

Міністерство освіти і науки України
Національний університет "Львівська політехніка"

Яковина Віталій Степанович



УДК 004.052

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ АНАЛІЗУ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ЕТАПІВ
ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ**

01.05.03 – математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин і систем

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті "Львівська політехніка"
Міністерства освіти і науки України, м. Львів

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Федасюк Дмитро Васильович,
Національний університет "Львівська політехніка",
проректор з науково-педагогічної роботи

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Сидоров Микола Олександрович,
Національний авіаційний університет, м. Київ,
завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення

заслужений винахідник України,
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

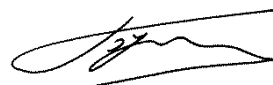
доктор технічних наук, професор
Дивак Микола Петрович,
Тернопільський національний економічний університет,
декан факультету комп'ютерних інформаційних
технологій

Захист відбудеться 11 березня 2016 р. о 13:00 годині в аудиторії 226 головного корпусу на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано 6 лютого 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Р.А. Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасну епоху постіндустріального суспільства ринок програмного забезпечення (ПЗ) щороку зростає стрімкими темпами. Так, згідно звіту Gartner за січень 2015, у 2014 році ринок промислового ПЗ (Enterprise software) зріс на 5,8% порівняно з попереднім роком (більше ніж будь-яка інша галузь ІТ індустрії) і становив 317 млрд. доларів США. Зростання цього ринку прогнозується і на наступні періоди незважаючи на сповільнення економічного зростання ІТ галузі в цілому, так на 2015 рік прогнозувалося зростання ринку промислового ПЗ ще на 5,5% порівняно з попереднім роком до 335 млрд. доларів США. Частка бюджету розроблення ПЗ, витрачена на забезпечення якості (QA), за даними Cargemini, зросла з 18% у 2012 році та 23% у 2013 до 26% у 2014 році з тенденцією до подальшого зростання до 29% у 2017. При цьому загальноприйнятою аксіомою серед розробників ПЗ є правило "1:10:100" – "помилка, вартість виправлення якої становить 1 долар на етапі аналізу вимог чи проектування, коштує 10 доларів на етапі тестування, а виправлення цієї помилки на етапі впровадження коштуватиме 100 доларів".

Більшість сучасної техніки, зокрема – електронні та телекомунікаційні пристрої, є програмно-апаратними системами (ПАС), процес функціонування яких полягає у взаємодії програмних і апаратних засобів. Особливого значення для їхнього проектування, виробництва та експлуатації набуває оцінювання та забезпечення заданих показників їх надійності внаслідок виконання ними все більш відповідальних функцій, пов'язаних із забезпеченням безпеки людини. Із зростанням складності як ПАС загалом, так і ПЗ зокрема, ускладнюється процедура достовірного і точного оцінювання їхніх показників надійності. Одна з основних суперечностей у розвитку сучасної техніки, описана ще Б.В. Гнеденком у 1960-х роках, полягає у тому, що "з одного боку зростаюча складність систем призводить до зниження їх надійності, а з іншого боку, висуваються жорсткіші вимоги до надійної роботи цих систем"; і ця суперечність тільки посилилась з розвитком сучасних ПАС. Отже, сучасний етап розвитку ПАС характеризується чітко вираженою суперечністю між відповідальністю та складністю відповідного ПЗ – з одного боку, та методами і засобами оцінювання та прогнозування його надійності – з іншого. Усунути цю суперечність можна шляхом підвищення ступеня адекватності моделей надійності ПЗ на усіх етапах його життєвого циклу (ЖЦ), а також урахування впливу архітектури та складності ПЗ на процес оцінювання показників його надійності. При цьому на кожному етапі ЖЦ має використовуватись найбільш адекватна модель надійності ПЗ за рахунок уточнення та збільшення ступеня деталізації інформації про об'єкт дослідження.

Побудові математичних моделей та розвитку методів аналізу надійності як ПАС загалом, так і ПЗ зокрема, присвячено багато праць вітчизняних і закордонних вчених. Починаючи від перших моделей надійності ПЗ, розроблених Z. Jelinski та P. Moranda у 1972 році, опубліковано значну кількість наукових праць, у яких досліджено моделі надійності різних типів, серед яких можна виділити моделі на основі неоднорідного пуассонового процесу J.D. Musa, A.L. Goel та K. Okumoto,

S. Yamada та M. Ohba, узагальнені моделі пуассонового процесу A. Goel, A.L. Goel та K. Okumoto, компонентні моделі B. Littlewood, M.L. Shooman, S. Gokhale, R.C. Cheung та ін. У роботах В.С. Харченка розроблено методологію побудови гарантоздатних систем відповідального призначення, узагальнену класифікацію імовірнісних моделей надійності ПЗ та метод вибору оптимальної моделі на основі аналізу їх припущень. Д.А. Маєвський у своїх працях розвиває теорію динаміки програмних систем та детерміністичні моделі надійності ПЗ. Проблемам тестування, інженерії та оцінювання якості та надійності ПЗ присвячено ряд робіт П.І. Андона та К.М. Лавріщевої. Моделі оцінювання та засоби підвищення надійності ПЗ протягом усього ЖЦ розглядаються в роботах М.В. Дідковської та Ю.О. Тимошенко. Проблеми підвищення ефективності діагностування комп'ютерних систем на етапі експлуатації досліджуються у роботах О.В. Поморової. М. Луи розробив концепцію інженерії ПЗ. Проблеми зв'язку моделей надійності ПЗ з процесами прийняття рішень при його виробництві розглядаються в роботах Н. Pham.

Всі розглянуті моделі надійності ПЗ в якості вхідних даних використовують результати тестування ПЗ, через що значно збільшують вартість виправлення помилки. Крім того, питання зв'язку етапів ЖЦ ПЗ, його складності функціонування та архітектури з надійністю залишаються малодослідженими. Тому вдосконалення наявних і побудова нових математичних моделей надійності ПЗ, які враховували б його складність, архітектуру та етапи ЖЦ, а також розроблення відповідних методів і засобів аналізу надійності функціонування ПЗ, є актуальною науково-прикладною проблемою, результати реалізації якої дадуть можливість підвищити достовірність оцінювання показників надійності сучасного ПЗ, чому і присвячена дана дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в межах 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, відповідно до пріоритетного тематичного напрямку Національного університету "Львівська політехніка" "Нові інтелектуальні, комп'ютерні, радіоелектронні, інфокомунікаційні вимірювальні технології, системи, пристрої та бортові системи космічних апаратів" і наукового напрямку кафедри програмного забезпечення "Програмне та математичне забезпечення автоматизованих систем". Результати, викладені в дисертаційній роботі, отримано під час виконання таких науково-дослідних робіт:

- грант Національного університету "Львівська політехніка" для молодих вчених "Використання нейронних мереж для задачі криптоаналізу алгоритму симетричного шифрування DES" (номер держреєстрації 0108U004258), який виконували у 2008 році; дисертантом розроблено нейромережеві моделі прогнозування часових рядів та архітектуру і принципи функціонування програмного засобу прогнозування часових рядів;

- "Розробка методів та засобів розподілення обчислень в задачах теплового проектування електронних пристроїв нового покоління" (номер державної реєстрації 0108U000331), яка виконувалась у 2008–2009 роках; дисертантом розроблено архітектуру, алгоритм функціонування та інформаційне забезпечення програмного засобу оцінювання показників надійності ПЗ;
- "Розроблення моделей, методів та алгоритмів для автоматизованої оцінки показників надійності радіоелектронних та електромеханічних пристроїв і систем" (номер державної реєстрації 0110U001098), яка виконувалась у 2010–2012 роках; дисертантом розроблено модель і метод оцінювання показників надійності ПЗ з урахуванням його складності на основі неоднорідного пуассонового процесу, засоби підтримки прийняття рішень при створенні ПЗ на основі критерію достатності процесу тестування та удосконаленої процедури прогнозування кількості помилок ПЗ;
- "Розроблення моделей, методів та засобів оцінювання та аналізу надійності програмного забезпечення" (номер державної реєстрації 0113U003185), яка виконувалась у 2013–2014 роках; дисертантом розроблено модель надійності ПЗ на основі марковського процесу вищого порядку з дискретним часом, методи автоматизованого формування сценаріїв тестування ПЗ та рекомендації щодо вибору стратегії тестування при створенні програмних засобів;
- "Розроблення моделей надійності, ризику та безпечності програмно-апаратних технічних систем" (номер державної реєстрації 0113U001371), яка виконувалась у 2013–2015 роках; дисертантом розроблено моделі надійності ПЗ на основі марковського процесу вищого порядку з неперервним часом, узагальнений метод аналізу надійності ПЗ з урахуванням його складності, структури та етапу життєвого циклу, підходи до аналізу надійності програмно-апаратних систем з урахуванням відмов та збоїв ПЗ;
- проект за програмою Єврокомісії Tempus "Національна освітня інфраструктура удосконалення інноваційної та підприємницької діяльності ІТ-студентів" (530576-TEMPUS-1-2012-1-SE-TEMPUS-SMHES), який виконується з 2012 року; дисертантом розроблено програмні засоби оцінювання та прогнозування відмов ПЗ, здійснено тестування та аналіз надійності програмного засобу "Віртуальне інноваційне середовище".

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення достовірності оцінювання показників надійності функціонування програмного забезпечення на різних етапах його життєвого циклу за рахунок використання адекватних моделей, методів і засобів аналізу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- 1) аналіз відомих підходів до оцінювання та прогнозування показників надійності ПЗ, встановлення їх переваг і недоліків, які дадуть змогу визначити резерви підвищення їх достовірності при оцінюванні сучасного складного та багатокомпонентного ПЗ;
- 2) розроблення моделей і методів оцінювання показників надійності ПЗ з урахуванням його складності за результатами процесу тестування;

- 3) розроблення моделей і методів оцінювання показників надійності складних програмних систем на основі даних про поведінку надійності складових, з урахуванням їх архітектури та складності функціонування;
- 4) створення методу аналізу надійності функціонування ПЗ на основі розроблених моделей та методів з урахуванням складності, архітектури та етапів життєвого циклу ПЗ;
- 5) розроблення засобів підтримки прийняття рішень на етапах тестування та експлуатації ПЗ із урахуванням вимог до його надійності;
- 6) розроблення методів автоматизованого формування сценаріїв тестування ПЗ та рекомендацій щодо вибору стратегії тестування при створенні ПЗ;
- 7) удосконалення непараметричних моделей прогнозування показників надійності ПЗ на етапах його тестування та експлуатації на основі нейронних мереж;
- 8) розроблення інформаційного забезпечення та програмних засобів для оцінювання та прогнозування показників надійності ПЗ на основі отриманих теоретичних результатів;
- 9) верифікація розробленого математичного та програмного забезпечення.

Об'єктом дослідження є аналіз надійності функціонування ПЗ.

Предметом дослідження є моделі та методи оцінювання показників надійності функціонування ПЗ з урахуванням його архітектури, складності та процесів життєвого циклу.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань використано такі методи дослідження: методи теорії ймовірностей та математичної статистики – для побудови і аналізу моделей надійності функціонування ПЗ типу "чорної скриньки", методів автоматизованого формування сценаріїв тестування ПЗ, створення засобів підтримки прийняття рішень у процесі розроблення ПЗ; теорію марковських процесів – для побудови компонентних моделей надійності ПЗ; методи обчислювальної математики – для оцінювання показників надійності ПЗ та розв'язування систем рівнянь Колмогорова – Чепмена та системи рівнянь, отриманої за методом максимальної правдоподібності; методи теорії графів – для створення методу подання марковського процесу вищого порядку у вигляді еквівалентного процесу першого порядку; методи системного аналізу – для розроблення засобів аналізу надійності функціонування ПЗ на ранніх етапах ЖЦ; методи штучного інтелекту – для створення засобів прогнозування відмов ПЗ на основі штучних нейронних мереж (НМ); теорію алгоритмів, аспектно- та об'єктно-орієнтовану парадигми – для розроблення програмних засобів. Для опрацювання експериментальних даних використано сучасні програмні засоби обчислення (пакети MathCad та Statistica).

