

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**Волочій Сергій Богданович**



УДК 004.052+004.94

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

*01.05.03 – математичне та програмне забезпечення  
обчислювальних машин і систем*

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2018

## **Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Федасюк Дмитро Васильович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
проректор, професор кафедри програмного забезпечення.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Харченко В'ячеслав Сергійович,**  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж

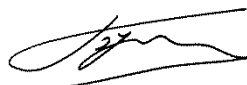
доктор технічних наук, професор  
**Дивак Микола Петрович,**  
Тернопільський національний економічний університет,  
декан факультету комп'ютерних інформаційних  
технологій

Захист дисертації відбудеться 17 травня 2018 року о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий 16 квітня 2018 року

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, д.т.н., професор



Р.А. Бунь

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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 проєктанту в розробленні дискретно-неперервних стохастичних моделей складних технічних систем та розв'язанні задач надійнісного проєктування, 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 проєктанта. Це стосується в першу чергу задачі формалізованого представлення об'єкта дослідження, яким може бути граф станів і переходів. Проєктант 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 ці затрати зростають в залежності від кількості варіантів реалізації об'єкта дослідження. Крім цього ручне розроблення графа породжує високу ймовірність внесення помилок, які спотворюють результат надійнісного проєктування. Тому поширення отримав підхід, який передбачає укрупнення станів об'єкта дослідження.

Другою проблемою існуючих програмних засобів є необхідність для проєктанта 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, яке 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 уможливають 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 проєктанта, 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, переми-

кання 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 були поставлені 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 перемикавання, 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 системно-технічного 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 диференціальних 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 сформулювати 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 продовжен-

ня 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 під час 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); 9<sup>th</sup> 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: III-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 п'яти додатків. Загальний обсяг роботи складає 199 сторінок, з них 124 сторінка основного тексту, 23 рисунки та 24 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** проведено обґрунтування актуальності тематики дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, представлено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Також наведено дані про публікації здобувача та апробацію результатів дисертації, показано структуру та обсяг роботи.

У першому розділі «**Аналіз стану математичного та програмного забезпечення автоматизованої побудови аналітичних дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів**» – проведено аналіз сучасного стану методів, моделей та програмних засобів для розв'язання завдань синтезу алгоритмів функціональної та надійнісної поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів (ПТК), який підтверджує *актуальність досліджень у напрямку* удосконалення існуючого математичного забезпечення і відповідних програмних засобів.

Звернуто увагу на той факт, що використання системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена накладає відоме обмеження на адекватність моделі: проєктант має прийняти умову, що тривалість перебування у всіх станах графа є випадковою величиною з експоненційним законом розподілу. Це означає, що тривалість всіх процедур у відмовостійких ПТК є випадковими величинами з експоненційним законом розподілу. Однак у практиці проєктування реальних комплексів 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 перебування в усіх станах, є низькою.

У багатьох публікаціях з надійнісного проєктування технічних систем показані експериментально отримані характеристики, які дають змогу оцінити різницю між експоненційним і реальними законами розподілу для тривалості їх безвідмовної роботи. Наприклад, це монографії: E.J.Henley, H.Kumamoto; K.Rajshke, I.A.Ushakova. Порівняння наведених у них законів розподілу дає підстави піддати сумніву достовірність показників надійності технічних систем, які визначаються за допомогою моделей марковського типу.

Необхідність досліджень у напрямку підвищення ступеня адекватності моделей відмовостійких систем визначає Державний стандарт України ДСТУ 2862 – 94 «Методи розрахунку показників надійності», в якому зазначено, що експоненційний розподіл, як однопараметрична функція, є грубою моделлю для опису розподілу тривалостей безвідмовної роботи систем і дає значні методичні похибки при прогнозуванні значень показників надійності.



Підхід до вирішення проблеми підвищення ступеня адекватності моделей з використанням закону розподілу Ерланга показали D.R. Koks, V.L. Smit; L. Klejnrok; D. Kjonig, D. Shtojan; K. Rajnshke, I.A. Ushakov, відповідно до якого 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 ПТК 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 фіктивних станів. Цей метод також називають метод фаз Ерланга або метод стадій.

