуацій здійснюється на основі вибору наступного після БП і попереднього станів та їх порівняння. Вибір цих пар станів здійснюється за такими двома ознаками:

1) вибираються стани, що утворюються (формуються) після базової події, яким відповідають однакові формули розрахунку інтенсивності цієї БП;
2) із вибраних станів для складання опису ситуації залишаються ті, у яких зміна стану відносно попереднього стану обумовлена зміною однакових компонент вектора стану.

Нагадаємо, що в опис ситуації входять умова та обставини. Умова визначає саму можливість того, що БП відбудеться. Обставини, за яких відбувається БП, визначають можливий варіант наступного стану. Від кількості обставин, залежить кількість варіантів наступного стану.

Методика складання (формування) формалізованого опису ситуацій для кожної базової події показана нижче на прикладах.

Визначені компоненти структурно-автоматної моделі заносимо в таблицю ДВ.6:

- в колонку 1 заносимо базову подію;
- в колонку 2 – формалізований опис всіх ситуацій, в яких відбувається базова подія;
- в колонку 3 – формули розрахунку інтенсивностей переходів (ФРІП);
- в колонку 4 – правила модифікації компонент вектора стану (ПМКВС).

Така форма представлення структурно-автоматної моделі має відповідати формі діалогового вікна програмного засобу, що розробляється.

Розроблення структурно-автоматної моделі здійснюється в такій послідовності:

Визначаємо ситуації, яких може відбуватися базова подія БП1.

Крок 1. З таблиці ДВ.2 вибираємо кроки, на яких розглядалася БП1 і кроки, на яких сформовано попередні стани. Представляємо їх в таблиці ДВ3.

Крок 2. Для БП1 формуємо опис 1-ї ситуації, в якій вона відбувається. За першою ознакою (наступні стани після БП1 мають однакові формули для визначення інтенсивності базової події – $3\lambda_{ПАС}$) до 1-ї ситуації, в якій відбувається БП1, слід віднести стани 1, 3 і 5. За другою ознакою (зміна стану обумовлена зміною вектора стану одночасно в компонентах V1 і V3) 1-у ситуацію формують (показують) стани 1 і 3. На основі аналізу станів 1 і 3 разом з наступними для них станами 2 і 4 формуємо формалізований опис 1-ї ситуації:

$$(V1 = 3)\ AND\ (V2 = 1)\ AND\ (V3 < k_в)\ AND\ (V4 = 1).$$

Таблиця ДВ.3 – Вхідні дані для визначення компонент структурно-автоматної моделі до БП1

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Наступний стан після реалізації БП				№ стану	Перехід з стану в новий стан	Формули для розрахунку інтенсивностей переходів
		V1	V2	V3	V4			
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	ПСГ	3	1	0	1	1	-	-
2	1БП1	2	1	1	1	2	$1 \rightarrow 2$	$3\lambda_{ПАС}$
4	2БП1	1	1	1	1	КВ	$2 \rightarrow$ КВ	$2\lambda_{ПАС}$
6	2БП3	3	1	1	1	3	$2 \rightarrow 3$	$1/ t_в$
7	3БП1	2	1	2	1	4	$3 \rightarrow 4$	$3\lambda_{ПАС}$
9	4БП1	1	1	2	1	КВ	$4 \rightarrow$ КВ	$2\lambda_{ПАС}$
11	4БП3	3	1	2	1	5	$4 \rightarrow 5$	$1/ t_в$
12	5БП1	2	1	2	0	6	$5 \rightarrow 6$	$3\lambda_{ПАС}$
14	6БП1	1	1	2	0	КВ	$6 \rightarrow$ КВ	$2\lambda_{ПАС}$

Формула для визначення інтенсивності базової події (ФРІБП) має вигляд: $3\lambda_{ПАС}$. Правило модифікації компонент вектора стану (ПМКВС) є таким:

$$V1:=V1-1;\ V3:=V3+1.$$

Крок 3. Для БП1 формуємо опис 2-ї ситуації, в якій вона відбувається. З 1-ї ситуації випав стан 5, для якого наступним є стан 6. Аналіз стану 5 разом з наступним станом 6 показує, що 2-а ситуація має такий формалізований опис:

$$(V1 = 3)\ AND\ (V2 = 1)\ AND\ (V3 = k_в)\ AND\ (V4 = 1).$$

Формула розрахунку інтенсивності базової події має вигляд: $3\lambda_{ПАС}$. Правило модифікації компонент вектора стану є таким: V1:=V1-1; V4:=0.