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-прикладної проблеми створення моделей, методів та засобів аналізу надійності функціонування ПЗ з урахуванням впливу етапів його ЖЦ, архітектури та складності, які підвищують достовірність оцінювання показників його надійності. При цьому отримано такі нові наукові результати:

вперше:

- 1) побудовано модель надійності функціонування програмних систем у вигляді ланцюга Маркова вищого порядку з неперервним часом та модель надійності програмної системи з урахуванням недосконалої інтеграції її модулів та взаємозалежності їх виконання, які, на відміну від наявних моделей, дають можливість більш достовірно оцінювати показники надійності ПЗ;
- 2) розроблено метод аналізу надійності функціонування ПЗ, який, на відміну від існуючих, враховує його складність, архітектуру та етапи життєвого циклу, що підвищує достовірність оцінювання показників надійності ПЗ;
- 3) розроблено метод подання марковського процесу вищого порядку у вигляді еквівалентного процесу першого порядку з віртуальними станами для програмних систем, в яких існує взаємозалежність виконання модулів, що дає можливість застосувати наявні засоби автоматизованої побудови моделей надійності функціонування складних програмних систем;
- 4) розроблено метод прогнозування кількості відмов програмного забезпечення з використанням регресійного аналізу, який дає можливість підвищити точність прогнозування кількості невиявлених помилок в програмному забезпеченні, або ж зменшити тривалість процесу тестування зі збереженням точності прогнозу;

удосконалено:

- 5) процес аналізу вимог до ПЗ, який за рахунок використання методу аналізу ієрархій дає можливість отримати оцінки параметрів моделей надійності функціонування ПЗ на ранніх етапах його життєвого циклу;
- 6) нейромережеві моделі прогнозування надійності функціонування ПЗ, зокрема, встановлено оптимальні конфігурації нейронної мережі Елмана та мережі на основі радіально-базисних функцій, що дає можливість прогнозувати відмови ПЗ різного ступеня складності з високою точністю;

отримали подальший розвиток:

- 7) модель надійності функціонування ПЗ з показником складності, зокрема, встановлено зв'язок значень цього показника зі складністю ПЗ, що дало можливість підвищити достовірність оцінювання показників надійності ПЗ;
- 8) методи аналізу надійності програмно-апаратних систем, зокрема, встановлено, що введення в модель надійності функціонування ПЗ показника його складності, за рахунок узагальненого характеру моделі та урахування складності ПЗ, підвищує достовірність оцінювання показників надійності програмно-апаратних систем.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення дисертаційної роботи полягає у розробленні обчислювальних алгоритмів і програмних засобів, які забезпечують достовірне оцінювання показників надійності ПЗ на різних етапах його життєвого циклу, зокрема:

- 1) узагальнений метод аналізу надійності ПЗ дає змогу визначити шляхи використання розроблених моделей надійності в практиці програмної інженерії залежно від складності розроблюваних програмних засобів і характеристик процесів ЖЦ;

- 2) розроблені моделі надійності ПЗ надають вхідні дані розробникам ПАС у вигляді відповідних показників надійності ПЗ, що дає змогу здійснювати надійнісне проектування сучасних ПАС, зокрема телекомунікаційних і радіоелектронних;
- 3) розроблена модель надійності ПЗ з показником складності, а також метод оцінювання та прогнозування надійності на її основі придатні для використання на практиці для оцінювання показників надійності модулів складних програмних систем, або програмних засобів без урахування їх внутрішньої структури на основі результатів тестування;
- 4) розроблені моделі надійності ПЗ на основі ланцюгів Маркова вищого порядку придатні для оцінювання показників надійності складних програмних систем на основі їх архітектури та показників надійності їх модулів;
- 5) критерій достатності процесу тестування та метод прогнозування кількості невиявлених помилок ПЗ дають можливість керівникам програмних проектів підвищити ефективність процесу тестування ПЗ шляхом використання числових метрик для планування розподілу ресурсів протягом цього етапу ЖЦ, а також підвищити достовірність оцінювання показників надійності ПЗ;
- 6) засоби автоматизованого формування сценаріїв тестування дають можливість підвищити ефективність процесу тестування ПЗ за рахунок рівномірного покриття коду програми тестами та обґрунтованого вибору стратегії тестування, що зменшує часові, фінансові та людські ресурси на етапі тестування ПЗ;
- 7) розроблені програмні засоби для оцінювання показників надійності ПЗ та прогнозування його відмов можуть бути використані в компаніях з розроблення та експлуатації ПЗ та ПАС відповідального призначення, що підтверджується відповідними актами.

Результати роботи та розроблені програмні засоби пройшли дослідне випробування та впровадження на підприємствах ДП НДІ "Система", ТзОВ "Сайпресс Семікондактор Україна", ТзОВ науково-виробнича фірма "Промтехносервіс Україна", ТзОВ "Логіка ЛТД", ТОВ "СЕА Електротехніка", ПП "Лінк Ап Студіо", а також впроваджені у навчальному процесі Національного університету "Львівська політехніка" в курсах лекцій з дисциплін "Якість програмного забезпечення та тестування", "Аналіз вимог до програмного забезпечення" та "Основи теорії надійності програмних систем", що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: підрозділи 2.3.2, 2.3.3, 6.1, 6.2.1, 6.3 [1]; розділ 3, підрозділи 1.3, 2.3.1, 2.4, 4.1, 4.3 [2]; побудова моделей надійності програмних систем вищого порядку з неперервним часом [3, 16, 30, 48, 49, 51]; обґрунтування вибору критерію структурної оптимізації [19, 20, 39]; структура та формалізація моделі надійності ПЗ з показником складності, визначення діапазонів індексу складності ПЗ, дослідження впливу моделей надійності ПЗ на показники надійності ПАС [8, 9, 23, 28, 36, 54]; розроблення методів аналізу надійності ПЗ [10, 12–15, 22, 29, 35, 43, 53]; проведення експериментальних досліджень з верифікації моделей та

підвищення ефективності процесу тестування [4, 34, 40, 42, 50]; обробка статистичного матеріалу результатів тестування ПЗ [24–27]; побудова нейромережових моделей надійності ПЗ [38, 44, 47, 52, 55]; розроблення алгоритмів і програмних засобів аналізу надійності ПЗ [17, 21, 32, 33, 41, 45, 46].

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення та практичні результати дисертаційного дослідження доповідались на таких наукових конференціях: Міжнародній конференції молодих вчених "Комп'ютерні науки та інженерія" CSE (Львів, 2011, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції "Комп'ютерні науки та інформаційні технології" CSIT (Львів, 2010–2012, 2014); Міжнародній конференції "Інтернет – Освіта – Наука" ІОН (Вінниця, 2008); Міжнародній конференції "Досвід розробки та застосування приладотехнологічних САПР в мікроелектроніці" CADSM (Львів–Поляна, 2009, 2011, 2013); Всеукраїнській науково-практичній конференції "Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті" СІТЕМ (Львів, 2011, 2012); Міжнародній конференції "Перспективні технології і методи проектування MEMC" MEMSTECH (Поляна, 2012, 2013; Львів, 2014); Міжнародній науковій конференції "Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту" ISDMCI (Євпаторія, 2012, 2013); International Conference on Inductive Modelling ICIM (Київ, 2013); Міжнародній конференції "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії" TCSET (Львів–Славське, 2014); International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer ICTERI (Львів, 2015); Міжнародній науково-технічній конференції "Електротехнічні та комп'ютерні системи: теорія і практика" (Одеса, 2015).

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 55 наукових праць (з них 7 одноосібних), зокрема 2 монографії [1, 2], 2 статті у закордонних виданнях [3, 4], 4 статті у фахових виданнях України, що внесені до міжнародних наукометричних баз даних [5–8], 19 статей у інших фахових виданнях України [9–27], 2 статті у періодичних виданнях України, що не віднесені до переліку фахових [28, 29], 26 публікацій у матеріалах наукових конференцій [30–55].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 283 найменувань на 31 сторінці та 4 додатків на 16 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 325 сторінок, з них 278 сторінок основного тексту. Робота містить 91 рисунок і 24 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання досліджень, показано зв'язок із науковими програмами, планами, темами, сформульовано наукову новизну та практичну цінність результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану теорії та практики аналізу надійності ПЗ та тенденцій їх розвитку. Розглянуто поняття надійності ПЗ

як групи властивостей, в яку входять безвідмовність, стійкість до аномалій, відновлюваність, точність та реактивність. Наведено визначення та причини відмов ПЗ. Здійснено порівняльний аналіз надійності програмних та апаратних засобів і показані найбільш суттєві відмінності між ними, а також наведені постановки задачі аналізу надійності апаратних та програмних засобів. Здійснено огляд та аналіз моделей надійності ПЗ, при цьому окрему увагу приділено моделям на основі неоднорідного пуассонового процесу (НПП) та моделям на основі компонентного підходу; показано основні обмеження та недоліки існуючих моделей та можливі шляхи їх усунення. Проаналізовано сучасний стан моделей і засобів визначення оптимального часу введення ПЗ в експлуатацію, що на сьогоднішній день, є практично єдиними засобами підтримки прийняття рішень при розробленні ПЗ з урахуванням вимог до його надійності. Показано, що наявні моделі та методи аналізу надійності ПЗ не враховують його зростаючої складності та не забезпечують необхідний рівень достовірності оцінювання показників його надійності. Розділ завершується формулюванням науково-прикладної проблеми і постановкою задач, які вирішені в дисертаційній роботі.

У зв'язку зі зростаючою складністю ПЗ, моделі на основі неоднорідного пуассонового процесу перестали описувати поведінку надійності ПЗ із достатнім для практичних цілей ступенем адекватності. Тому, починаючи з 90-х років минулого століття все більшого поширення набувають моделі на основі марковського процесу, які описують надійність ПЗ беручи до уваги його внутрішню будову. Проте, моделі надійності ПЗ на основі компонентного підходу у більшості випадків використовують теорію класичних марковських процесів, припускаючи незалежність виконання модулів програмної системи (ПС), що є спрощеним описом процесу виконання складних ПС, де імовірність переходу в наступний стан може залежати не тільки від поточного стану, а й від передісторії. Для усунення такого спрощення в літературі запропоновано використовувати математичний апарат ланцюгів Маркова вищого порядку (ЛМВП), який дає змогу точніше відобразити в моделях надійності ПС його функціональну поведінку.

Вирішення актуальної проблеми підвищення надійності сучасних ПАС вимагає розроблення моделей, методів та засобів аналізу надійності ПЗ, яке є складовою таких систем. У свою чергу, розв'язання суперечності між складністю сучасного ПЗ з одного боку та високими вимогами до його надійності – з іншого, вимагає розв'язання таких науково-прикладних задач:

- розроблення моделей і методів оцінювання показників надійності ПЗ за даними їх тестування з урахуванням складності ПЗ;
- розроблення моделей і методів оцінювання показників надійності складних ПС на основі даних про надійність їх складових з урахуванням взаємозалежності виконання модулів ПС;
- побудова узагальненого методу аналізу надійності ПЗ з урахуванням його складності, архітектури та етапів ЖЦ;
- розроблення засобів підтримки прийняття рішень на етапах тестування та введення в експлуатацію ПЗ із урахуванням вимог до його надійності.

