

Вченому секретареві
Спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05
у Національному університеті
«Львівська політехніка» проф. Буню Р.А.

79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Волочія Сергія Богдановича
«Математичне та програмне забезпечення для дискретно-
неперервного стохастичного моделювання відмовостійких
програмно-технічних комплексів», представленої на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
01.05.03 – математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин та систем

1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами

1.1. Проектуванню програмно-технічних комплексів, перед усім, критичних з точки зору надійності та безпеки систем (так званих систем, важливих для безпеки (СВБ)), має передувати складання специфікації та обґрунтування вимог до значень показників функціональності, продуктивності, безвідмовності, готовності тощо. Визначення показників надійності здійснюється за допомогою різноманітних математичних моделей, зокрема, дискретно-неперервних стохастичних, які мають бути розробленими для конкурентних варіантів побудови програмно-технічних комплексів. Існують ризики, обумовлені, по-перше, термінами розроблення таких моделей, зважаючи на складність систем, кількість станів яких визначається сотнями і тисячами, і тому можуть бути критичними в умовах обмежень часу підготовки тендерних пропозицій, обґрунтування оцінок при виборі варіантів, експертизі та взаємодії із замовником, тощо. По-друге, йдеться про ризики недостатньої адекватності та точності моделей, а отже, показників надійності та її складових. Останній чинник є особливо чутливим для СВБ, а саме, систем аварійного захисту реакторів, бортових систем літаків та космічних апаратів, залізничних систем централізації та блокування, де помилки завищення оцінювання надійності та функціональної безпеки збільшують ризики аварій і є неприпустимими, а помилки заниження – призводять до надмірних витрат.

Такі інтегральні ризики є суттєвими, не зважаючи на наявність розвинутого математичного апарату і великої кількості засобів комп'ютерної математики (інструментальних засобів оцінювання).

1.2. Існує методологія побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки складних технічних систем, в основу якої покладено метод простору станів. Суть її в тому, що на основі вербальної моделі технічного

рішення необхідно здійснити розроблення моделі у вигляді графа станів і переходів. Відтак за розробленим графом станів, згідно встановлених правил, формується система лінійних диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена (СДРКЧ). Отримана система диференціальних рівнянь представляє дискретно-неперервну стохастичну модель поведінки марковського типу. Для складних технічних систем такий граф, як вже зазначалося, може мати сотні і тисячі станів, зумовлених великою кількістю компонент, різними типами і комбінаціями відмов, обумовлених фізичними та проектними (програмними) дефектами, варіантами відновлень, тощо. Відомі методи побудови таких графів не є формалізованими (і поки що принципово не можуть бути повністю автоматизованими), потребують багато часу і є високою ймовірністю внесення проєктантом помилок як внаслідок недостатнього розуміння особливостей функціональної та надійнісної поведінки, так і внаслідок «механічних» помилок.

Задача побудови графа станів стає ще складнішою, коли треба створити дискретно-неперервну стохастичну модель немарковського типу. Одним із методів побудови таких моделей є метод фаз Ерланга. Для його використання треба визначати стани, які замінюють групами фіктивних станів.

Існує також проблема точності інструментальних засобів оцінювання СВБ з використанням марковських і напівмарковських моделей внаслідок високої жорсткості СДРКЧ, особливостей різних чисельних процедур і накопичення помилок інтегрування при застосування різних методів.

1.3. В основу дисертації покладено відомий метод побудови графа станів на основі структурно-автоматної моделі поведінки систем. Цей метод дав змогу автоматизувати процес побудови графів станів для багатьох варіантів їх реалізації. Хоча працездатність для побудови багатьох варіантів графа станів суттєво зменшилася, однак складним для інженерів-надійнісників залишився процес розроблення структурно-автоматної моделі.

Означені обставини обумовлюють актуальність тематики досліджень дисертанта. Важливим з точки зору теорії і практики є наукове завдання створення математичного і програмного забезпечення для автоматизованого розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів для формування графів станів і переходів для подальшого оцінювання надійності з використанням марковських і напівмарковських моделей.

1.4. Дослідження виконувалися за замовленням Міністерства освіти і науки України на кафедрі програмного забезпечення Національного університету «Львівська політехніка» в рамках НДР за темами «Розроблення математичного забезпечення для програмного засобу аналізу функціональної

безпеки та надійності програмно-апаратних систем відповідального призначення», «Розроблення моделей, методів та алгоритмів для автоматизованої оцінки показників надійності радіоелектронних та електромеханічних пристроїв та систем» та інш.