Крок 4. Для БП1 формуємо опис 3-ї ситуації, в якій вона відбувається. За першою ознакою (наступні стани після БП1 мають однакові формули для визначення інтенсивності базової події – $2\lambda_{ПАС}$) до 3-ї ситуації, в якій відбувається БП1, слід віднести стани 2, 4 і 6. Ці ж стани формують 3-ю ситуацію і за другою ознакою (зміна стану обумовлена зміною вектора стану в компоненті V1). Аналіз станів 2, 4 і 6 разом з наступними для них станами КВ показує, що 3-я ситуація має такий формалізований опис:

$$(V1 = 2)\ AND\ (V2 = 1)\ AND\ (0<V3 \le k_в)\ AND\ ((V4 = 1)\ OR\ (V4=0)).$$

Формула розрахунку інтенсивності базової події має вигляд: $2\lambda_{ПАС}$. Правило модифікації компонент вектора стану є таким: V1:=V1-1. Так як не розглянутих станів в таблиці 3 не залишилось, переходимо на крок 5.

Визначаємо ситуації для базової події БП2.

Крок 5. З таблиці ДВ.2 вибираємо кроки, на яких розглядалася БП2 і кроки, на яких сформовано попередні стани. Представляємо їх в таблиці ДВ.4.

Крок 6. Для БП2 формуємо опис 1-ї ситуації, в якій вона відбувається. За першою ознакою (наступні стани після БП2 мають однакові формули для визначення інтенсивності базової події $\lambda_{МЕ}$) до 1-ї ситуації слід віднести стани 1, 2, 3, 4, 5 і 6. Ці ж стани формують 1-у ситуацію і за другою ознакою (зміна стану обумовлена зміною вектора стану в компоненті V2). Аналіз станів 1, 2, 3, 4, 5 і 6 разом з наступними для них станами КВ показує, що 1-а ситуація має такий формалізований опис:

$$((V1 = 2)\ OR\ (V1 = 3))\ AND\ (V2 = 1)\ AND\ (V3 \le k_в))$$
$$AND\ ((V4 = 1)\ OR\ (V4=0)).$$

Таблиця ДВ.4 – Вхідні дані для визначення компонент структурно-автоматної моделі до БП2

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Наступний стан після реалізації БП				№ стану	Перехід з стану в новий стан	Формули для розрахунку інтенсивностей переходів
		V1	V2	V3	V4			
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	ПСГ	3	1	0	1	1	-	-
2	1БП1	2	1	1	1	2	$1 \rightarrow 2$	$3\lambda_{ПАС}$
3	1БП2	3	0	0	1	КВ	$1 \rightarrow$ КВ	$\lambda_{МЕ}$
5	2БП2	2	0	1	1	КВ	$2 \rightarrow$ КВ	$\lambda_{МЕ}$
6	2БП3	3	1	1	1	3	$2 \rightarrow 3$	$1/ t_в$
7	3БП1	2	1	2	1	4	$3 \rightarrow 4$	$3\lambda_{ПАС}$
8	3БП2	3	0	1	1	КВ	$3 \rightarrow$ КВ	$\lambda_{МЕ}$
10	4БП2	2	0	2	1	КВ	$4 \rightarrow$ КВ	$\lambda_{МЕ}$
11	4БП3	3	1	2	1	5	$4 \rightarrow 5$	$1/ t_в$
12	5БП1	2	1	2	0	6	$5 \rightarrow 6$	$3\lambda_{ПАС}$
13	5БП2	3	0	2	1	КВ	$5 \rightarrow$ КВ	$\lambda_{МЕ}$
15	6БП2	2	0	2	0	КВ	$6 \rightarrow$ КВ	$\lambda_{МЕ}$

Формула розрахунку інтенсивностей переходів має вигляд: $\lambda_{МЕ}$. Правило модифікації компонент вектора стану є таким: V2:=0. Так як не розглянутих станів в таблиці 4 не залишилось, переходимо на крок 7.