У **другому розділі** побудовано та досліджено модель надійності ПЗ на основі неоднорідного пуассонового процесу, яка включає як параметр показник складності ПЗ. Ця модель використовується для оцінювання за результатами випробування (тестування) ПЗ таких показників його надійності як загальна кількість помилок в коді, параметр потоку відмов, інтенсивність відмов, імовірність безвідмовної роботи тощо. Досліджено поведінку параметрів моделі та встановлено діапазони показника складності ПЗ. Наведено результати верифікації даної моделі на основі емпіричних даних та її порівняння з S-подібною моделлю та моделлю Goel – Okumoto, як найбільш поширеними моделями на основі НПП. Показано, що модель надійності з показником складності (МНПС), за рахунок уведення динамічного показника складності, відноситься до класу узагальнених моделей на основі НПП і дозволяє більш достовірно описувати функціональну поведінку ПЗ порівняно з наявними моделями на основі НПП. Наведено результати впливу вибору моделі надійності ПЗ на оцінювання показників надійності відмовостійкої ПАС, і показано, що МНПС дає змогу підвищити точність оцінювання інтенсивності відмов ПЗ на три порядки, та підвищити точність оцінювання функції та коефіцієнта готовності ПАС. На основі МНПС розроблено метод оцінювання показників надійності ПЗ з урахуванням його складності на основі результатів тестування та проведено його верифікацію з використанням емпіричних даних тестування промислового програмного засобу.

З метою усунення недоліків існуючих моделей надійності ПЗ у вигляді НПП і відповідного підвищення достовірності показників надійності ПЗ, розроблено та описано модель надійності ПЗ у вигляді НПП з урахуванням його складності, обумовленої функціональною поведінкою, на основі даних, отриманих під час тестування. Як і переважна більшість моделей у вигляді НПП, МНПС побудовано на основі таких основних припущень:

- 1) кількість відмов на різних інтервалах часу є незалежною;
- 2) виявлені помилки одразу виправляються, виправлення є миттєвим;
- 3) виправлення помилок є ідеальним (виправляється тільки одна наявна помилка, а нових не вноситься);
- 4) інтенсивність відмов спадає з часом;
- 5) ймовірності відмови, спричиненої будь-якою помилкою, на будь-якому інтервалі часу є однаковими;
- 6) інтенсивність відмов є функцією кількості помилок, що залишились в програмі;
- 7) тестовий профіль є репрезентативним відображенням операційного профілю програми;
- 8) вигляд функції зростання надійності ПЗ (експоненційний чи S-подібний) залежить від складності ПЗ.

На основі цих припущень запропоновано МНПС, в якій функція параметра потоку відмов має такий вигляд:

$$\lambda(t) = \alpha \beta^{s+1} t^s \exp(-\beta t), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт, який характеризує загальну кількість відмов, виявлених у програмі від початку спостереження, β – коефіцієнт, що характеризує швидкість

зміни функції параметра потоку відмов (завжди $\beta > 0$), s – динамічний показник складності ПЗ.

Для функції параметра потоку відмов вигляду (1) функція кумулятивної кількості відмов ПЗ має вигляд:

$$\mu(t) = \int_0^t \lambda(\tau) d\tau = a[-\beta^s t^s e^{-\beta t} + s\Gamma_{\beta t}(s)], \quad (2)$$

де $\Gamma_z(p) = \int_0^z t^{p-1} e^{-t} dt$, ($Re p > 0$) – неповна гамма-функція.

При $s = 0$ функція параметра потоку відмов (1) співпадає з такою для моделі Goel–Okumoto, а при $s = 1$ – для S-подібної моделі.

Загальна кількість помилок у ПЗ визначається кумулятивною функцією при $t \rightarrow \infty$, таким чином:

$$\mu(\infty) = as\Gamma(s), \quad (3)$$

де $\Gamma(s)$ – гамма-функція.

Досліджено поведінку функції параметра потоку відмов (1) та встановлено її екстремуми. Значення часу, при якому функція $\lambda(t)$ є максимальною дорівнює:

$$t_{max} = \frac{s}{\beta}. \quad (4)$$

Як видно з (4) розташування максимуму параметра потоку відмов ПЗ, на відміну від усіх відомих моделей надійності ПЗ, залежить як від якості тестування (параметр β), так і від складності ПЗ, що тестується. Зсув максимуму функції інтенсивності відмов по часовій шкалі в залежності від значення показника складності ілюструє рис. 1 (криві 2–5). Усі криві на рис. 1 побудовано з використанням однакових значень параметрів α та β (a та b для моделі Goel–Okumoto), а значення параметра s для кривих 2–5 становило 0,5; 1; 2 та 2,5 відповідно. Крива, яка відповідала параметру потоку відмов у випадку S-подібної моделі, повністю співпадає з кривою 3 на рис. 1.

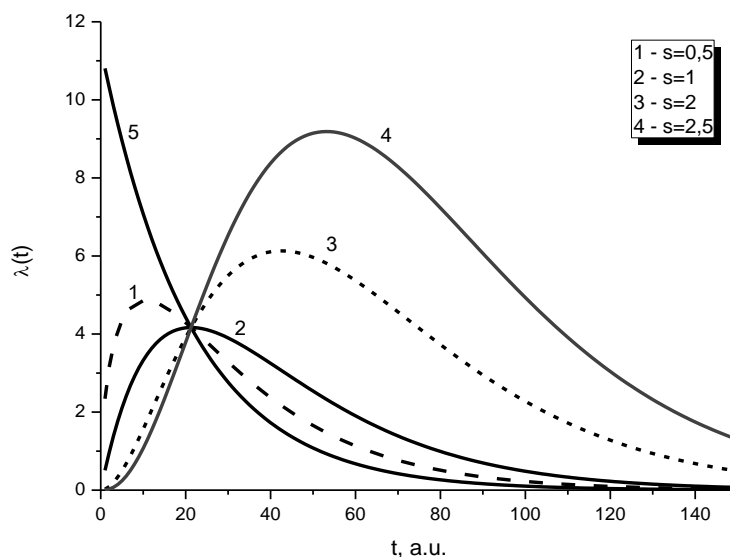


Рис. 1. Залежності параметра потоку відмов від часу, визначені за допомогою МНПС (криві 1–4) та моделі Goel–Okumoto (крива 5).

У МНПС параметр α характеризує загальну кількість помилок в ПЗ, але на відміну від моделі Goel–Okumoto не дорівнює їй (очікувана загальна кількість помилок, яка буде виявлена при $t \rightarrow \infty$ становить $\alpha s \Gamma(s)$, тобто містить модифікатор, який залежить від складності ПЗ); параметр β так само має розмірність обернену до розмірності часу і характеризує швидкість виявлення відмов, віднесена до однієї помилки програми; параметр s є показником складності ПЗ. Крім того, з рис. 1 видно, що на тривалість процесу виявлення помилок впливає не тільки параметр β , але й параметр s , що відповідає практиці проведення тестування та виявлення помилок для ПЗ різної складності.

Проаналізовано максимальне значення параметра потоку відмов λ_{max} та його залежність від параметрів МНПС. Максимальне значення параметра потоку відмов в залежності від показника складності s має мінімум у точці $s = 1$. Залежність нормованого максимального значення параметра потоку відмов від показника складності ПЗ наведено на рис. 2.

З умови рівності площ під кривою максимального значення параметра потоку відмов (рис. 2) у кожному діапазоні визначено діапазони значень показника складності ПЗ:

- 1) ПЗ є нескладним, коли $s \in [0; 0,66)$;
- 2) ПЗ має середню складність, коли $s \in [0,66; 1,6)$;
- 3) ПЗ є складним, коли $s \in [1,6; 2,28)$;
- 4) ПЗ є дуже складним, коли $s \in [2,28; e]$.

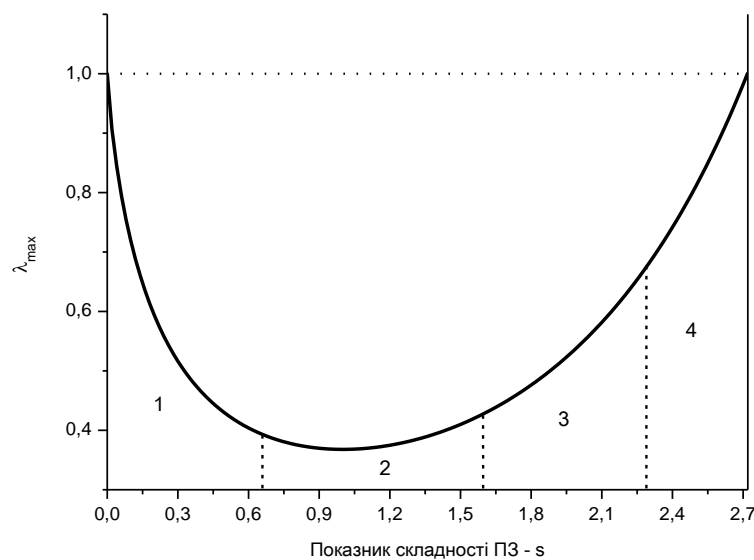


Рис. 2. Залежність нормованого максимального значення параметра потоку відмов від показника складності s .

Характер змін нормованого максимального значення параметра потоку відмов пояснюється таким чином. Зі збільшенням ступеня складності ПЗ максимальне значення параметра потоку відмов зменшується (рис. 2) та зсувається в часі (рис. 1), оскільки тестувальникам потрібно все більше часу на тестування усіх функцій. Для ПЗ середньої складності максимальне значення параметра

потоків відмов майже не залежить від складності і проходить через точку мінімуму, при цьому далі зсуваючись в бік більших значень шкали часу. Зі збільшенням показника складності максимальне значення параметра потоку відмов продовжує зростати і при $s = e$ співпадає з його значенням при $s = 0$. При цьому загальна тривалість процесу виявлення помилок монотонно зростає (див. рис. 1), а максимальне значення параметра потоку відмов настає все пізніше зі зростанням складності ПЗ, що відповідає якісній картині процесу тестування промислового ПЗ.

Показано, що МНПС суттєво краще описує реальні експериментальні результати ніж найбільш поширені моделі надійності: коефіцієнт детермінації для експериментальних даних і МНПС становить 0,999, у той час як для моделі Goel–Okumoto – 0,993, а для S-подібної моделі – 0,995; значення середньої квадратичної похибки апроксимації становить 0,05 для МНПС, що майже на порядок краще ніж для двох інших моделей. Таким чином МНПС усуває недоліки існуючих моделей шляхом уведення показника складності ПЗ, і, завдяки цьому, більш достовірно визначаються показники його надійності.

Однією із задач розроблення програмно-апаратних систем (ПАС), що входять до складу комплексів критичного призначення (озброєння, космічних, авіаційних, енергетичних тощо) є забезпечення вимог, щодо надійності (безвідмовності та готовності) і функціональної безпеки. При цьому можливі ризики двох типів, з одного боку пов'язаних з правильністю оцінювання показників надійності та безпечності експлуатації комплексів критичного призначення, а з іншого боку з правильністю вибору засобів забезпечення їх надійності та безпеки. Оскільки результати оцінювання показників надійності ПЗ впливають на правильність оцінювання показників надійності ПАС, проведено дослідження впливу моделі надійності ПЗ, на основі якої отримували значення показників надійності ПЗ, на результати оцінювання показників надійності ПАС, зокрема функції та коефіцієнта готовності.

В дисертаційній роботі досліджено вплив вибору моделі надійності ПЗ на оцінку функції та коефіцієнта готовності ПАС з версійно-структурним резервуванням. У ролі моделей надійності ПЗ, які дають вхідне значення інтенсивності відмов ПЗ для моделі надійності ПАС, обрано МНПС – з одного боку, та моделі Goel–Okumoto і S-подібна модель – з іншого.

В табл. 1 наведено значення інтенсивностей відмов двох програмних засобів, отриманих на основі результатів їх тестування згідно різних моделей надійності ПЗ. Як видно з цієї таблиці, незважаючи на майже однаковий прогноз кумулятивної кількості відмов, значення інтенсивності відмов може відрізнитись на три–шість порядків.

Таблиця 1

Інтенсивності відмов ПЗ, отримані на основі різних моделей надійності

λ , год ⁻¹	Модель Goel–Okumoto	S-подібна модель	МНПС
λ_{sw11}	$3,516 \times 10^{-6}$	$1,744 \times 10^{-9}$	$1,221 \times 10^{-3}$
λ_{sw12}	$2,143 \times 10^{-9}$	$3,64 \times 10^{-14}$	$7,286 \times 10^{-8}$

На рис. 3 подано залежності функції готовності при різних значеннях інтенсивності відмов ПЗ, які наведено в табл. 1. Розрахунок коефіцієнта готовності дає значення $K_r = 0,977$ у випадку використання МНПС, та $K_r = 0,981$ для двох інших моделей надійності ПЗ.