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

Велика трудомісткість використання методу фаз Ерланга для трансформації графа станів великої розмірності і висока ймовірність внесення в нього помилок стримує його практичне використання у процесі розв'язання проектних задач, зокрема задач аналізу та синтезу. Тому важливим є створення методики розроблення графа станів з високим ступенем формалізації за рахунок використання методу фаз Ерланга, яка має бути придатною для її автоматизації.

У другому розділі **«Математичне забезпечення для автоматизації процесу розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів»** – подано метод розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких ПТК з урахуванням альтернативних продовжень випадкових процесів після закінчення процедур контролю, діагностики, перемикання і відновлення, який забезпечує безпомилкову їх побудову і в якому трудомісткі процедури піддаються автоматизації. Новизна методу розроблення САМ полягає в формалізації процедури визначення її компонент, а участь інтелекту перенесено на розроблення опорного графа станів і переходів. Компонентами САМ, які підлягають визначенню, 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 компонується для кожної ситуації); правила модифікації компонент вектора стану (ПМКВС) (правила формуються для кожної ситуації). Останнім етапом розроблення САМ є її валідація.

На першому етапі розроблення САМ, для побудови опорного графа станів розробник моделі визначає базові події алгоритму поведінки відмовостійкого ПТК і задає компоненти вектора стану та їх початкові значення. Компоненту САМ «базова подія» називаємо подію, яка ініціює зміну стану відмовостійкої системи. Кількість компонент вектора визначає ступінь адекватності моделі. Початкові значення компонент вектора стану представляють перший стан графа. Для першого 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 стани

графу. Перш ніж присвоювати сформованим станам нові порядкові номери треба перевірити, чи отримані стани не повторюють попередні стани, які вже мають порядкові номери. Станам, які повторюють попередні стани присвоюються їх номери. Станам, які не повторюють попередні стани присвоюються наступні чергові порядкові номери. Після встановлення порядкових номерів сформованим станам, фіксуються переходи між першим і сформованими станам. Для кожного переходу komponується формула для визначення інтенсивності переходу.

Описана вище послідовність дій виконується для другого і всіх наступних станів. У результаті будуть отримані всі стани графу, а також переходи між станами та формули для визначення інтенсивностей цих переходів. Запропонований метод побудови опорного графу станів і переходів покладено в основу методики, на основі якої розроблено алгоритм програми і програмний модуль для комп'ютерної підтримки процесу побудови опорного графу станів.

На другому етапі розроблення САМ формується формалізований опис кожної ситуації, в якій може відбуватися базова подія. Для виявлення цих ситуацій використовується опорний граф станів, який представлено спеціальною таблицею. Згідно запропонованих процедур з таблиці вибираються всі стани, що утворюються після першої базової події 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 перша базова подія. Визначення ПМКВС здійснюється на основі порівняння компонент вектора поточного і попереднього станів. Формули розрахунку інтенсивностей переходів із стану в стан переносяться з опорного графу станів.

Описані вище дії виконуються для всіх наступних базових подій. Слід зауважити, що після отримання всіх компонент САМ, для компактного її представлення необхідно виконати процедуру об'єднання формалізованих описів всіх ситуацій з однаковими ФРІП і ПМКВС. Визначені компоненти САМ заносимо в таблицю, форма якої відповідає формі діалогового вікна програмного засобу (див. табл. 1).

Алгоритм, що реалізує метод визначення компонент САМ на основі опорного графу станів і переходів представлено на рис. 1.

Таблиця 1 – Структурно-автоматна модель відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з врахуванням ефективності процедур контролю, перемикання і відновлення