2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

2.1. У вступі дисертант звертає увагу на те, що використання методу простору станів для розв'язання задач надійнісного проектування складних відмовостійких систем обмежує (стримує) складність побудови моделі у вигляді графа станів та переходів великої розмірності та низька точність значень показників надійності за рахунок вимушеного використання умови про експоненційний закон розподілу для тривалостей процедур та інтервалів часу між сусідніми подіями в потоках подій. Це надає можливість відповідним чином сформулювати мету, задачі досліджень, надати загальну характеристику дисертації.

У першому розділі дисертантом виконано ґрунтовний огляд науково-технічних інформаційних джерел, за темою дисертації в таких напрямках:

1) 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;

2) побудова надійнісних і функціональних моделей, в яких враховується реальний або близький до нього закон розподілу ймовірностей для тривалостей процедур та інтервалів часу між сусідніми подіями в потоках подій.

Опираючись, як на базовий, на відомий метод розроблення графа станів, в основу якого покладено структурно-автоматну модель, здобувач провів пошук методу аналітичного моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем не марковського типу, який можна вкласти в структурно-автоматну модель відмовостійкої системи. З достатнім обґрунтуванням дисертант зупиняється на методі фаз Ерланга. Дається пояснення, чому метод фаз Ерланга на даний час не використовується в практиці розроблення надійнісних моделей відмовостійких систем, для яких граф станів має велику розмірність. Показано, що у всіх знайдених методах аналітичного моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем немарковського типу використовується «ручне» розроблення моделей, коли поведінку об'єкта дослідження можна представити невеликою кількістю станів.

В наукових публікаціях відслідковано тенденцію, яка вказує на необхідність розроблення такої технології моделювання, яка б дозволяла

проектанту відмовостійкої системи без спеціальної математичної підготовки і за час прийнятний для етапу системотехнічного проектування самостійно створювати надійнісні моделі для нових технічних рішень та вирішувати задачі надійнісного проектування. Розв'язання такого завдання стає можливим, коли ступінь формалізації технології моделювання дає змогу її автоматизувати.

На основі викладених в першому розділі результатів проведеного аналізу наукових публікацій для розв'язання задачі автоматизації побудови аналітичних дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких систем сформульовано напрями досліджень:

а) пошук підходу і розроблення математичного забезпечення для реалізації комп'ютерної підтримки процесу розроблення структурно-автоматних моделей дискретно-неперервних стохастичних систем;

б) підвищення ступеня формалізації методу трансформації моделі дискретно-неперервної стохастичної системи у вигляді графа станів та переходів для формування необхідних законів розподілу ймовірності для тривалостей процедур, які відбуваються в об'єкті дослідження (моделювання);

в) удосконалення технології моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем, зокрема її складової – методики валідації структурно-автоматних моделей об'єктів дослідження;

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

Зауваження. Слід відзначити, що список джерел за останні три роки (2015 – 2017) обмежується у більшості публікаціями автора. Не проаналізовано публікації останнього десятиліття таких фахівців як K.S. Trivedi, (методи зменшення складності графів для марковських і напівмарковських процесів та застосування програмного засобу SHARPE), Одаруценка О.М. та інш. (багатофрагментні графи та методи вибору інструментальних засобів для оцінювання СБВ). Крім того, доцільно було б обґрунтувати показники, за якими можна оцінити ефективність запропонованих у дисертації методів.

2.2. У другому розділі дисертантом запропоновано математичне забезпечення для автоматизації процесу розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів, в склад якого входять відповідні методи і алгоритми. Для визначення компонент структурно-автоматних моделей запропоновано оригінальну процедуру, в основу якої покладено опорний граф станів. Це дає змогу здійснити розроблення алгоритму побудови структурно-автоматних моделей.

Важливими етапами є формування опорного графа станів і валідація (верифікація) моделі. Етапи виконуються розробником моделі і забезпечені алгоритмами і комп'ютерною підтримкою.

Перевірка правильності функціонування розробленого математичного та програмного забезпечення здійснена шляхом порівняння значень показників надійності відмовостійкої системи з однократним резервуванням і з обмеженим відновленням, отримані на трьох моделях різного ступеня адекватності. Найвищий ступінь адекватності має третя модель, розроблена з використанням запропонованих методів та методики і яка забезпечує можливість враховувати будь-які значення ймовірностей успішного контролю, перемикання, відновлення і кількості відновлень. Достовірність отриманих результатів (показників надійності), отриманих за допомогою розробленого математичного та програмного забезпечення, підтверджується збіганням тенденцій в змінюванні отриманих числових даних з якісним представленням цих змін.