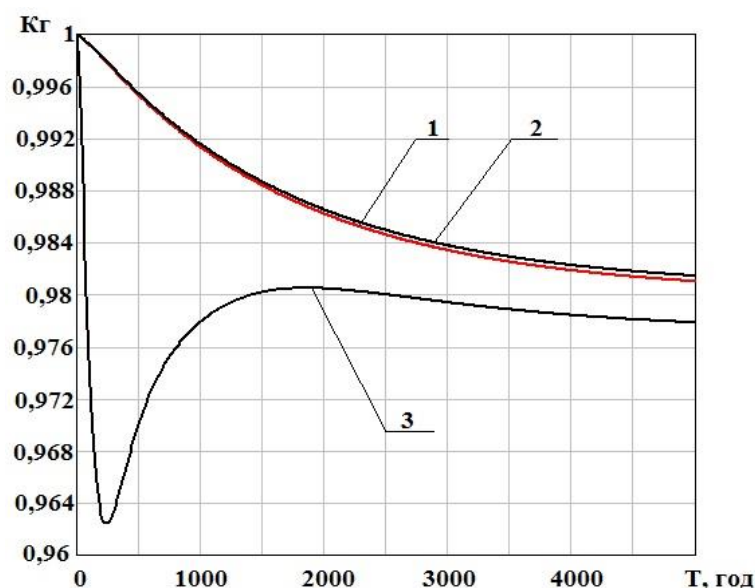


Рис. 3. Залежності функції готовності ПАС від часу при значеннях інтенсивності відмов ПЗ, отриманих на основі різних моделей (1 – модель Goel–Okumoto, 2 – S-подібна модель, 3 – МНПС).

Як видно з рис. 3 і табл. 1, значення інтенсивності відмов ПЗ, отримані на основі МНПС, є вищими за значення інтенсивності відмов, отримані на основі найбільш поширених моделей надійності ПЗ на основі НПП. Таким чином, використання традиційних моделей надійності ПЗ призводить до завищених оцінок показників надійності ПАС, що не дає можливості достовірно оцінити ризики функціонування такої системи, та може потенційно спричинити значні втрати внаслідок відмов ПАС. Крім того, як видно з рис. 3, характер функції готовності ПАС, розрахованої на основі вхідних даних, отриманих з МНПС (крива 3, рис. 3), є якісно іншим, ніж характер функцій готовності, отриманих з використанням значень інтенсивності відмов ПЗ на основі моделей Goel–Okumoto та S-подібної (криві 1, 2 на рис. 3). Дійсно, крива 3 демонструє немонотонну залежність з екстремальною точкою. Причому в даному випадку ця точка є точкою мінімуму та розташована в області невеликих значень тривалості експлуатації, що може суттєвим чином відобразитись на поведінці даного ПАС у сенсі надійності. Цю особливість необхідно враховувати під час експлуатації та регламентного технічного обслуговування таких систем.

У **третьому розділі** розроблено моделі і методи аналізу надійності функціонування складних програмних систем на основі марковських процесів вищого порядку, які дають змогу врахувати взаємозалежність виконання модулів ПС, і таким чином підвищити достовірність оцінювання показників надійності програмної системи на основі даних про надійність її модулів. Розроблено

узагальнений метод аналізу надійності ПС, який включає використання різних моделей надійності в залежності від складності ПС на різних етапах ЖЦ.

Розроблені та описані в другому розділі дисертаційної роботи моделі, методи і засоби, хоча і враховують складність ПЗ, відносяться до моделей типу "чорної скриньки". Їм властиві усі недоліки, притаманні такому класу моделей, які описані в першому розділі. Модель надійності ПЗ з показником складності, як і практично усі моделі на основі НПП, призначена для оцінювання надійності програмних засобів, складність яких дозволяє нехтувати взаємозв'язками їх модулів. По аналогії із методами і засобами оцінювання надійності апаратних засобів, такі моделі можна віднести до засобів оцінювання показників надійності елементів за даними статистичних випробувань. У випадку ж більш складних програмних систем слід використовувати для аналізу їх надійності компонентні моделі.

Моделі оцінювання надійності ПС на основі архітектурного підходу у більшості випадків використовують теорію класичних марковських процесів, припускаючи незалежність виконання модулів програмної системи, що є спрощеним описом реального процесу виконання ПС, де імовірність переходу в наступний стан (наприклад передачі управління до іншого модуля програми) може залежати не тільки від поточного стану, а й від передісторії потрапляння в цей стан (який модуль програми виконувався до того, як почав виконуватись поточний модуль). Для усунення такого спрощення використовують ланцюги Маркова вищого порядку (ЛМВП), які дають змогу точніше оцінити надійність ПС, оскільки враховується взаємозалежність виконання її модулів.

Модель надійності ПС на основі ЛМВП з дискретним часом. У роботі запропоновано удосконалену модель оцінювання надійності ПС, в якій архітектуру ПС подано марковським процесом вищих порядків з дискретним часом. Розглядається поглинальний марковський процес, що передбачає наявність одного або більше поглинальних станів, тобто станів, з яких не можна перейти в інші стани. Під станом розуміють виконання відповідного модуля програмної системи. Елементами цієї моделі надійності є: $\{C_i\}$ – напрямлений граф, який відображає структуру програмної системи, вершини графа відповідають модулям системи, а ребра відображають потік управління між модулями ($i = \overline{1, N}$, де N – кількість модулів програмної системи); $P = \{p_{ij\dots kl}\}$ матриця ймовірностей переходів в модуль l в залежності від виконання попередніх K модулів; $\lambda_i(t)$ – інтенсивності відмов кожного програмного модуля.

Основними припущеннями та властивостями цієї моделі є:

- а) програмна система складається зі скінченної кількості модулів, які з точки зору її структурної схеми надійності з'єднані послідовно;
- б) передача управління між модулями ПС відбувається через однакові дискретні проміжки часу;
- в) кожен модуль ПС може бути протестований незалежно і характеризується інтенсивністю відмов $\lambda_i(t)$;

- г) операційний профіль ПС відповідає протестованим варіантам використання і не змінюється з часом, а усі особливості поведінки ПС відображені у матриці ймовірностей переходів \mathbf{P} ;
- д) ймовірності переходів p_{ij} між станами i та j залежать від переліку попередніх станів ПС, який закінчується поточним станом i (кількість попередніх станів, що впливають на ймовірність p_{ij} дорівнює порядку марковського процесу K);
- е) надійність i -го модуля залежить тільки від сумарного часу виконання цього модуля та його інтенсивності відмов, але не залежить від конкретних моментів часу, в які передається управління цьому модулю.

Тоді ймовірність безвідмовної роботи ПС $R(t)$ обчислюється так:

$$R(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t). \quad (5)$$

Для урахування можливої взаємної залежності передачі управління між модулями ПС, запропоновано ймовірність безвідмовної роботи кожного модуля R_i ($i = \overline{1, N}$) обчислювати з використанням формалізму марковських процесів вищого порядку:

$$R_l(t) = \exp \left(- \int_0^{\sum_{ij\dots k} V_{ij\dots kl} t_{ij\dots kl}} \lambda_l(\tau) d\tau \right), \quad (6)$$

тут $V_{ij\dots kl}$ – очікувана кількість відвідувань модуля l в залежності від виконання попередніх K модулів, $t_{ij\dots kl}$ – тривалість виконання модуля l у залежності від виконання попередніх K модулів. Для знаходження $V_{ij\dots kl}$ потрібно розв'язати таку систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$V_{j\dots kl} = q_{j\dots kl} + \sum_{i=1}^{N-1} V_{ij\dots k} p_{j\dots kl}, \quad (7)$$

де $p_{ij\dots kl}$ – ймовірність переходу в модуль l в залежності від виконання попередніх K модулів, $q_{ij\dots kl}$ – початковий ймовірнісний вектор.

Модель надійності ПС на основі ЛМВП з неперервним часом. Використання моделі надійності на основі ланцюгів Маркова з дискретним часом має ряд обмежень та спрощень. Так, ця модель враховує тільки сумарну тривалість виконання i -ого модуля та його інтенсивність відмов і не враховує закон розподілу тривалості виконання модуля та конкретні моменти часу, в які відбувалась передача управління цьому модулю. Це може бути важливим у випадку залежності інтенсивності відмов модуля від часу. Іншим спрощенням є те, що в реальних ПС передача управління між модулями системи відбувається в довільні моменти часу, а крім того на результати, отримані за допомогою моделі з дискретним часом сильно впливатиме значення кванту часу, з яким здійснюється дискретизація поведінки системи. Тому, для підвищення ступеня адекватності моделі надійності ПС, що враховує його архітектуру, слід використовувати ланцюги Маркова з неперервним часом.

Модель надійності ПС на основі ЛМВП з неперервним часом складається з таких складових: $\{C_i\}$ – напрямлений граф, який відображає структуру програмної системи, вершини графа відповідають модулям системи, а ребра відображають передачу управління між модулями ($i = \overline{1, N}$, де N – кількість модулів ПС); $A = \{a_{ij}(t)\}$ – матриця інтенсивностей переходів між модулями ПС, які відповідають вершинам графа $\{C_i\}$; $P = \{p_i(t)\}$ вектор імовірностей перебування системи в стані C_i в момент часу t ; $\lambda_i(t)$ – інтенсивність відмов i -ого програмного модуля. Зауважимо, що матриця інтенсивностей переходів між станами системи відображає кількість переходів зі стану i в стан j за одиницю часу, і в загальному випадку її елементи можуть бути залежними від часу $a_{ij} = f(t)$, а у випадку використання ЛМВП, залежать від шляху, яким система потрапила в стан i .

Основними припущеннями та властивостями цієї моделі є:

- а) програмна система складається зі скінченної кількості модулів, які з точки зору її структурної схеми надійності з'єднані послідовно;
- б) передача управління між модулями ПС відбувається в довільні моменти часу;
- в) кожен модуль ПС може бути протестований незалежно і характеризується інтенсивністю відмов $\lambda_i(t)$;
- г) операційний профіль ПС відповідає протестованим варіантам використання і не змінюється з часом, а усі особливості поведінки ПС відображені у матриці інтенсивності переходів A ;
- д) інтенсивність переходів a_{ij} між станами i та j залежить від історії переходів між попередніми станами ПС, яка закінчується поточним станом i (кількість попередніх станів, що впливають на інтенсивність a_{ij} дорівнює порядку марковського процесу K);
- е) надійність i -го модуля залежить від конкретних моментів часу, в які передається управління цьому модулю (у випадку, якщо $\lambda_i = f(t)$);
- ж) в довільний момент часу t відмова ПС може бути спричинена виключно відмовою того модуля, який виконується в даний момент часу.

В такому випадку вираз для інтенсивності відмов ПС, яка складається з N модулів, може бути записаний як:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^N p_i(t)\lambda_i(t), \quad (8)$$

де $\lambda_i(t)$ – інтенсивність відмов i -го модуля, $p_i(t)$ – імовірність виконання i -го модуля в момент часу t (що відповідає перебуванню системи в стані C_i).

Як і у випадку моделі з дискретним часом інтенсивність відмов модулів ПС може бути отримана на основі результатів модульного тестування з використанням відомих моделей надійності типу "чорної скриньки", наприклад МНПС на основі НПП.

Якщо потік управління між модулями ПС моделюється як процес Маркова з неперервним часом (стан C_i процесу відповідає виконанню i -го програмного модуля), то імовірність перебування системи в i -му стані $p_i(t)$ отримують з розв'язку системи рівнянь Колмогорова – Чепмена:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = - \sum_{j \in S} a_{ij}(t)p_i(t) + \sum_{j \in S} a_{ji}(t)p_j(t), i \in S, \quad (9)$$

де $a_{ij}(t)$ – інтенсивність переходу зі стану i в стан j , а S позначає множину усіх станів системи.