БП	Опис ситуацій, в яких відбуваються базові події (БП)	ФРІП	ПМКВС
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 $(V4=1)$	$\lambda_o P_{uk}$	$V1:=0; V3:=V3+1$
		$\lambda_o(1 - P_{uk})$	$V1:=0; V4:=0$
4) $(V1=1)$ AND $(V2=0)$ AND $(V3=K_v)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_o$	$V1:=0; V4:=1$	
5) $(V1=1)$ AND $(V2=1)$ AND $(V3=K_v)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_o P_{uk} P_{up}$	$V2:=0; V4:=1$	
	$\lambda_o(1 - P_{uk} P_{up})$	$V1:=0; V4:=1$	
6) $(V1=1)$ AND $(V2=0)$ AND $(V3=K_v)$ AND $(V4=1)$	$\lambda_o$	$V1:=0; V4:=0$	
БП4	1) $(V1=1)$ AND $(V2=0)$ AND $(0 < V3 <= K_v)$ AND $(V4=2)$	$\mu P_{uv}$	$V2:=1$
		$\mu(1 - P_{uv})$	$V4:=1$
БП5	1) $(V1=1)$ AND $(V2=1)$ AND $(V3 < K_v)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_r P_{uk}$	$V2:=0; V3:=V3+1$
		$\lambda_r(1 - P_{uk})$	$V2:=0; V4:=1$
	2) $(V1=1)$ AND $(V2=1)$ AND $(V3=K_v)$ AND $(V4=2)$	$\lambda_r$	$V2:=0; V4:=1$