Ще одна перевірка правильності функціонування математичного та програмного забезпечення здійснена на прикладі розв'язання двох варіантів задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи. Отримані результати надійнісного синтезу також підтверджують правильність функціонування розробленого математичного та програмного забезпечення.

Зауваження. Автор використовує велику кількість скорочень на кшталт, ФРІП, ПМКВС та інших, що ускладнює роботу з текстом і розуміння результатів (див. наприклад, правило 1, перше речення, стор 67). Приклади для оцінювання надійності (безвідмовності) надано дещо абстрактно. Не зрозуміло, для яких типів систем проводилося оцінювання і як визначалися діапазони зміни параметрів. Недостатньо детально пояснюється процедура валідації (скорше, верифікація, оскільки здійснюється покрокова перевірка).

2.3. У *третьому розділі* дисертантом запропоновано метод модифікації компонент структурно-автоматних моделей відмовостійких систем для використання методу фаз Ерланга.

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

В моделюванні відмовостійких систем автором обґрунтовано три варіанти доцільності використання методу фаз Ерланга:

а) якщо є відомим реальний закон розподілу для тривалостей процедури, то вирішується задача апроксимації їх законом розподілу Ерланга і отримуються параметри ланцюжка фіктивних станів (кількість фіктивних станів та інтенсивність переходів із стану в стан);

б) якщо реальний закон розподілу для тривалостей процедури невідомий, але є зрозумілою фізична суть (гіпотеза) потрібного закону розподілу. З цього витікає, що треба відмовитись від представлення випадкових величин

експоненційним законом розподілу. Наприклад, тривалості процедури відновлення (ремонт, заміна) апаратних засобів, тривалості процедури оновлення програмного забезпечення після виявлення дефекту в процесі експлуатації відмовостійкого програмно-апаратного модуля. В цьому випадку вибирається і застосовується закон розподілу Ерланга відповідного порядку, що підвищує достовірність показників ефективності чи надійності відмовостійкого програмно-апаратного модуля;

в) якщо закони розподілу для тривалостей всіх процедур відмовостійкого програмно-технічного комплексу є невідомими, і тому в його моделі для них використовується експоненційний закон розподілу, то проєктант отримує граничне значення показника ефективності чи надійності. 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.

Можливості запропонованої методики показано на прикладі дослідження впливу порядку закону розподілу Ерланга для тривалостей відновлення відмовостійкого програмно-апаратного модуля з мажоритарною структурою {2 із 3} на значення показників її надійності.

Зауваження. Здається, є певна неузгодженість у застосуванні термінів «метод» і «методика». Підрозділ 3.1 має назву «Метод...», а п. 3.2, 3.3 – «Методика...», які надають приклади побудови-модифікації структурно-автоматних моделей для різних варіантів. Тобто «методики» уточнюють метод (?).

2.4. В четвертому розділі описано як в розробленому програмному засобі реалізовано процес побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів. Дано обґрунтування та опис технологій, обраних для реалізації програмного засобу. Представлено користувацький інтерфейс та можливості розробленого програмного засобу.

Використання програмного засобу показано на прикладі розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей функціональної поведінки комплексу охоронної сигналізації.

Зауваження. Не зовсім зрозуміло, як запропонований програмний засіб вбудовується в процесі розроблення та оцінювання показників систем в цілому і верифікується. Крім того, потребує пояснення деякі словосполучення, зокрема, у назві п.4.4 «...моделей функціональної поведінки комплексу охоронної сигналізації, покладених в основу методики синтезу показників ефективності його складових». Що означає методика синтезу показників ефективності його складових? Якщо це є частиною прикладу використання програмного засобу для розроблення дискретно-неперервних стохастичних

моделей функціональної поведінки комплексу охоронної сигналізації?

2.5. В цілому наукові результати є належним чином обґрунтованими. Обґрунтованість забезпечується коректністю постановки задачі, використанням апробованих положень теорії моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем, використанням строгих математичних методів теорії надійності складних систем, теорії масового обслуговування та теорії марковських випадкових процесів.