Вплив марковського процесу вищого порядку виражається в залежності інтенсивності переходу зі стану від історії потрапляння у поточний стан, і чим вищий порядок процесу, тим триваліший ланцюжок переходів впливає на цю інтенсивність. У цьому випадку постає задача отримання таких залежностей для урахування їх при обчисленні надійності ПС. Для вирішення цієї задачі в дисертаційній роботі запропоновано метод, що полягає у побудові еквівалентного процесу першого порядку, та обчислення імовірностей $p_i(t)$ з використанням математичного апарату класичних марковських процесів з неперервним часом. Для цього марковський процес вищого порядку представляють у вигляді еквівалентного процесу першого порядку з додатковими фіктивними станами. При цьому кожен стан початкового графу розщеплюється на таку кількість фіктивних станів, скільки є різних шляхів до цього стану. Таким чином вирішення задачі, по суті, зводиться до використання апарату теорії графів. Для визначення кількості ланцюжків K -го порядку зі стану C_i в стан C_j можна скористатись формулою, що базується на методі Флойда:

$$m_{ij}^K = \sum_{j=1}^N (m_{il}^{K-1} + e_{il})m_{lj}^1, \quad (10)$$

тут N – кількість всіх станів системи, e_{ij} – елементи одиничної матриці.

Таким чином отримується розширена матриця імовірностей переходів між станами, на основі якої формується система диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. У випадку марковського процесу змінного порядку у виразі (10) для кожного стану використовують різне значення порядку процесу без зміни суті розрахунку.

Взявши за основу модель Літлвуда, в дисертаційній роботі побудовано модель надійності ПС вищого порядку з урахуванням відмов інтерфейсів на основі таких припущень (на додачу до припущень моделі на основі ЛМВП з неперервним часом):

- а) вважається, що інтеграція модулів у ПС є неідеальною і на додачу до відмов програмних модулів виникають відмови, пов'язані з переходами між модулями; q_{ij} позначає імовірність таких відмов при передачі управління від модуля i до модуля j ;
- б) в довільний момент часу t відмова ПС може бути спричинена відмовою того програмного модуля, який виконується в даний момент часу, та відмовою при передачі управління між модулями; імовірність відмови ПС є умовною імовірністю відмови такого модуля за умови безпомилкової передачі управління цьому модулю.

З урахуванням наведених припущень вираз для інтенсивності відмов ПС можна записати як:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^N p_i(t)\lambda_i + \sum_{i \neq j} a_{ij}(t)q_{ij}, \quad (11)$$

тут елементи матриці інтенсивності переходів $a_{ij}(t)$ залежать від історії переходів до поточного стану довжиною K (де K – оптимальний порядок ланцюга Маркова) і в загальному випадку можуть бути функціями часу. Хоча інтенсивності відмов модулів ПС не залежать від часу (за умови розгляду однієї версії програмної системи), інтенсивність відмов ПС є функцією часу виконання (10), що є наслідком складності структури ПС, до якої входять модулі з різною інтенсивністю відмов. Модель надійності ПС у вигляді (11) є однією з найбільш загальних моделей, яка зводиться до моделі (8) у випадку $q_{ij} = 0$, чи до моделі типу (1) у випадку розгляду системи як чорної скриньки, тобто з одним модулем.

Узагальнений метод аналізу надійності ПС з урахуванням їх складності. Основною задачею сучасного етапу розвитку методів аналізу надійності ПС є урахування в моделях надійності ПС їх складності. Узагальнюючи розроблені в дисертації моделі та методи аналізу та оцінювання надійності ПС, розроблено новий метод аналізу надійності ПС з урахуванням їх складності та архітектури на різних етапах ЖЦ (рис. 4 а, б). Суть методу розкривають такі етапи:

1. *Етап аналізу вимог до ПС.* Першим етапом цього методу є отримання інформації про поведінку ПС, що включає оцінки імовірностей виконання різних сценаріїв використання ПС, на ранніх етапах ЖЦ.

2. *Етап проектування архітектури ПС.* Другим етапом методу аналізу надійності (рис. 4а) є отримання прогнозованого графа станів ПС, який відображає виконання модулів та передачу управління між ними, а також попередніх оцінок матриці імовірності переходів між станами на етапі проектування ПС.

3. *Етап конструювання ПС.* На цьому етапі, під час якого створюється працездатне програмне забезпечення, метод дає можливість отримати прогнозований перелік лімітуючих (в сенсі надійності) модулів ПС; оцінити імовірності відмови інтерфейсів ПС на основі статичного аналізу коду та його метрик та побудувати модель поведінки ПС на основі аналізу змінних її програмного коду.

4. *Фаза модульного тестування.* Під час цієї фази ЖЦ здійснюється тестування розроблених модулів (переважно розробниками) без інтеграції їх в систему та виправлення виявлених помилок. Тривалість процесу модульного тестування визначають на основі критерію достатності процесу тестування або ж удосконаленої процедури оцінки кількості помилок в ПС. Якість процесу тестування забезпечується використанням методів автоматизованого формування сценаріїв тестування (АФСТ).

5. *Фаза інтеграційного тестування.* Для проведення такого тестування особливо ефективним є використання засобів АФСТ. Після отримання значень параметрів пуассонового процесу (1) здійснюють оцінювання складності ПС. При цьому, якщо ПС відноситься до класу нескладних ($s < 0,66$) рекомендується використовувати для аналізу надійності системи модель на основі НПП і перейти до оцінювання показників надійності ПС. В іншому випадку слід використати одну

з моделей на основі ЛМВП. Зокрема, якщо ПС відноситься до систем середнього ступеня складності ($0,66 \leq s < 1,6$, оптимальний порядок ЛМВП не дуже високий, а ймовірності відмови інтерфейсів ПС є нехтувально малими) рекомендується використовувати для аналізу надійності системи модель на основі ЛМВП з дискретним часом (5)–(7); якщо $1,6 \leq s < 2,28$, а імовірностями відмови інтерфейсів ПС можна знехтувати, використовують модель з неперервним часом (8); якщо ж складність ПС є дуже високою ($s > 2,28$, а імовірностями відмови інтерфейсів ПС не можна знехтувати), то використовують модель надійності ПС (11), та переходять до оцінювання показників надійності ПС.

б. Етап експлуатації ПС. Після уведення ПС в експлуатацію продовжується збір статистики її використання та даних про її відмови з використанням сучасних засобів та інструментів програмної інженерії (рис. 4б). Інформація про показники надійності та сценарії використання ПС, разом з новими вимогами (як функціональними, так і іншими) лягає в основу процесу розробки нових версій цієї ПС.

Результати верифікації розроблених моделей та методу показали, що використання ЛМВП з дискретним часом дає змогу збільшити точність оцінювання показників надійності ПС на 6–10 %, а модель на основі процесу вищого порядку з неперервним часом – на 10–20%. Позитивною стороною використання моделі з дискретним часом у задачах оцінювання надійності є невеликі обчислювальні ресурси навіть для ПС з великою кількістю модулів. Використання ЛМВП з неперервним часом забезпечує: вищий ступінь адекватності за рахунок зняття обмеження на час передачі управління між модулями, можливість урахування залежності інтенсивності відмов модулів від часу в загальній інтенсивності відмов ПС, незалежність аналізу від кроку дискретизації (що у випадку дискретного часу може бути причиною неточного обчислення матриці ймовірностей переходів).

Четвертий розділ присвячено засобам підвищення ефективності розробки ПС з урахуванням вимог до їх надійності. Зокрема обґрунтовано критерій достатності процесу тестування та процедуру прогнозування кількості помилок ПС, які дають можливість на етапі тестування ПС більш обґрунтовано приймати рішення стосовно досягнення заданих показників надійності та розподілу ресурсів проекту з розробки ПС. Описано нову модель функціонування ПС, яка враховує її архітектуру та змінні програмного коду, а також методи автоматизованого формування сценаріїв тестування, які дають можливість підвищити ефективність процесу тестування ПС та покращити достовірність оцінювання показників його надійності за рахунок більш повного покриття змінних коду та їх класів еквівалентності тестовими сценаріями. Наведено рекомендації стосовно вибору стратегії тестування при розробленні ПС залежно від їх складності.

Для визначення критерію достатності процесу тестування будувались залежності параметрів трьох моделей надійності ПЗ на основі НПП від кількості ітерацій, після яких припинялось тестування. Показано, що залежність показника складності s МНПС (який відсутній в усіх інших моделях на основі НПП) виявляє чітку особливість, що покладена в основу критерію достатності процесу тестування. Ця особливість полягає в тому, що при певному значенні тривалості

тестування залежність $s(t)$ стає гладкою, а значення s наближається до постійної величини, на відміну від такої залежності при менших значеннях часу, яка проявляє різко осцилюючий характер. Така поведінка залежності $s(t)$ пояснюється тим, що показник складності ПЗ (параметр s моделі) є основним параметром, який визначає форму і функцію розподілу імовірностей випадкової величини, яка в даному випадку є кількістю відмов.

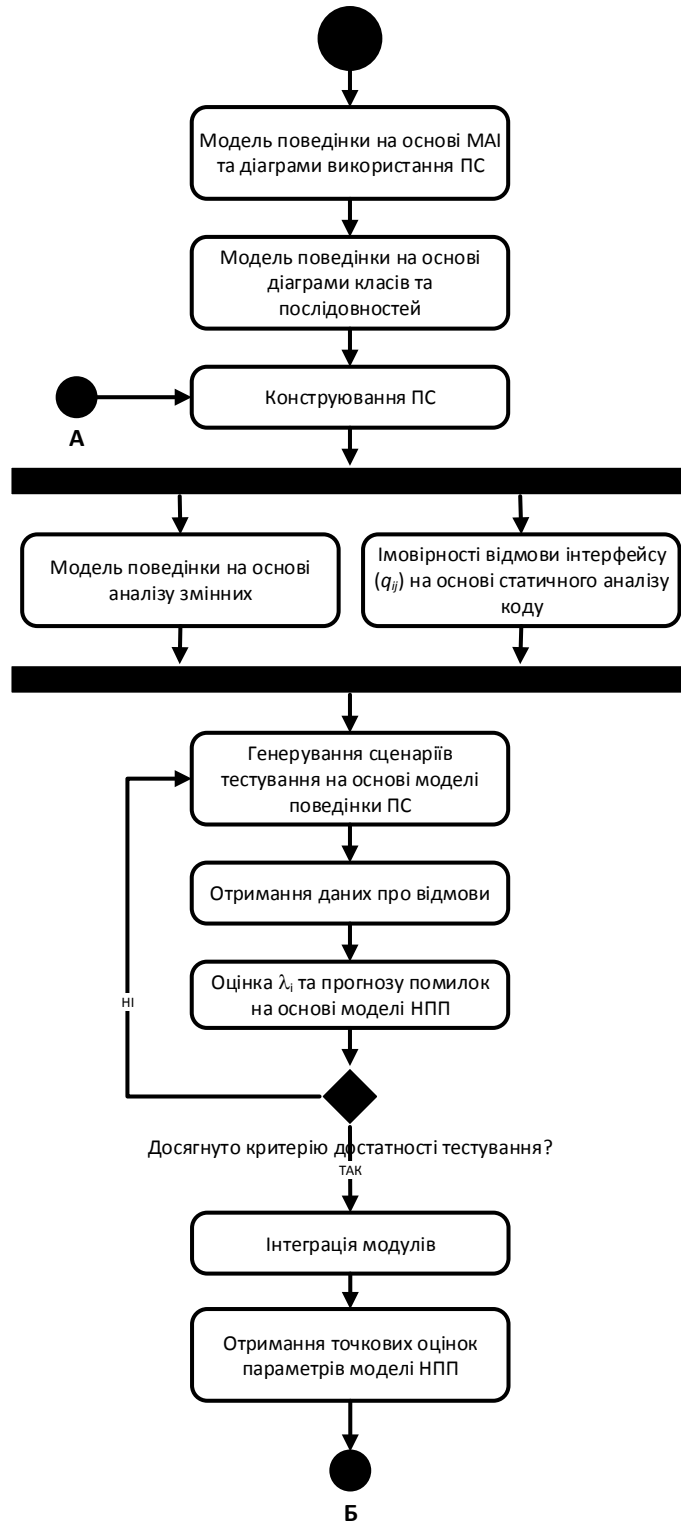


Рис. 4а. Схема узагальненого методу аналізу надійності ПС з урахуванням складності та архітектури на етапах аналізу вимог, проектування, конструювання та модульного тестування.