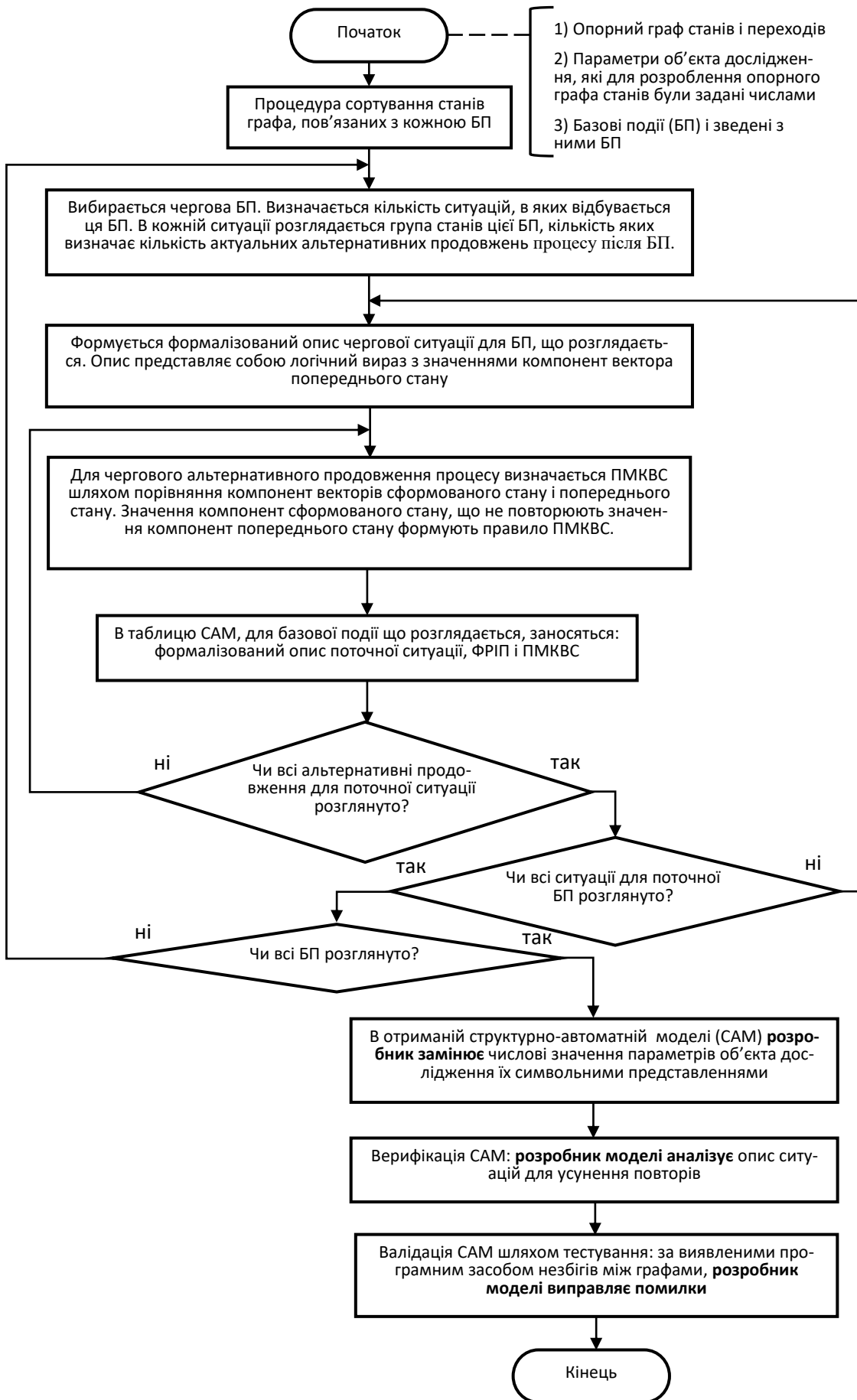


Рис. 1. Блок-схема алгоритму розроблення структурно-автоматної моделі на основі опорного графа станів і переходів

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.

Використання запропонованих методів показано на прикладі розроблення моделі відмовостійкої системи з однократним гарячим резервуванням програмно-апаратного модуля (ПАМ) з урахуванням показників ефективності засобів контролю, перемикавання та процедури відновлення і з обмеженою кількістю відновлень.

Розроблена САМ представлена в табл. 1, в якій показники надійності і ефективності складових відмовостійкої системи мають такі позначення: інтенсивності відмов основного  $\lambda_o$  і резервного  $\lambda_r$  ПАМ; ймовірність успішного виконання процедури контролю –  $P_{uk}$ ; тривалість процедури контролю –  $t_k$ ; ймовірність успішного виконання процедури перемикавання –  $P_{up}$ ; тривалість процедури перемикавання –  $t_p$ ; ймовірність успішного виконання процедури відновлення –  $P_{uv}$ ; кількість запланованих відновлень (замін) ПАМ –  $K_v$ ; середнє значення тривалості процедури відновлення ПАМ –  $t_v$ ; інтенсивність відновлень ПАМ –  $\mu = t_v^{-1}$ .

Визначення базових подій (БП) алгоритму поведінки відмовостійкої системи. Для відмовостійкої системи, що розглядається, БП подані в табл. 2. Зауважимо, що тривалості процедур контролю і перемикавання є значно меншими від тривалостей безвідмовної роботи ПАМ і від тривалості їх відновлення. Тому в моделі можна прийняти, що ці тривалості є рівними нулю, а базові події БП2 та БП3 будуть зведеними з БП1 і отримують таке позначення: ЗБП2 і ЗБП3.

Таблиця 2 – Події надійнісної поведінки відмовостійкої системи з однократним резервуванням

Пор. №	Подія – початок процедури	Подія – закінчення процедури	Сер. знач. тривалості
1	Початок роботи ПАМ (з моменту початку експлуатації або з моменту підключення після чергової відмови працюючого ПАМ)	БП 1: 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 перемикавання	БП3: Закінчення процедури перемикавання	$t_p$
4	Початок процедури відновлення несправного ПАМ	БП 4: Закінчення процедури відновлення несправного ПАМ	$t_v$
5	Початок перебування ПАМ в резерві	БП 5: Відмова ПАМ під час перебування в резерві	$1/\lambda_r$

Обґрунтування компонент вектора, який має представляти стан відмовостійкої системи. Компоненти  $V_1$  і  $V_2$  представляють стан основного і резервного ПАМ. Компонента  $V_3$  представляє поточне значення кількості використаних відновлень ПАМ. Компонента  $V_4$  представляє поточне значення кількості ПАМ у відмовостійкій конфігурації, яка враховує вилучення непридатного для подальшої експлуатації ПАМ.

У 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, перемикавання і відновлення:  $P_{uk} = 1$ ,  $P_{up} = 1$ ,  $P_{uv} = 1$ . Далі показано порівняння показників надійності відмовостійкої системи отриманих з використанням її надійнісної моделі (надалі "модель 3"), ступінь адекватності якої піднято за допомогою запропонованої методики, з показниками, які отримують розробники (проектанти) за допомогою відомих спрощених моделей. На весь час експлуатації (20000 годин) заплановано 20 відновлень. Для моделі 3 ймовірності успішного контролю, перемикавання і відновлення задані однаковими значеннями: 0,9; 0,99; 0,999. Результати розрахунків представлено в табл. 3 та на рис. 2а. В табл. 3 наведено значення ймовірності безвідмовної роботи на інтервалі експлуатації до 20000 годин  $P_{б,р}(20000)$  і середнє значення тривалості безвідмовної роботи  $T_{б,р}$ .

