

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

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

### **Актуальність теми виконаних досліджень.**

На етапі системотехнічного проектування складних за структурою та поведінкою відмовостійких програмно-технічних комплексів необхідно мати «інструмент» для їх моделювання, який буде забезпечувати адекватність моделей і є простим в налаштуванні на не типові технічні рішення. За математичні моделі зазначених об'єктів часто обирають стохастичні дискретно-неперервні моделі. Проте, складність побудови цих моделей для відносно складних об'єктів робить їх недоступними для проєктантів. Тому автоматизація процесу побудови стохастичних дискретно-неперервних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів є актуальною.

Процес розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей має два етапи. На першому етапі розробляють модель у вигляді графа станів та переходів. На другому етапі формують модель у вигляді системи диференціальних рівнянь. У практиці системотехнічного проектування набув поширення підхід, в якому закладено припущення про експоненційний закон розподілу для тривалості усіх процедур і інтервалів між сусідніми подіями процесів. Такий підхід обумовлює складання за розробленим графом станів системи диференціальних рівнянь Колмогорова - Чепмена. Розв'язання таких систем, навіть великої розмірності, не є проблемою для сучасних комп'ютерних програм. Однак, достатньо трудомісткою та складною задачею є розроблення моделей у вигляді графа, коли кількість станів сягає кількох тисяч. Слід зауважити, що на етапі системотехнічного проектування відмовостійких систем потрібно розробити такі моделі для багатьох варіантів їх реалізації.

Починаючи з 80-х років минулого сторіччя науковці зосередили свої зусилля на автоматизації процесу розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей. Однак, розроблення графа станів залишалось «ручним» для кожного варіанту реалізації системи.

У середині 90-х років створено метод розроблення графа станів,

ступінь формалізації якого дав змогу автоматизувати його використання. Ключовим в цьому методі було оригінальне формалізоване представлення об'єкта дослідження у вигляді структурно-автоматної моделі. Цей метод, за певних умов, мав переваги над методом побудови графа станів в ручну, а саме:

1) структурно-автоматна модель мала властивість універсальності, яка полягала в тому, що коли досліджувані варіанти формувалися зміною параметрів структури і поведінки, побудова кожного нового графа станів будь-якої розмірності була автоматизованою;

2) нові технічні рішення, пов'язані з удосконаленням існуючого варіанту реалізації об'єкта дослідження, легко вводилися в структурно-автоматну модель, що зробило процес розв'язання задач системотехнічного проектування систем високопродуктивним.

У цьому методі основні зусилля проектанта перенесено з розроблення графа станів на розроблення структурно-автоматної моделі. Відповідно, адекватність та час розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей залежала від адекватності та часу створення структурно-автоматної моделі.

Саме на забезпеченні цих основних характеристик моделей та процесу їх створення зосереджено зусилля дисертанта. Суть їх полягає у створенні «інструментарію» у складі математичного забезпечення, в основу якого покладено структурно-автоматну модель, і відповідної прикладної програмної системи для підвищення рівня автоматизації процесу розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів та переходів.

Тому тема, мета та поставлені задачі дисертації Волочія С.Б., є без сумніву **актуальними**.

Актуальність задачі, важливість та перспективність отриманих результатів підтверджується також тим, що робота виконувалася відповідно до наукового напрямку кафедри програмного забезпечення НУ «Львівська політехніка» «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), в рамках наукового напрямку "Технології та засоби розробки програмних продуктів і систем", визначеного Кабінетом Міністрів України в переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеності.**

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків і за структурою та обсягом відповідає вимогам щодо кандидатських дисертацій з технічних наук.

*У вступі* обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, визначені мета і задачі дослідження, сформульовано об'єкт і предмет, а також методи дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надано інформацію про особистий внесок автора в роботи, виконані у співавторстві, наданий перелік публікацій та відомості про апробацію за темою роботи.

*У першому розділі* наведено огляд моделей надійності відмовостійких систем. Для більшості цих моделей є актуальною проблема адекватності, а для ряду задач системотехнічного проектування ці моделі взагалі відсутні.