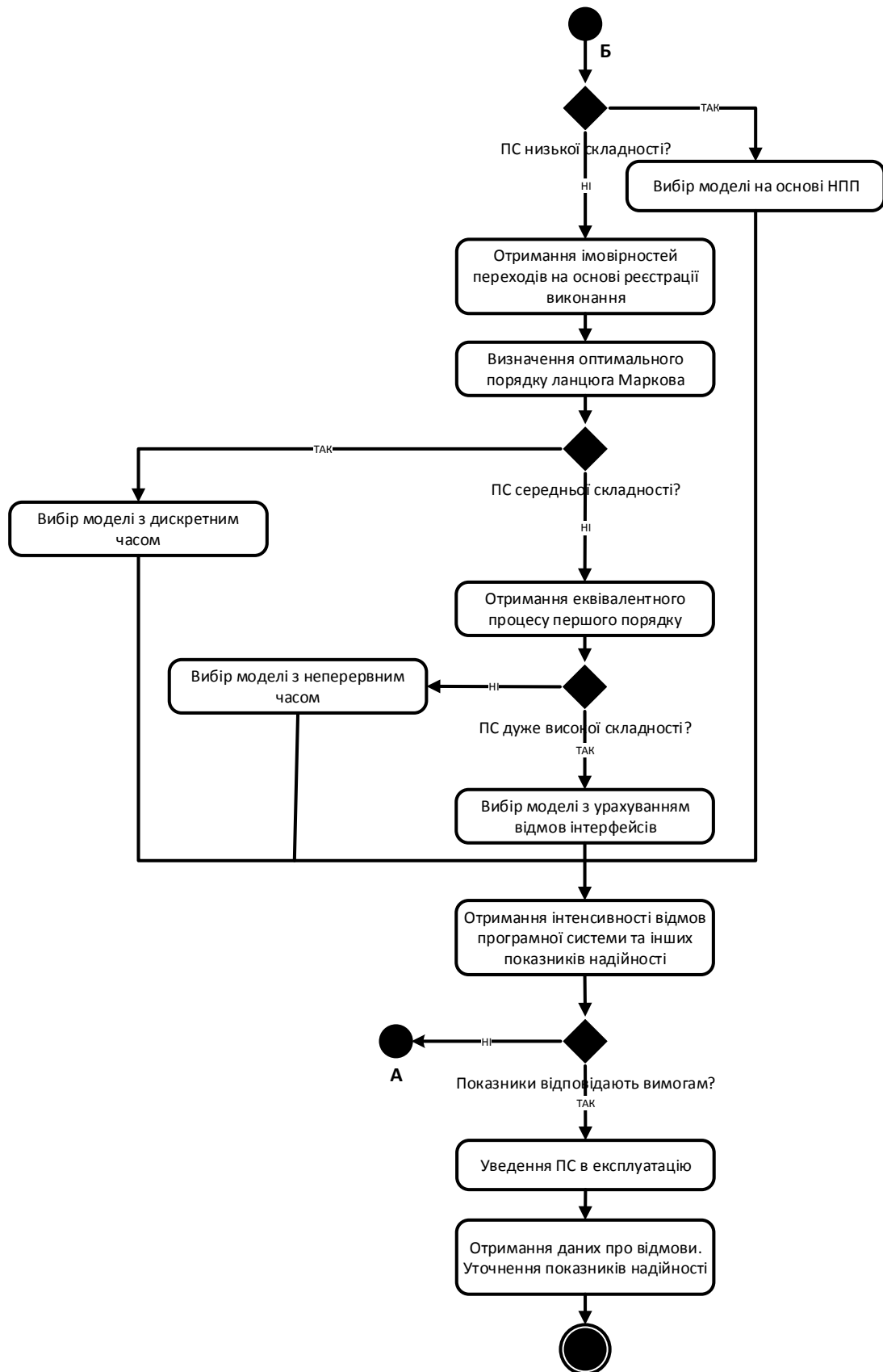


Рис. 4б. Схема узагальненого методу аналізу надійності ПС з урахуванням складності та архітектури на етапах інтеграційного тестування та експлуатації.

Критерій достатності процесу тестування, отриманий з узагальненої МНПС на основі НПП дає можливість надати практичні рекомендації керівникам проектів стосовно розподілу виробничих ресурсів на кожен з етапів ЖЦ ПЗ, а також, після досягнення цього критерію, зі значним ступенем достовірності оцінити кількість невиявлених помилок в ПЗ за допомогою рівняння (3). Значення кількості невиявлених помилок в ПЗ може бути використано як окремий критерій для прийняття рішень в процесі його розроблення, так і, наприклад, в моделях вартості ПЗ, розглянутих в першому розділі дисертаційної роботи. З метою підвищення ступеня точності оцінки кількості невиявлених помилок в ПЗ та/або можливості отримати такі оцінки на більш ранніх стадіях тестування, в роботі запропоновано удосконалену процедуру підтримки прийняття рішення стосовно досягнення заданого рівня надійності ПЗ.

Для цього використано нелінійний регресійний аналіз критеріальної змінної μ_{∞} , отриманої з рівняння (3) відносно предикторів T_i , які означають час припинення тестування. Точкові оцінки параметрів моделі $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\delta}$, використані в рівнянні (3) для отримання відповідного значення $\mu_{\infty} = f(T_i)$, визначені методом максимальної правдоподібності на інтервалі $(0; T_i]$. В якості рівняння регресії використано вираз Вейбулівського типу:

$$\mu_{\infty} = A \left[1 - \exp \left(- (k(T_i - T_c))^d \right) \right], \quad (12)$$

де A, k, d, T_c – деякі коефіцієнти, що визначаються для кожного набору емпіричних даних. З виразу (12) можна отримати прогнозоване значення кількості відмов (помилки) ПЗ за умови $T_i \rightarrow \infty$. Використання описаної процедури та рівняння (12) дає змогу покращити точність прогнозу на 3–5 %, або ж скоротити тривалість тестування в середньому на 30–40%.

Моделі та методи АФСТ ПС. Однією з найновіших технологій для автоматизованого формування сценаріїв тестування ПС є тестування на основі моделі її функціонування. Мова йде про тестування ПС, для якої тестові сценарії частково або цілком формуються з її моделі, яка описує деякі аспекти (частіше функціональні) тестованої ПС. Моделі функціонування ПС повинні відображати її поведінку, оскільки будуть використовуватися для створення тестових стратегій чи середовища тестування.

У дисертаційній роботі розроблено математичну модель функціонування ПС у вигляді орієнтованого графа $G = \{C, P\}$, де C – множина модулів ПС, P – множина переходів між відповідними модулями. Процес виконання ПС зображено за допомогою пройдених шляхів такого графа, кожену вершину якого подано як модуль ПС, що змінює значення множини змінних, а ребра відповідають послідовностям виклику модулів. Така модель дає змогу визначити кількість необхідних сценаріїв тестування для повного покриття тестами функції/методу.

З урахуванням моделі функціонування ПС для формування сценаріїв тестування взаємозв'язки та переходи між станами подаються у вигляді графа. Цей граф можна побудувати методом "білої скриньки" шляхом аналізу коду, що найбільше відповідатиме реальному характеру ПС, або створити методом "чорної

скриньки" за допомогою реєстрації виклику методів. Проте у ньому можливий варіант, що деякі з переходів не будуть враховані.

Кожен сценарій тестування ПС складається з декількох кроків $T^k = \{T_0^k, T_1^k, \dots, T_n^k\}$, де кожен крок сценарію $T_j^k = (C_j^k, V_j^k)$ визначається парою: модулем C_j^k та множиною змінних V_j^k з відповідними класами еквівалентності, що фактично змінюються у цьому програмному модулі. Змінні набувають своїх значень на кожному кроці тесту внаслідок введення даних користувачем, зчитуванням з бази даних тощо. Через це можуть виникнути помилки під час виконання такого сценарію тестування. У відповідності до реального процесу тестування, набори тестів будуються ітераційно, крок за кроком виконуються на ПС з урахуванням виявлених відмов під час формування наступного набору тестів. У роботі наведено методи АФСТ на основі стратегій "чорної" та "білої скриньки".

При описі методу формування множини тестів використано такі позначення: $F_j(C_i)$ – кількість тестів, під час яких зафіксовано відмову, і які включають модуль C_i на j -й ітерації. $Num(C_i)$ – множина номерів усіх модулів, у які можна передати контроль із модуля C_i ; $Com(C_i)$ – множина всіх модулів, у які можна передати контроль із модуля C_i ; N – кількість всіх вершин графа функціонування ПС; TS – набір усіх сценаріїв тестування; $Cov(C_i)$ – міра покриття тестами модуля C_i , v_i – змінна модуля C_i .

Основними кроками методу АФСТ за стратегією "чорної скриньки" є:

1. *Ініціалізація*. Вибір мінімального покриття θ всіх модулів ПЗ та середньої довжини ξ тестового сценарію з досвіду тестувальника. Установлення $TS = \{\}$, номер ітерації тестування $m = 0$, номер тесту $k = 0$.

2. Формування сценарію тестування T^k під час початкового генерування набору тестів:

- а) $j = 0$ – номер кроку такого тесту;
- б) випадковим чином вибирається початковий крок тесту з ймовірністю $p_j^k = 1/N$;
- в) із ймовірністю $p_{j+1}^k = 1/\text{card}(Com(C_j))$ вибирається наступний крок T_{j+1}^k у k -му сценарії; $j++$;
- г) якщо $j \leq \xi$, тоді здійснюється пункт 3;
- д) приєднання сформованого тесту до набору: $TS = TS \cup \{T^k\}$.

3. Перевірка покриття усіх модулів. Якщо $Cov(C_i) < \theta, i = \overline{1, N}$, тоді $k++$ (перехід на крок 2).

4. Виконання усіх розроблених тестів та обчислення $F_m(C_i), i = \overline{1, N}$. Якщо $F_m(C_i) = \emptyset, i = \overline{1, N}$, тоді крок 9, інакше $m++$.

5. Формування m -го набору тестів ($m \geq 1$). $TS = \{\}, k = 0$.

6. Формування T^k сценарію тестування для m -го набору тестів:

- а) $j = 0$ – номер кроку такого тесту;

- б) випадковим чином вибирається номер T_j^k першого кроку тесту, з ймовірністю $p_j^k = \max_{i=1\dots N} F_{m-1}(C_i) / \sum_{l=1}^N F_{m-1}(C_l)$;
- в) із ймовірністю $p_{j+1}^k = \max_{i \in \text{Num}(C_j)} F_{m-1}(C_i) / \sum_{l \in \text{Com}(C_j)} F_{m-1}(C_l)$ обирається наступний крок у T_{j+1}^k сценарії; $j++$;
- г) якщо $j \leq \xi$, тоді здійснюється перехід на пункт 3;
- д) приєднання побудованого тесту до набору: $TS = TS \cup \{T^k\}$.

7. Перевірка покриття усіх модулів. Якщо $\text{Cov}(C_i) < \theta, i = \overline{1, N}$, тоді $k++$, тобто здійснюється перехід на крок 6.

8. Перехід на крок 4.

9. Кінець.