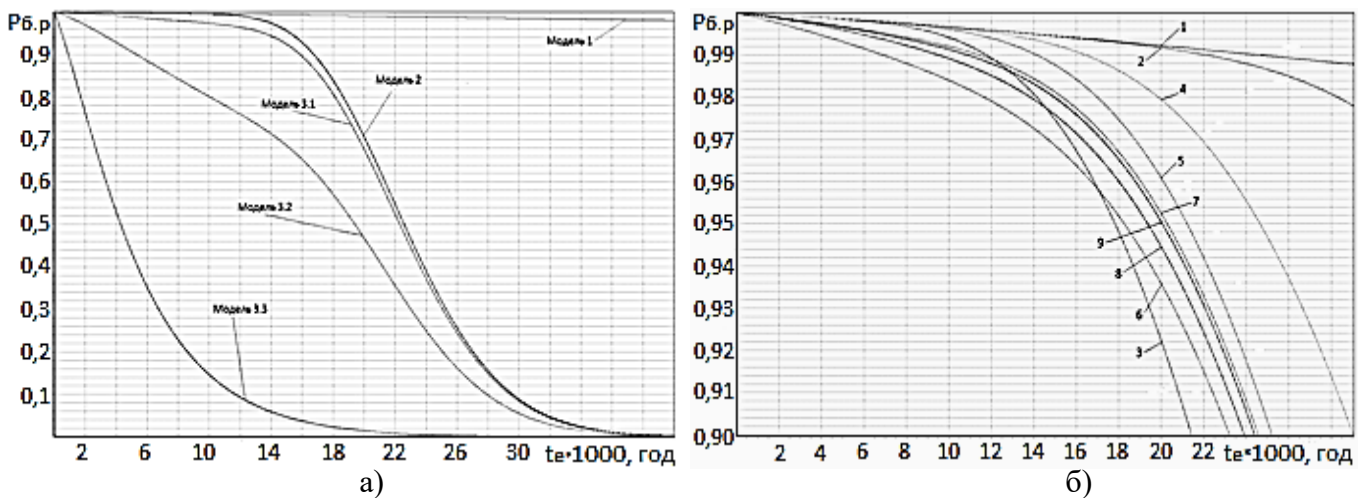


Рис. 2. Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з відновленням від тривалості її експлуатації: (а) – отриманих за допомогою трьох моделей з різним ступенем адекватності; (б) – отриманих у процесі розв'язання задачі надійнісного синтезу

Таблиця 3 – 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
$\lambda_o$ , 1/год	5e-4	5e-4	5e-4		
$\lambda_r$ , 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
<b><math>P_{б,р}(20000)</math></b>	<b>0,9905</b>	<b>0,7055</b>	<b>0,677</b>	<b>0,4675</b>	<b>0,0143</b>
<b><math>T_{б,р}</math>, год</b>	<b>197424</b>	<b>22895</b>	<b>22340</b>	<b>18122</b>	<b>5494</b>

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

На основі розробленої моделі реалізовано методику 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  $P_{б,р}(t_e) = 0,95$  при тривалості її експлуатації  $t_e = 20000$  годин. Задача надійнісного синтезу передбачає визначення мінімальних вимог до показників надійності ПАМ і до показників ефективності процедур контролю, перемикавання і відновлення. При розв'язанні такої задачі значення частини показників можуть бути обумовленими. Якщо ПАМ купуються в готовому вигляді, то значення інтенсивності їх відмов не підлягає зміні (наприклад,  $\lambda_o = 1e-4$  1/год). Також обумовленим є максимальне значення тривалості процедури відновлення (наприклад, 1 год).