У цьому розділі увагу акцентовано на технологічності процесу моделювання функціональної та надійнісної поведінки програмно-технічних комплексів. Для підтвердження необхідності удосконалювати технологію побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей, вказано на те, що в склад розповсюджених програмних комплексів для надійнісного проектування входить аналітичний модуль марковського аналізу. Однак для його використання проєктант має вводити вже розроблений граф станів або матрицю коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь. На основі розглянутих методик розроблення моделей поведінки у вигляді графа станів і переходів, обґрунтовано застосування для цих цілей структурно-автоматні моделі. Далі, окреслено можливості аналітичного моделювання поведінки програмно-технічних комплексів з представленням її дискретно-неперервними стохастичними системами як марковського так і немарковського типів, зокрема, з використанням методу фаз Ерланга. Розглядаючи тенденції розвитку засобів автоматизації системотехнічного проектування структур та алгоритмів поведінки програмно-технічних комплексів, перевага надається імітаційному моделюванню на основі створення прикладних програмних систем. У завершальній частині розділу зацентровано увагу на актуальності та задачах автоматизації побудови аналітичних дискретно-неперервних стохастичних моделей.

*У другому розділі* наведено розроблене математичне забезпечення для автоматизації процесу створення структурно-автоматних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів, в основу якого покладено дискретно-неперервну стохастичну систему марковського типу.

В склад математичного забезпечення входять: 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 трьох запропонованих методах. Це метод визначення компонент структурно-автоматної моделі на основі опорного графа станів та переходів, метод побудови опорного графа станів на основі базових подій та компонент вектора стану, метод валідації структурно-автоматної моделі. Ці методи відображені в трьох пунктах наукової новизни дисертації.

Оригінальність нової методики розроблення структурно-автоматної моделі полягає в тому, що інтелектуальні зусилля проектанта прикладаються не на формування її компонент, як це було в попередній версії методики, а перенесені на розроблення опорного графа станів. Своєю чергою, запропонований метод розроблення опорного графа станів зменшує інтелектуальне навантаження на проектанта, так як його увага концентрується на покроковому визначенню нових станів і переходів. При цьому проектант отримує вказівки про стан, що розглядається, про актуальні для цього стану базові події, про компоненти вектора стану, які мають змінюватися, про переходи зі стану в стан та відповідні формули для визначення інтенсивності переходів. Обґрунтовано передумови для автоматизованого виконання цих функцій програмним засобом. Відповідно, обґрунтований метод зменшує ймовірність внесення проектантом помилки в опорний граф станів. Нова методика забезпечує переведення формування компонент структурно-автоматної моделі в автоматизований режим. Запропонований метод валідації структурно-автоматної моделі забезпечує проектанту автоматичне виявлення компоненти з помилкою, що суттєвим чином зменшує кількість помилок в переходах між станами і відповідно зменшує витрати часу на їх виявлення і усунення.

*У третьому розділі* дисертант представив метод модифікації компонент структурно-автоматних моделей відмовостійких систем для використання методу фаз Ерланга. Цей метод входить в перелік пунктів наукової новизни дисертації.

З використанням методу модифікації компонент структурно-автоматних моделей процедура введення в граф станів ланцюжків фіктивних станів стає автоматизованою. Спираючись на апробований математичний

апарат використання закону розподілу Ерланга, в дисертації створено засоби автоматизованого створення дискретно-неперервних стохастичних моделей немарковського типу. Для представлення в моделі певного закону розподілу використано декілька паралельних ланцюжків фіктивних станів. Запропонована та обґрунтована методика модифікації структурно-автоматної моделі дає можливість цей процес автоматизувати.

Ефективність запропонованого методу показана на прикладі визначення показників надійності відмовостійкої системи з мажоритарною структурою. Наведені результати показують суттєве зниження значень показників надійності, отриманих за допомогою моделі, в якій тривалості процедур представлені експоненціальним законом розподілу, в порівнянні із значеннями показників надійності, отриманими за допомогою моделі, в якій тривалості представлені законом розподілу Ерланга. Цей результат є дуже важливим для розв'язання задач надійнісного синтезу та надійнісної оптимізації відмовостійких систем.