Перевагою стратегії "білої скриньки" є аналіз змінних, які використовуються та змінюються у модулях ПС. Відкинувши змінні, що не використовуються, можна зменшити перебір можливих V_i^{used} – підмножина змінних, яку використовує модуль C_i . Також, проаналізувавши код, можна чітко визначити V_i^{change} – множину, яку може змінювати відповідний модуль C_i .

Алгоритм знаходження оптимального покриття є алгоритмом перебору з відсіканням гілок, який є надлишковим згідно міри покриття $PVC(TS)$ та складності виконання $SM(TS)$. Метод АФСТ за стратегією "білої скриньки" на основі моделі функціонування ПС, передбачає такі кроки:

1. *Ініціалізація*. Формується початкова множина тестових сценаріїв, що складаються лише з одного кроку $TS = \{(C_0, V_0^{change}), (C_1, V_1^{change}), \dots, (C_N, V_N^{change})\}$.

2. *Знаходження повного покриття параметрів змінних коду*. Множина тестових сценаріїв, сформована на попередньому кроці, розширюється таким чином: для сценарію $T = \{(C_0, V_0), (C_1, V_1), \dots, (C_K, V_K)\}$ з множини TS знаходяться усі модулі C_{K+1} , які суміжні модулю C_K і приєднується новий крок (C_{K+1}, V_{K+1}) до сценарію T , де $V_{K+1} = V_{K+1}^{change} \setminus \bigcup_{i=1}^K V_i$. Додається новий сценарій до множини TS , якщо при цьому зростає $PVC(TS)$. Якщо $PVC(TS) = PVC_{max}(TS)$, то здійснюється перехід на крок 3, інакше повторюється крок 2.

3. *Мінімізація складності виконання сценарію тестування*. Для кожного сценарію з множини TS здійснюється перевірка: якщо під час вилучення його з множини TS величина $PVC(TS)$ не змінюється, то видаляємо його, інакше перевіряємо кожен крок (C_K, V_K) , видаляючи з множини V_K ті змінні, які не впливають на $PVC(TS)$.

4. *Перебір класів еквівалентності змінних*. Тестові сценарії з множини TS виконуються для різних вхідних даних таким чином, щоб кожний вхідний параметр набував принаймні одного значення з кожного класу еквівалентності.

5. *Ітераційне виконання тестових сценаріїв*. Після побудови та виконання тестових сценаріїв знаходиться множина модулів $F(C_i)$, у яких виникли помилки.

Якщо $F(C_i) = \emptyset$, то алгоритм закінчується, інакше, починаючи з кроку 1, будується нова множина тестових сценаріїв TS з новим покриттям.

Описаний метод дає змогу формувати сценарії тестування ПС з максимальним покриттям коду при мінімальній складності їхнього виконання, а це підвищує ефективність процесу тестування та усунення помилок ПС, що в свою чергу, покращує його показники надійності.

У **п'ятому розділі** представлено розроблені засоби оцінювання та прогнозування показників надійності ПЗ, придатні для використання в процесі його розроблення.

В дисертації описано реалізацію та застосування програмного засобу попереднього опрацювання даних про відмови ПС, для отримання вхідних даних для моделей надійності типу "чорної скриньки", зокрема МНПС, а також для отримання показників надійності модулів ПС у випадку використання компонентних моделей. Цей програмний засіб призначений для організації попереднього опрацювання даних тестування, отриманих з системи Atlassian JIRA.

Програмну реалізацію засобу здійснено мовою Java з використанням середовища розробки Eclipse Kepler. Інтеграцію з системою JIRA здійснено за допомогою JIRA REST API. Засіб складається з таких програмних модулів:

- модуль аналізу запитів користувача, керування процесом імпортування та інтеграції з системою обліку відмов ПЗ;
- модуль інтеграції з JIRA REST API;
- модуль інтеграції з системою оповіщення;
- модуль імпорту звітів з використанням MS Excel файлів;
- модуль паралельного опрацювання імпортованих звітів про відмови;
- модуль побудови веб-орієнтованого інтерфейсу взаємодії з користувачем.

Для отримання матриці оцінок імовірностей переходів між модулями ПЗ та початкового вектора розподілу, які необхідні для аналізу надійності ПЗ з використанням компонентних моделей, в дисертації розроблено програмний засіб для реєстрації шляхів і часу виконання програмних модулів.

Враховуючи функціональні вимоги до програмного засобу, використовувались елементи аспектно-орієнтованого програмування, а програмну реалізацію здійснено мовою програмування Java за допомогою середовища Spring Tools Suite. Модуль доступу та візуалізації результатів роботи програми реалізовано у вигляді веб-додатку, для можливості отримання зручного доступу до даних з будь-якої платформи.

Програмний засіб оцінювання ймовірностей переходів між модулями ПС складається з таких частин.

1. Аспектно-орієнтований реєстратор, який складається з:

- модуля взаємодії з фреймворком реєстрації та аналізу виконання ПС;
- модуля зчитування та запису налаштувань реєстратора;
- файлу з налаштуваннями реєстратора;
- модуля завантаження об'єкта для модифікації;
- модуля модифікації байт-коду.

2. Фреймворк для реєстрації виконання ПС та аналізу результатів, який складається з:

- модуля збереження результатів реєстрації;
- модуля взаємодії з сховищем даних;
- модуля формування звітів реєстрації;
- модуля аналізу результатів реєстрації;
- модуля управління запитами.

3. Веб-додаток, який складається з таких елементів:

- сервіс взаємодії з фреймворком реєстрації;
- модуль представлення основних моделей та утиліт;
- модуль відображення результатів;
- контролер опрацювання запитів.

Для оцінювання показників надійності програмних систем на основі архітектурних моделей, а також методу автоматизованого формування сценаріїв тестування ПС в роботі розроблено програмний засіб оцінювання надійності ПС "СОН ПЗ". Цей засіб складається з таких функціональних блоків:

- модуль для отримання моделі функціонування ПС;
- модуль АФСТ на основі моделі функціонування ПС;
- модуль для оцінювання показників надійності ПС з використанням ЛМВП.

В роботі модуля побудови моделі функціонування ПС використовується засіб оцінювання ймовірностей переходів між модулями програмної системи, а в роботі модуля оцінювання показників надійності ПС з використанням ЛМВП використовуються результати роботи засобу попереднього опрацювання даних про відмови ПС. Інформація про передавання управління між модулями досліджуваного ПС та тривалість їх виконання зберігається в базі даних.

Призначення модуля створення моделі функціонування ПС – отримання інформації про передавання управління між відповідними модулями для знаходження матриці оцінок ймовірностей переходів та часу виконання модулів ПС, а також аналіз коду досліджуваної ПС для визначення змінних кожного модуля та їх правильних і неправильних класів еквівалентності. Така модель функціонування ПС є основою як для автоматизованого формування набору сценаріїв тестування, так і для оцінювання показників надійності ПС.

Модуль автоматизованого формування сценаріїв тестування ПС забезпечує формування сценаріїв тестування для досліджуваної ПС за стратегіями "чорної" та "білої скриньки" з урахуванням метрики покриття значень параметрів коду.

Функціями модуля оцінювання показників надійності ПС є визначення порядку марковського процесу, який використовується для моделювання взаємодії модулів ПС, а також оцінювання ймовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов ПС на основі отриманих даних та з використанням ЛМВП.

Програмний засіб "СОН ПЗ" реалізовано мовою програмування C#, а основні функції винесено у вигляді динамічної бібліотеки DLL (dynamic link library), що дає можливість як легкого підключення цієї бібліотеки до існуючих програмних

засобів, так і розширення функціональних можливостей засобу шляхом додавання нових моделей надійності чи засобів отримання параметрів таких моделей.

Прогнозування відмов ПС засобами нейронних мереж. До перспективних методів прогнозування надійності ПС, зокрема кількості відмов можуть бути методи на основі непараметричних моделей. Такі моделі позбавлені основних недоліків та труднощів аналітичних моделей, оскільки не вимагають жодних припущень про механізм відмов ПС. Вони покладені в основу альтернативного методу прогнозування кількості помилок в ПЗ для забезпечення достовірності результату. В останні два десятиліття все більшого поширення набувають методи прогнозування часових рядів (в т.ч. надійності ПС) на основі нейронних мереж (НМ). Одним з нових класів НМ є мережі на основі радіально-базисних функцій (RBF), які володіють великою швидкістю навчання та успішно використовуються для задач апроксимації невідомих функцій.

В дисертації розроблено програмний засіб для прогнозування відмов ПС, представлених у вигляді часових рядів, отриманих з результатів тестування чи повідомлень про відмови на етапі експлуатації ПС, з використанням НМ RBF та НМ Елмана. Програмна реалізація модулів НМ RBF та НМ Елмана створена за допомогою бібліотеки Encog. Діаграму компонентів засобу прогнозування відмов ПС на основі НМ зображено на рис. 5.

Інтерфейс користувача, зображений на рис. 6, спроектовано таким чином щоб програмний засіб для прогнозування відмов ПС міг підтримувати різні модулі реалізацій НМ.

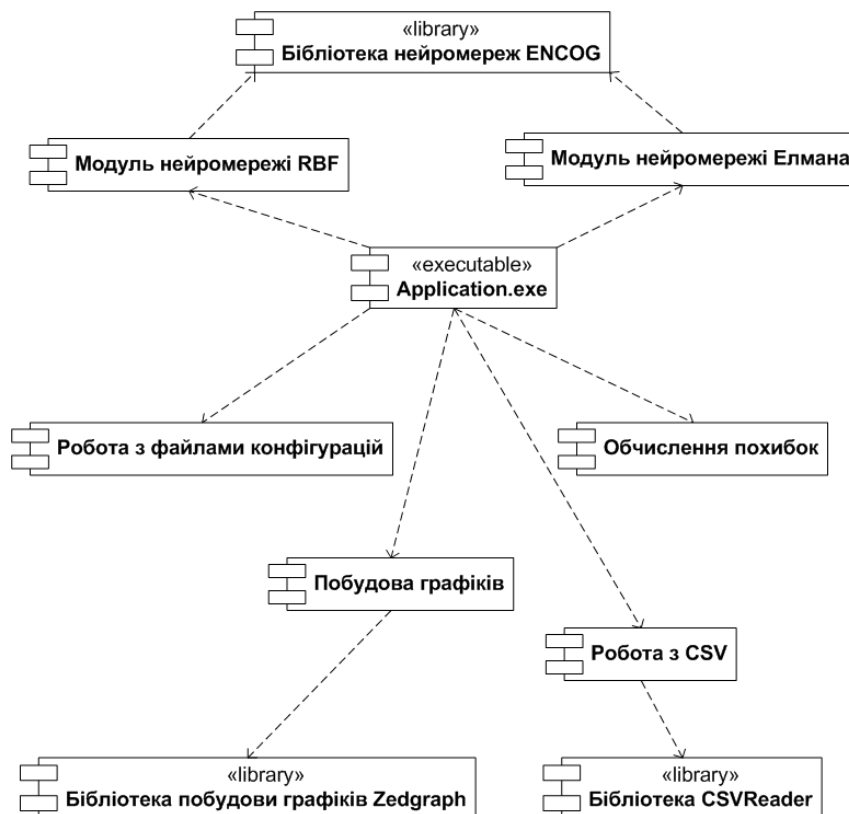


Рис. 5. Діаграма компонентів програмного засобу прогнозування відмов ПС.