Обчисленню підлягають значення показників ефективності процедур контролю, перемикавання і відновлення та кількість запланованих відновлень. Вирішення задачі синтезу відмовостійкої системи ілюструє рис. 2б. Цифри відповідають номеру кроку в послідовності визначення заданого значення ймовірності безвідмовної роботи  $P_{б,р}(20000) = 0,95$ . Значення показників ефективності процедур контролю, перемикавання і відновлення мають бути такими:  $P_{ук} = 0,996$ ,  $P_{ур} = 0,999$ ,  $P_{ув} = 0,998$ . А кількість запланованих відновлень  $K_V = 6$ .

У третьому розділі **«Методика модифікації структурно-автоматних моделей для автоматизації використання методу фаз Ерланга при розробленні дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів з неекспоненційним розподілом тривалостей процедур»** – 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 якій 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 у моделі треба представляти 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.

В об'єкті дослідження може бути кілька різних процедур, тривалість яких у 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. Метод модифікації компонент САМ для використання методу фаз Ерланга передбачає виконання таких завдань:

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

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

3) Визначаються компоненти САМ, які мають бути змінені.

4) Вносяться зміни в компоненти САМ. Кожний логічний вираз опису ситуацій, в яких відбувається базова подія, «розпізнає» актуальні для базової події стани. Ці

стани в подальшому стануть першими фіктивними станами ланцюжків. Логічний вираз замінюємо трьома логічними виразами А, Б, В, які представляють опис трьох нових ситуацій 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 формування наступних (крім останнього) фіктивних переходів ланцюжка. Третій логічний вираз В ініціює 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 ( $V_d = 0$ ). Формулу розрахунку інтенсивності переходів, щоб вона відповідала ситуації А, необхідно модифікувати включенням в неї співмножника  $K_e$ . Така модифікація ФРІП забезпечує незмінність середнього значення тривалості процедури при зміні порядку закону розподілу Ерланга  $K_e$ . Для ситуації А, до існуючих ПМКВС треба додати ще одне правило, а саме  $V_d := 1$ .

Щоб другий логічний вираз представляв ситуацію Б, вносимо в нього складову, яка визначає межі розпізнавання значень компоненти  $V_d$ , а саме ( $0 < V_d < (K_e - 1)$ ). Формула розрахунку інтенсивності переходів формується аналогічно як і для ситуації А. Для ситуації Б ПМКВС має мати такий вигляд  $V_d := V_d + 1$ .

Щоб третій логічний вираз представляв ситуацію В, вносимо в нього складову ( $V_d = (K_e - 1)$ ). Формула розрахунку інтенсивності переходів формується аналогічно як і для ситуації А. До ПМКВС для ситуації 1 необхідно додати правило  $V_d := 0$ . 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 САМ для автоматизації використання методу фаз Ерланга в процесі формування графа станів і переходів великої розмірності. В створеній методиці розроблення САМ відмовостійких систем для автоматизації використання методу фаз Ерланга фактично здійснюється модифікація САМ, розробленої за методикою представленою в розд. 2. Методика представлена на прикладі, де об'єктом моделювання є відмовостійка система з мажоритарною структурою {2 із 3}.

За допомогою САМ відмовостійкої системи для кількості відновлень  $K_v = 5$  сформовано модель відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {2 із 3} у вигляді графа станів і переходів, у якої всі тривалості процедур представлено експоненційним законом розподілу ймовірності (рис. 3). У 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 ( $T_v = \text{const}$ ). Відмова ПАМ в станах S2, S4, S6, S8, S10,





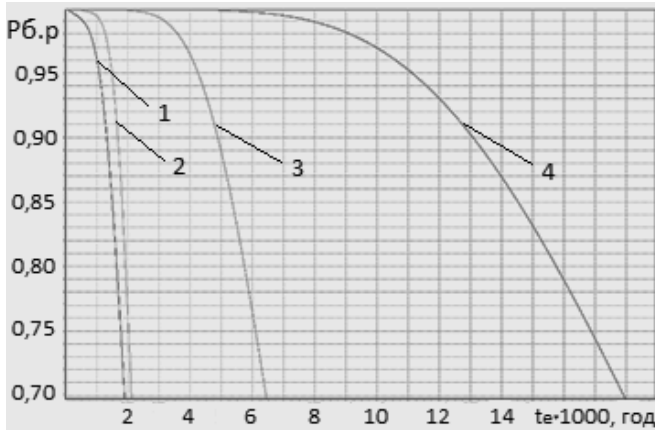


Рис. 5. Залежності ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {2 із 3} від тривалості її експлуатації