*У четвертому розділі* представлено розроблений дисертантом програмний засіб для комп'ютерної підтримки технології розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей марковського і немарковського типів на основі структурно-автоматних моделей відмовостійких систем. У програмному засобі реалізовано запропоновані методи, методики та алгоритми. Практичне використання програмного засобу робить несуттєвою для проектанта складність побудови моделі у вигляді графа станів. Слід зазначити, що ряд рішень в розробленому програмному засобі мають наукову новину, яка на жаль не відзначена дисертантом. Зокрема, розроблений програмний засіб є органічним доповненням програмного засобу ASNA-2, який виконує функції: 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). Дисертанту доцільно було б відобразити нову архітектуру програмного комплексу, розкрити суть інтеграції модулів програмної системи, які оперують даними з різними форматами.

Об'єднання двох програмних засобів в один програмний комплекс доповнює (розширює) можливості програмного засобу ASNA-2, так як дає 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 експоненційного закону розподілу тривалостей процедур на закон розподілу Ерланга заданого порядку.

В цьому розділі також наведено приклад використання програмного комплексу для розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей реакції комплексу охоронної сигналізації на перетин рухомим об'єктом двох зон контролю.

*У додатках* наведено довідки про впровадження результатів дисертації та ряд проміжних результатів дослідження.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1) Запропоновано та обґрунтовано новий метод визначення компонент структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів та переходів, що дало змогу створити прикладну програмну систему для автоматизації процесу побудови дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів і цим самим, в подальшому зменшити витрати часу проєктанта на розроблення моделей для розв'язання задач синтезу алгоритмів поведінки цих комплексів через багатоваріантний аналіз.

2) Удосконалено метод модифікації структурно-автоматних моделей з використанням методу фаз Ерланга, у якому, на відміну від відомого, модифікується кожний логічний вираз опису ситуацій з базовими подіями, які завершують процедуру з тривалістю, представлену законом Ерланга відповідного порядку, що дозволило автоматизувати процес трансформації графа станів та переходів для дискретно-неперервних стохастичних моделей немарковського типу.

3) Набув подальшого розвитку 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 забезпечити адекватність дискретно-неперервних стохастичних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів і відповідно підвищити достовірність показників надійності та ефективності.

4) Набув подальшого розвитку 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 порівняння 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.

## **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Обґрунтованість одержаних наукових результатів базується на коректному використанні положень теорії дискретно-неперервних стохастичних систем, теорії надійності складних систем, теорії системотехнічного проектування радіоелектронних систем та комплексів, теорії масового обслуговування, теорії черг, теорії марковських випадкових процесів. Зокрема: методика розроблення структурно-автоматних моделей поведінки відмовостійких систем, разом з методами, які покладені в її основу, базується на використанні положень теорії системотехнічного проектування радіоелектронних систем та комплексів, теорії дискретно-неперервних стохастичних систем, теорії марковських випадкових процесів; методика модифікації компонент структурно-автоматної моделі для використання в дискретно-неперервних стохастичних моделях закону розподілу Ерланга та його комбінацій, разом з методом, який покладено в його основу, базується на використанні положень теорії надійності складних систем, теорії масового обслуговування, теорії черг.

### **Достовірність отриманих результатів та висновків**

Достовірність отриманих результатів підтверджується:

1. Коректністю основних припущень і положень, на яких ґрунтуються методи і методики побудови математичних моделей надійності відмовостійких програмно-технічних комплексів.
2. Збігом результатів в прикладах використання запропонованих методів з відомими.
3. Результатами практичного використання запропонованих методів, методик та прикладної програмної системи під час синтезу показників надійності та ефективності складових в реальних проектах по розробленню бортового комплексу навігації та управління безпілотного літального апарата та комплексу охоронної сигналізації, що підтверджено актами про використання.
4. Збігом результатів, отриманих із застосуванням прикладної програмної системи з результатами в прикладах побудови моделей в «ручному» режимі.

### **Значущість отриманих результатів для науки і практичного використання**

Значущість результатів для науки полягає у розвитку методів та засобів дослідження дискретно-неперервних стохастичних систем немарковського

типу. У сукупності одержані наукові результати розвивають теоретичну і методичну базу проектування відмовостійких програмно-технічних комплексів. Практичне використання розроблених теоретичних положень та створеного «інструментарію» у складі математичного забезпечення, в основу якого покладено структурно-автоматну модель, і відповідної прикладної програмної системи забезпечує підвищення рівня автоматизації процесу розроблення адекватних дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів та переходів.