Визначаємо ситуації для базової події БП3.

Крок 7. З таблиці ДВ.2 вибираємо кроки, на яких розглядалася БП3 і кроки, на яких сформовано попередні стани. Представляємо їх в таблиці ДВ.5.

Таблиця ДВ.5 – Вхідні дані для визначення компонент структурно-автоматної моделі до БПЗ

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Наступний стан після реалізації БП				№ стану	Перехід з стану в новий стан	Формули для розрахунку інтенсивностей переходів
		V1	V2	V3	V4			
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
2	1БП1	2	1	1	1	2	$1 \rightarrow 2$	$3\lambda_{ПАС}$
6	2БП3	3	1	1	1	3	$2 \rightarrow 3$	$1/t_в$
7	3БП1	2	1	2	1	4	$3 \rightarrow 4$	$3\lambda_{ПАС}$
11	4БП3	3	1	2	1	5	$4 \rightarrow 5$	$1/t_в$

Крок 8. Для БП3 формуємо опис 1-ї ситуації, в якій вона відбувається. За першою ознакою (наступні стани після БП3 мають однакові формули для визначення інтенсивності базової події $1/t_в$) до 1-ї ситуації слід віднести стани 2 і 4. Ці ж стани формують 1-у ситуацію і за другою ознакою (зміна стану обумовлена зміною вектора стану в компоненті V1). Аналіз станів 2 і 4 разом з наступними для них станами 3 і 5 показує, що 1-а ситуація, в якій відбувається БП3 має такий формалізований опис:

$$(V1 = 2)\ AND\ (V2 = 1)\ AND\ (0<V3 \leq k_в)\ AND\ (V4 = 1).$$

Формула розрахунку інтенсивності базової події має вигляд: $1/t_в$. Правило модифікації компонент вектора стану є таким: V1:=V1+1. Так як не розглянутих станів в таблиці 5 не залишилось і розглянуті всі базові події, переходимо на крок 9.

Валідація структурно-автоматної моделі.

Крок 9. Останнім етапом розроблення структурно-автоматної моделі є її валідація. В методиці валідації структурно-автоматних моделей використовується тестова модель об'єкта дослідження у вигляді графа станів, який розроблено на основі базових подій. Методика валідації передбачає виконання таких завдань:

- порівняння графа станів, сформованого на основі структурно-

автоматної моделі з тестовою моделлю (граф станів побудований на основі базових подій);

- локалізація та аналіз компонент структурно-автоматної моделі з метою виявлення помилок та їх виправлення.

Результати розроблення структурно-автоматної моделі зведені в таблиці ДВ.6.

Таблиця ДВ.6 – Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з мажоритарним резервуванням

БП	Опис ситуацій, в яких відбуваються БП	ФРІП	ПМКВС
1	**2**	**3**	**4**
БП1	1. (V1 = 3) AND (V2 = 1) AND (V3 < $k_в$) AND (V4 = 1)	$3\lambda_{ПАС}$	V1:=V1-1; V3:=V3+1
	2. (V1 = 3) AND (V2 = 1) AND (V3 = $k_в$) AND (V4 = 1)	$3\lambda_{ПАС}$	V1:=V1-1; V4:=0
	3. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0<V3 ≤ $k_в$) AND ((V4 = 1) OR (V4=0))	$2\lambda_{ПАС}$	V1:=V1-1
БП2	1. ((V1 = 2) OR (V1 = 3)) AND (V2 = 1) AND (V3 ≤ $k_в$)) AND ((V4 = 1) OR (V4=0))	$\lambda_{МЕ}$	V2:=0
БП3	1. (V1 = 2) AND (V2 = 1) AND (0<V3 ≤ $k_в$) AND (V4 = 1)	$1/ t_в$	V1:=V1+1

Побудова графа станів на основі структурно-автоматної моделі здійснюється за алгоритмом, описаним в [91, с. 79 - 92].