Ці залежності показують тривалості експлуатації відмовостійкої системи, коли її ймовірність безвідмовної роботи перевищує задане значення. Зокрема, в табл. 4 показано значення тривалостей експлуатації, коли ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи перевищує 0,96, а тривалість всіх процедур моделюється законом розподілу Ерланга різних порядків. Залежності на рис. 5 і в табл. 4, показують велику різницю між значеннями показників надійності, обчислених при використанні для тривалостей процедур відмовостійкого ПТК експоненційного закону розподілу і закону розподілу Ерланга. Ці результати підтверджують, що задача переведення розрахунків показників надійності на використання закону розподілу Ерланга для моделювання тривалостей процедур є важливою для надійнісного проектування відмовостійких систем.

Таблиця 4 – Значення інтервалів часу, коли ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи перевищує 0,96, а тривалість всіх процедур моделюється законом розподілу Ерланга різних порядків

Порядок закону розподілу Ерланга для тривалостей всіх процедур відмовостійкої системи	1	2	5	7
Інтервали часу [год], для яких ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи $P_{б.р} > 0,96$	1000	1425	4080	10700

У четвертому розділі «**Розроблення програмного засобу для комп'ютерної підтримки технології розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів**» – 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 [5, 13, 15];

– методики надійнісного синтезу бортової навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарату [9, 14];

– методики оцінки ризику експлуатації критичних ПТК [7, 10].

Автоматизоване розроблення САМ та високий ступінь адекватності дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких ПТК, за рахунок врахування реальних законів розподілу для тривалостей процедур і інтервалів часу між сусідніми подіями в потоках подій та ймовірностей альтернативного продовження процесів, зробило можливим підняти коректність і достовірність результатів розв'язання задач синтезу алгоритмів функціональної і надійнісної поведінки та синтезу показників ефективності і надійності їх складових.

## ВИСНОВКИ

У 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 у 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 надійної 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових фахових виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз*

1. Федасюк, Д. В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей дискретно-неперервних стохастичних систем / 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 / 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. Волочій, С. Б. Синтез показників ефективності складових комплексу охоронної сигналізації на сейсмічних датчиках / 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)

*Стаття у науковому фаховому виданні України*

4. 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» : «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – Львів : вид-во Львівської політехніки. – 2017. – № 864. – С. 49-62.

*Стаття в науковому періодичному виданні іншої держави*

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, Is. 2. – P. 1-10.

*Статті у збірниках праць міжнародних конференцій, які включено до міжнародних наукометричних баз*

6. Fedasyuk, D. Method of developing the behavior models in form of states diagram for complex information systems / 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 source] / Bohdan Volochiy, Leonid Ozirkovskyi, Oleksandr Mulyak, Sergiy Volochiy // Proceedings of the Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management SMRLO 2016. – 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 / Dmytro Fedasyuk, 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. Ozirkovsky, L. The automation of the exploitation risks assessment of the navigation information system of air drones / L. Ozirkovsky, Yu. Pashchuk, A. Mashchak, S. Volochiy // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XIII International Conference TCSET'2016, February 23 – 26, 2016. – 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 Chohey // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: Proceedings of the 9<sup>th</sup> IEEE International Conference, 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania. – P. 1098-1101. (SCOPUS).

*Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій*

12. Яковина, В. С. Програмний модуль для розробки моделей поведінки складних технічних систем / В. С. Яковина, С. Б. Волочій // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті (СІТЕМ-2012) : Матеріали III-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 / 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 / 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.

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} / 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.