3. Наукова новизна одержаних результатів

3.1. Підтверджую, що наукову новизну одержаних результатів дисертаційної роботи Волочія С.Б. складають:

1) новий метод визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів та переходів, у якому, на відміну від відомого, формалізовано 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 зменшити витрати часу на розроблення алгоритмів через багатоваріантний аналіз;

2) удосконалений 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 модифікується кожний логічний вираз опису ситуацій з базовою подією, яка завершує процедуру, тривалість якої необхідно представити законом Ерланга відповідного порядку, що дозволяє автоматизувати процес трансформації графа для дискретно-неперервних стохастичних моделей немарковського типу;

3) подальший розвиток методу побудови опорного графа станів та переходів на основі базових подій, в якому враховано ймовірності альтернативного продовження процесів після цих подій, що дозволяє підвищити ступінь адекватності дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів і відповідно достовірність показників надійності та ефективності;

4) подальший розвиток методу валідації структурно-автоматних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів, у якому, на відміну від відомого, виявлення і виправлення помилок здійснюється після кожного етапу звіряння тестового графа і графа, отриманого на основі структурно-автоматної моделі, що дозволяє прискорити локалізацію помилок і відповідно зменшити витрати часу на їх пошук і виправлення.

Формулювання наукової новизни збігається з авторським за деякими

змiнами редакцiйного характеру.

3.2. Науковi результати автора є вагомим внеском у розвиток методiв i засобiв для розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей та iх комп'ютерного забезпечення. Розроблене математичне i програмне забезпечення вiдкриває новi можливостi в дослiдженнi дискретно-неперервних стохастичних систем марковського i немарковського типiв.

4. Достовiрнiсть отриманих результатiв та висновкiв

Достовiрнiсть отриманих наукових результатiв пiдтверджується:

- використанням вiдомих часткових рiшень як тестових задач i достатньою апробацiєю та впровадженням результатiв дисертацiї;
- позитивними результатами використання методiв, методик та програмного засобу в розв'язаннях проектних завдань для реальних комплексiв;
- обгрунтованими рекомендацiями щодо практичного використання наукових положень при виконаннi НДР.

5. Практична цiннiсть одержаних результатiв та iх подальше використання

5.1. Запропонованi методи та вiдповiднi їм методики дали змогу розробити алгоритми i програмний засiб для автоматизацiї процесу розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведiнки. Програмний засiб допомагає здiйснити: розроблення опорного графа станiв; розроблення структурно-автоматної моделi, яке включає її валiдацiю та модифiкацiю її компонент для використання закону розподiлу Ерланга; формування моделi у виглядi графа станiв та переходiв.

5.2. Акти впровадження результатiв пiдтверджують використання наукових положень, висновкiв i рекомендацiй у держбюджетних науково-дослiдних роботах та навчальному процесi Нацiонального унiверситету «Львiвська полiтехнiка», а також у Науковому Центрi Сухопутних вiйськ Нацiональної академiї сухопутних вiйськ ім. гетьмана Петра Сагайдачного у науково-дослiдних роботах за шифрами «Бар'єр-СП», «Дрон-СВ» та «Сокiл».

5.3. Подальше використання результатiв дисертацiйних дослiджень доцiльно в унiверситетах, на кафедрах, якi займаються розробленням навчальних курсiв системотехнiчного проектування складних радiоелектронних i комп'ютерних систем, а також у НДІ i КБ, якi формують вимоги та розробляють вiдповiднi системи (НВО Радiй, НВО Хартрон, Авіаконтроль, НДІ РВ, тощо), а також спецiалiзуються на створеннi систем для безпiлотної авiацiї

загального і оборонного призначення.

5.4. Доцільним бачиться розроблене математичне та програмне забезпечення як складову програмної системи, призначеної для розв'язання задач системного аналізу та синтезу в таких наукових галузях: інфокомунікаційні мережі зв'язку, інформаційні технології, інформаційно-керуючі системи, економічні системи.

5.5. Запропоноване математичне і програмне забезпечення буде корисним для аспірантів спеціальностей 05.13.06 – інформаційні технології, 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи та ін., які будуть виконувати дослідження складних технічних систем.

6. Оформлення дисертації та автореферату. Повнота викладу результатів в опублікованих працях

6.1. Дисертаційну роботу викладено на 199 сторінках, з них 124 сторінки основного тексту, 27 рисунків та 21 таблиця. Автореферат і дисертація оформлені відповідно з новими, досить ускладненими у черговий раз, атестаційними вимогами.