### **Практична цінність одержаних результатів та їх подальше використання**

Практична цінність одержаних результатів полягає у створенні прикладної програмної системи, яка забезпечує:

- автоматизоване розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких програмно-технічних комплексів;
- скорочує витрати часу на виконання проектних завдань та їх вартість;
- зменшує ймовірність внесення в модель методичних помилок в процесі її побудови, забезпечує адекватність моделей, і підвищує достовірність обчислення значень показників надійності.

Все це є важливим на етапі системотехнічного проектування, коли формується технічне завдання на розроблення нового програмно-технічного комплексу.

Поєднання розробленого програмного забезпечення з програмним засобом ASNA-2 утворює програмний комплекс для розв'язання задач системотехнічного проектування складних систем.

Підтвердженням практичного значення роботи є використання методик і програмного засобу для розв'язання задач синтезу показників ефективності складових комплексів у Науковому центрі Сухопутних військ та введення методичними комісіями двох спеціальностей методів та методик у відповідні дисципліни навчального процесу НУ «Львівська політехніка».

### **Повнота викладу результатів в опублікованих працях**

Наукові і практичні результати дисертації опубліковані у фахових журналах і апробовані на 13 міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференціях.

У наукометричній базі SCOPUS представлено 6 публікацій автора, що свідчить про визнання цінності результатів для наукової спільноти.



В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні положення дисертаційної роботи, які винесено на захист. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні

### **Відповідність дисертаційної роботи обраній спеціальності.**

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин та систем, зокрема, формулі спеціальності, оскільки стосується створення *прикладної програмної системи*, її математичного забезпечення для *автоматизації процесу* розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей у вигляді графів станів та переходів. Зазначена прикладна програмна система є підсистемою у складі *систем моделювання* поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. Дисертаційна робота націлена на створення «інструментарію» у складі математичного забезпечення та відповідної прикладної програмної системи для підвищення рівня автоматизації процесу розроблення адекватних дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів у вигляді графа станів та переходів. Разом з тим, у дисертації відсутні розрахунки досягнутих показників рівня автоматизації. Відсутні також дослідження кількісних оцінок ефекту застосування системи, зокрема скорочення часу на розробку моделі.

2. Не наведено дослідження і не відзначено наукової новизни щодо створення нової архітектури програмного засобу для комп'ютерної підтримки технології розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей. Не наведено особливостей інтеграції створеної прикладної програмної системи в існуючі системи моделювання поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів.

3. Частина загальних висновків дисертації відображає перелік «що робилося», а не досягнуті результати.

4. У науковій новизні відзначено, що запропонована методика розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем зменшує інтелектуальне навантаження на проектанта. Однак кількісна оцінка досягнутого результату не наводиться.

5. У розроблених структурно-автоматних моделях дисертант називає логічним виразом формалізований опис ситуації, в якій відбувається базова подія. Проте ці вирази не є логічними, оскільки не всі їх складові між логічними операторами набувають значень булевих змінних.

6. В тексті дисертації зустрічаються незначні стилістичні та орфографічні помилки.

Зазначені зауваження та недоліки є не принциповими і суттєво не знижують загального позитивного враження від поданої роботи.

### Загальні висновки

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що дисертація Волочія С.Б. на тему «Математичне та програмне забезпечення для дискретно-неперервного стохастичного моделювання відмовостійких програмно-технічних комплексів» є завершеною науковою працею, у якій отримані нові наукові і практичні результати, що вирішують важливу науково-технічну задачу створення математичного забезпечення та прикладної програмної системи для підвищення рівня автоматизації процесу розроблення адекватних дискретно-неперервних стохастичних моделей поведінки відмовостійких програмно-технічних комплексів.

Дисертаційна робота здобувача за своїм рівнем, обсягом і якістю досліджень відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор Волочій Сергій Богданович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин та систем.

### ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

Декан факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій  
Тернопільського національного  
економічного університету  
д.т.н., професор



Підпис: *Дивак М. П.*

Завіряю:

Зав. загальним відділом

*Тарасово І. О.*

Дивак М. П.