Додаток Г. Відоме програмне забезпечення автоматизованого надійнісного і функціонального аналізу складних технічних систем

Одним з провідних розробників засобів автоматизованого надійнісного аналізу складних технічних систем і виробників відповідного програмного забезпечення є фірма ReliaSoft (США) (http://www.reliasoft.com). ReliaSoft розробила ряд програмних засобів, які об'єднано у **Relex Reliability Studio 2007**:

– **Xfmea Standard, RCM ++, MPC 3** – засоби для аналізу ризику для користувачів, пов'язаного з відмовами технічних засобів (FMEA – технологія забезпечення якості);

– **RENO** – засоби для комплексного надійнісного аналізу з можливістю врахування особливостей стратегій технічного обслуговування;

– **Weibull++** – для надійнісного аналізу життєвого циклу виробів при різних законах розподілу;

– **ALTA 6 PRO** – засоби для проведення пришвидшених випробувань надійності;

– **BlockSim 6** – засоби для оцінки надійності по структурних схемах надійності;

– **RGA 6** – засоби для оцінки надійності систем, для яких передбачено ремонт.

Відомим є програмний засіб **CSIM** для автоматизованої побудови імітаційних моделей складних систем. Він призначений для моделювання поведінки складних систем.

Фірма The Telelogic Systems and Software Modeling Business Unit – розробляє програмні засоби автоматизації для розробки складних систем, а саме:

– **Statemate** – комплекс засобів які поєднують графічну побудову моделей, імітаційне моделювання, засоби для генерування коду програм та документації та засоби для тестування. Використовується для розробки

систем в аерокосмічній та оборонній областях;

– **Rhapsody** – засіб моделювання, призначений для створення графічних моделей систем, у відповідності до яких автоматично будується імітаційна модель. Засіб базується на технологіях UML, SysML, DoDAF. Призначений для аналізу вбудованих систем (на основі однокристальних ЕОМ);

– **Telelogic TAU** – засоби візуального моделювання на основі технологій UML (Unified Modeling Language) 2.0, SysML (Systems Modeling Language), SDL (Specification and Description Language), TTCN-2 та TTCN-3, DoDAF.

Система моделювання **Möbius** – призначена для створення моделей поведінки складних систем. Система розроблялась, як засіб аналізу надійності та живучості комп'ютерних систем і мереж. На даний час система придатна для моделювання: інформаційних систем та мереж; систем безпровідного і традиційного зв'язку (аналіз апаратного і програмного забезпечення); космічних та авіаційних систем; комерційних та урядових систем захисту інформації; біологічних систем. Система дозволяє отримати кількісні показники надійності, живучості, безпеки та функціональні показники. В системі використано математичний апарат: ланцюги Маркова, мережі Петрі та мова алгебр стохастичних процесів. Процес моделювання полягає у створенні компонентів системи на основі аналізу її поведінки з подальшим об'єднанням їх в модель системи.

Інші відомі програмні засоби описані в дають можливість моделювати роботу телекомунікаційної мережі. Наприклад, програма COMNET III моделює мережі ATM, Frame Relay, зв'язок LAN-WAN, SNA, та деякі інші. Програми NetCracker та NetMaker XA мають великі бібліотеки з наборами компонентів. В цих програмних засобах передбачена можливість для створення і своїх компонент мережі.

Програмне забезпечення – інформаційні джерела:

1. Relex Reliability Studio 2007 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.relex.se/
2. Програмний засіб CSIM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://portal.acm.org/citation.cfm?id=318197
3. Програмні засоби автоматизації для розробки складних систем SSMBUCSIM [Електронний ресурс]. – Режим доступу:http://www.ilogix.com/sublevel.aspx?id=685&parent=32
4. Система моделювання Möbius [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.mobius.uiuc.edu/
5. Програмний засіб COMNET III [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.citforum.ru/nets/optimize/locnop_09.shtml
6. Програмні засоби NetCracker та NetMaker XA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.students.cs.dountu.edu.ua/vt97/g/richka/st1.htm