## АНОТАЦІЯ

**Волочій С. Б. Математичне та програмне забезпечення для розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

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

Розроблене математичне забезпечення включає в себе: метод визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів та переходів, метод побудови опорного графа станів та переходів на основі базових подій, метод валідації структурно-автоматних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів, метод модифікації структурно-автоматних моделей для використання методу фаз Ерланга. Ці методи покладені в основу методик реалізації окремих етапів розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів. На основі цих методик розроблено алгоритми роботи програмних модулів «Побудова опорного графа станів на основі базових подій», «Визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів», «Валідація структурно-автоматних моделей».

*Ключові слова:* відмовостійка система, надійнісне проектування, дискретно-неперервна стохастична модель, метод фаз Ерланга, структурно-автоматна модель.

## АННОТАЦИЯ

**Волочий С. Б. Математическое и программное обеспечение для разработки дискретно-непрерывных стохастических моделей поведения отказоустойчивых программно-технических комплексов.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.03 – математическое и программное обеспечение вычислительных машин и систем. – Национальный университет «Львовська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2018.

В диссертационной работе решено актуальное научное задание разработки математического и программного обеспечения для автоматизации процесса создания дискретно-непрерывных стохастических моделей поведения отказоустойчивых программно-технических комплексов в виде графа состояний и переходов. В основу математического обеспечения положено структурно-автоматную модель.

Разработанное математическое обеспечение включает в себя: метод определения компонент структурно-автоматных моделей на основе опорного графа состоя-

ний и переходов, метод построения опорного графа состояний и переходов на основе базовых событий, метод валидации структурно-автоматных моделей поведения отказоустойчивых программно-технических комплексов, метод модификации структурно-автоматных моделей для использования метода фаз Эрланга. Эти методы положены в основу методик реализации отдельных этапов разработки дискретно-непрерывных стохастических моделей поведения отказоустойчивых программно-технических комплексов. На основе этих методик разработаны алгоритмы работы программных модулей «Построение опорного графа состояний на основе базовых событий», «Определение компонент структурно-автоматных моделей на основе опорного графа состояний», «Валидация структурно-автоматных моделей».

*Ключевые слова:* отказоустойчивая система, надежность проектирование, дискретно-непрерывная стохастическая модель, метод фаз Эрланга, структурно-автоматная модель.

## ANNOTATION

**Volochiy S. B. Software and mathematical support for the development of discrete-continuous stochastic models of behavior of fault-tolerant hardware-software complexes.** – On the right of manuscript.

Thesis for Ph.D degree on technical sciences in specialty 01.05.03 – «Mathematical and software support of computer machines and systems». – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

In the practice of system engineering design of hardware-software systems, it is necessary to develop discrete-continuous stochastic models of statistical representation of their behavior. The development of such models is based on the space-state method, the main difficulty of which lies in the development of a state graph.

This approach has two limitations. First – an engineer needs to develop the states diagram for each variant of system's configuration in a limited timeframe (40-80 hours). For systems with thousands of states, this is an impossible problem to solve manually. Second limitation – Chapman–Kolmogorov differential equations are developed from states diagram with an assumption that duration of all procedures, and time interval between events are random values with the exponential distribution law. In practice, such assumption is not valid and it decreases the reliability of modeling results.

There is a known approach, based on so-called “structural-automaton models”, which allows to automate the states diagram development. Therefore, it allows to remove these limitations.

This dissertation presents a solution for an actual scientific problem of the development of the software and the mathematical support for automating the process of development of structural-automaton models of fault-tolerant hardware-software systems behavior. Presented solution includes the method of automated development of structural-automaton models from sample states diagram, method of automatized development of sample states diagram by basic events, method of structural-automaton model validation, and method of usage of Erlang phase method inside the structural-automaton model. Listed methods are the basis of developed software tool prototype for the development of states diagrams of behavior of fault-tolerant hardware-software systems.

*Keywords:* fault-tolerant system, reliability engineering, discrete-continuous stochastic system, Erlang phase method, structural-automaton model.

Підписано до друку 12. 04. 2018 р.  
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.  
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Обл.-видав. арк. 0,89.  
Тираж 100 прим. Зам. 180542

Поліграфічний центр  
Видавництва Національного університету «Львівська політехніка»  
вул. Ф. Колесси, 4, 79013, Львів  
*Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.*