6.2. Основні результати дисертації опубліковано у 15 публікаціях, із них: 1 – у іноземному періодичному виданні (Словаччина), яке є спеціалізованим фаховим виданням по проблемах надійності та безпечності експлуатації складних технічних систем; 4 – у фахових виданнях України; 6 – у збірниках праць міжнародних конференцій, які внесені в міжнародну наукометричну базу SCOPUS; 4 – у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій. В статтях відображено основні наукові результати, відсутні повторювання та, як і в дисертаційній роботі, не застосовано результати інших авторів без відповідних посилань. Основні положення дисертації обговорювалися на 12 міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях і семінарах. Дисертація в цілому пройшла апробацію на всеукраїнському семінарі КриКТехС-2018/3 (ХАІ, м. Харків). Це підтверджує достатній рівень апробації результатів роботи та визнання досягнень дисертанта провідними фахівцями галузі.

6.3. У дисертації та авторефераті основні положення, результати і висновки сформульовані коректно і зрозуміло. Текст дисертації логічно структурований. Графічний матеріал доповнює зміст роботи. Автореферат об'єктивно відображає основні результати дисертації. Автор в цілому коректно використовує наукову термінологію і термінологію, яка сформувалася у предметній області.

7. Зауваження до дисертаційної роботи

7.1. Більшість зауважень надано при аналізі змісту дисертації (пп.2.1-2.4).

Крім того, слід зазначити:

- мету і науково-прикладну задачу дисертації сформульовано так, що вони фактично збігаються. Задача, на наш погляд, може бути сформульована так, як надано у п.1.3 (формулювання відрізняється від авторського несуттєво). Щодо мети, то вона має чітко визначати кінцевий ефект від розроблення і впровадження результатів досліджень. Мета дисертаційних досліджень, на нашу думку, полягає у зменшенні часу розроблення марковських і напівмарковських моделей та ризиків неточного (недостовірною) оцінювання показників надійності відмовостійких програмно-технічних комплексів з їх використанням;

- відповідно до визначеної мети доцільно було б більш системно визначити якісні та кількісні показники та оцінити ефект, що досягається. Частково автор описує такий ефект у п.2.5, але не зовсім зрозуміло це ефект, пов'язаний з простим урахуванням, наприклад, безвідмовності засобів контролю..., чи з методом розробленням графу станів. Автор дещо захопився детальним розробленням методичного, математичного і технологічного (програмного) забезпечення і, дійсно, створив чудовий інструментарій, але треба було б на окремих прикладах-кейсах проілюструвати вимірюваний ефект та наслідки неточної оцінки. Це може бути одним з напрямів подальших досліджень, і, безумовно, підвищити його комерційну привабливість. Доцільно також зробити кроки з патентування відповідних методичних і програмних рішень.

7.2. Зауваження і недоліки не впливають на кінцеві висновки і можуть також розглядатися у контексті напрямів подальших розробок і досліджень.

8. Висновки

8.1. *Представлена дисертація є завершеною роботою, у якій отримано нові науково обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано науково-прикладну задачу створення математичного і програмного забезпечення для автоматизованого розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів для формування графів станів і переходів для подальшого оцінювання надійності комплексів з використанням марковських і напівмарковських моделей.*

8.2. *Одержані наукові та практичні результати є вагомим внеском у розвиток методів і засобів для розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей та відповідного програмного забезпечення і свідчать про високий професійний рівень дисертанта. Зміст роботи відповідає паспорту*

спеціальності 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем, а саме формулі «... методів, засобів і технологій створення ..., системи моделювання, ...» та пунктам: методи і засоби формальної верифікації, синтезу моделей і програмного забезпечення комп'ютерних систем та мереж; прикладні програмні системи; інструментальні програмні системи і методологія розробки спеціального програмного забезпечення.

8.3. Вважаю що дисертаційна робота «Математичне та програмне забезпечення для дискретно-неперервного стохастичного моделювання відмовостійких програмно-технічних комплексів» *цілком відповідає вимогам* пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», що пред'являються до кандидатських дисертацій, а її автор □ Волочій Сергій Богданович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем

Офіційний опонент – завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» заслужений винахідник України доктор технічних наук, професор В.С. Харченко
4 травня 2018 р.

Підпис Харченка Вячеслава Сергійовича засвідчую.
Проректор з НІР університету
доктор технічних наук, професор



В.Є. Зайцев