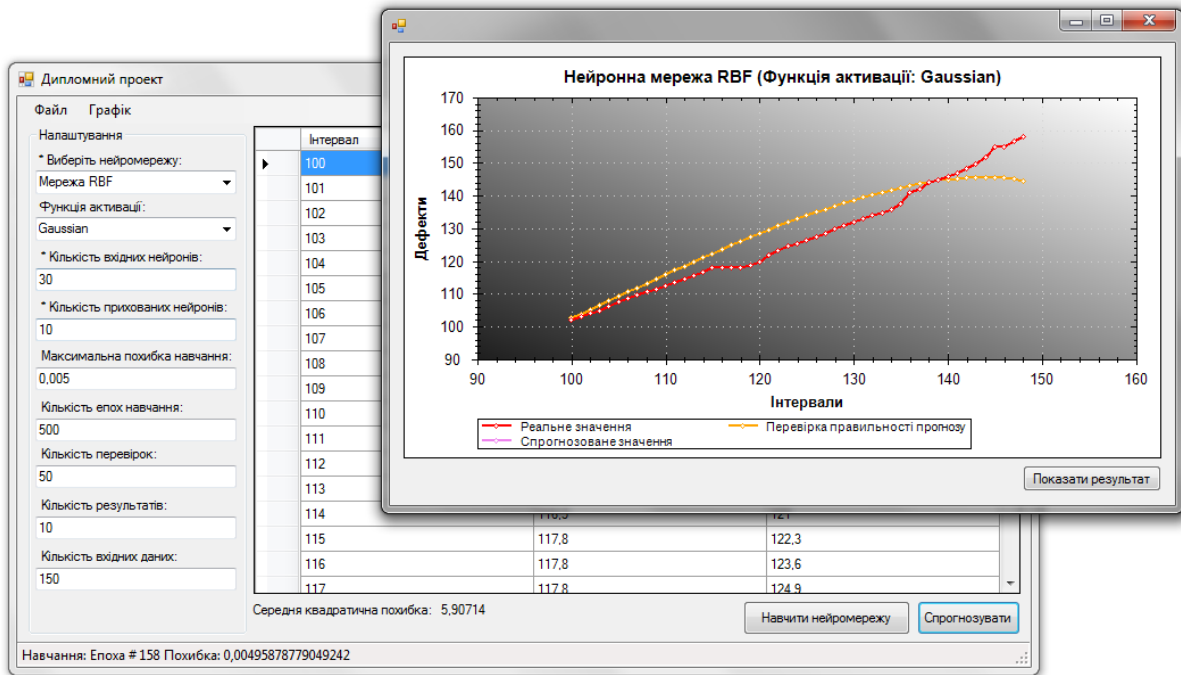


Рис. 6. Інтерфейс користувача програмного засобу прогнозування відмов ПС.

Вхідними даними для навчання НМ та прогнозування відмов ПС були часові ряди, отримані на основі результатів тестування двох програмних систем з відкритим вихідним кодом: веб-браузера Chromium та операційної системи Chromium-OS. Кожна точка часового ряду являла собою значення кількості відмов на часовому інтервалі, на які розбивався весь діапазон тривалості тестування. Усі результати тестування ПС розбивали на 150 однакових часових інтервалів. Перших 100 інтервалів використовували для навчання НМ, а останніх 50 – для перевірки точності прогнозу (прогнозовані НМ результати порівнювались з цими контрольними значеннями). Для оцінки ефективності прогнозування використовували такі параметри: кількість епох навчання, яка характеризувала швидкість навчання НМ; коефіцієнт детермінації (R^2), та середню квадратичну похибку апроксимації.

Для дослідження впливу функції активації НМ Елмана на ефективність прогнозування відмов ПС проведено дві серії експериментів, в яких використовувались такі функції активації: лінійна, синус та гіперболічний тангенс. У першій серії конструювалась НМ з 10 нейронами вхідного шару та 30 нейронами прихованого шару. В другій серії експериментів НМ містила 30 нейронів у вхідному шарі та 10 – у прихованому. Навчання НМ здійснювалось до досягнення похибки 0,005 або ж до 5000 епох навчання, залежно, що наставало раніше.

У першому експерименті оптимальною функцією активації НМ є гіперболічний тангенс. Натомість у другому експерименті (з іншою кількістю нейронів у вхідному та прихованому шарах) ця функція активації є найгіршою серед досліджених функцій, незважаючи на швидке навчання (92 епохи). У другому випадку оптимальною є лінійна функція активації – доволі значна тривалість навчання при найкращому значенні середньої квадратичної похибки апроксимації та дещо гіршому коефіцієнті детермінації. Використання лінійної

функції активації може бути доцільним для обох проведених експериментів – в обох випадках результати прогнозування є задовільними. Отже, рекурентна НМ Елмана здатна прогнозувати відмови складних програмних систем з достатньою точністю (середня квадратична похибка апроксимації не більше 10 %).

Залежність середньої квадратичної похибки апроксимації від кількості нейронів вхідного шару у випадку прогнозування відмов браузера Chromium наведено на рис. 7 для функції активації Gaussian. З цього рисунку видно, що занадто велика кількість нейронів вхідного шару призводить до значного зростання похибки прогнозування, що в загальному може бути пояснено труднощами апроксимації випадкового процесу без явно вираженого розподілу протягом тривалого проміжку часу.

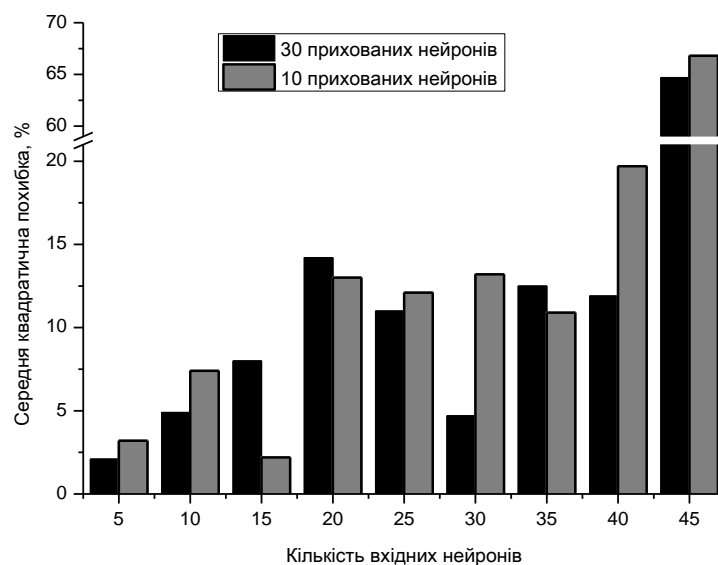


Рис. 7. Залежність середньої квадратичної похибки апроксимації від кількості нейронів вхідного шару у випадку використання функції активації Gaussian.

Для порівняння точності прогнозу часових рядів відмов різних ПС на рис. 8 наведено залежність середньої квадратичної похибки апроксимації від конфігурації НМ (поданої на рисунку у вигляді двох чисел $n - m$, де n – кількість нейронів вхідного шару, m – кількість нейронів прихованого шару) у випадку використання функції активації Gaussian для обох досліджуваних ПС. Як видно з рис. 8, тенденція зміни точності прогнозу в залежності від конфігурації НМ є однаковою для обох ПС – значне зростання похибки зі зростанням кількості нейронів вхідного шару та менші в цілому значення похибки для конфігурації з десятьма нейронами прихованого шару.

При використанні НМ RBF найкращі результати прогнозування відмов ПС отримані в конфігурації з функцією активації Inverse Multiquadric, 10 нейронами у вхідному шарі та 30 нейронами у прихованому. У такій конфігурації середня квадратична похибка апроксимації досягає 1,0%, а коефіцієнт детермінації між прогнозованою та контрольною вибірками – 0,9965. Разом з тим, за рахунок незначного погіршення точності прогнозу до 1,7%, можна зменшити тривалість

навчання НМ у 3–6 разів завдяки використанню функції активації Gaussian з 15 вхідними нейронами при десяти нейронах прихованого шару.

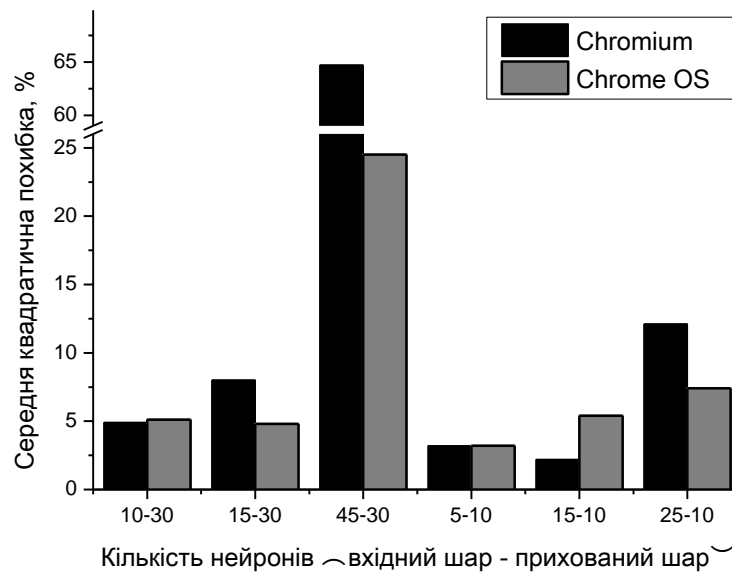


Рис. 8. Залежність середньої квадратичної похибки апроксимації від конфігурації НМ у випадку використання функції активації Gaussian.

У такій конфігурації відносна середня квадратична похибка апроксимації становить 1,7%, а коефіцієнт детермінації між прогнозованою та контрольною вибірками – 0,9969. Отримання подібних результатів для двох різних за характеристиками програмних систем дає підстави для висновку, що отримана конфігурація НМ RBF може бути успішно використана для прогнозування часових рядів зі схожими характеристиками – однорідний процес відмов, представлений у вигляді кумулятивного часового ряду.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему створення моделей, методів та засобів аналізу надійності програмних систем підвищеного ступеня адекватності, що враховують процеси життєвого циклу ПЗ, його архітектуру та складність. Отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. Розроблено модель надійності ПЗ з показником складності на основі неоднорідного пуассонового процесу, яка, на відміну від наявних, враховує складність ПЗ і належить до узагальнених моделей на основі неоднорідного пуассонового процесу. Зокрема, модель надійності Goel – Okumoto є частковим випадком цієї моделі при $s = 0$, а S-подібна модель надійності – при $s = 1$.
2. Використання моделі надійності ПЗ з показником складності дає можливість підвищити точність оцінки кількості невиявлених помилок у програмі на 3–7 %, а точність оцінки інтенсивності відмов ПЗ до трьох порядків порівняно з найбільш поширеними моделями надійності цього класу. При цьому моделі Goel – Okumoto та S-подібна дають занижені значення інтенсивності відмов ПЗ,

що призводить до завищених значень функції та коефіцієнта готовності ПАС, до складу яких входить це ПЗ.

3. Розроблено метод оцінювання показників надійності ПЗ з урахуванням його складності, але без урахування архітектури, який базується на моделі надійності ПЗ з показником складності та критерії достатності процесу тестування, що дає можливість більш достовірно оцінювати показники надійності ПЗ.
4. Розроблено три моделі оцінювання показників надійності складних програмних систем, що використовують ланцюги Маркова вищого порядку – з дискретним часом; з неперервним часом; з неперервним часом та урахуванням відмов інтерфейсів модулів. Ці моделі, на відміну від наявних, враховують вплив потоку управління на інтенсивність відмов програмної системи, та відмови при передачі управління між модулями, що дає можливість підвищити достовірність оцінювання показників надійності програмних систем на 6–10 % у випадку використання моделі з дискретним часом та на 10–20 % у випадку моделі з неперервним часом.
5. Розроблено метод подання марковського процесу вищого порядку у вигляді еквівалентного процесу першого порядку з віртуальними станами для програмних систем, в яких існує взаємозалежність виконання модулів, що дає можливість звести роботу з ланцюгами Маркова вищого порядку до класичних ланцюгів Маркова. Перевагою цього методу є можливість застосування до марковських процесів будь-якого порядку (в тому числі змінного) та безпосереднє використання отриманої матриці інтенсивностей переходів для побудови системи рівнянь Колмогорова – Чепмена.
6. Розроблено узагальнений метод аналізу надійності програмних систем з урахуванням їх складності, архітектури та етапів ЖЦ. Цей метод, на відміну від інших, базується на побудованих моделях надійності та засобах отримання параметрів цих моделей, та дає можливість оцінювання та прогнозування показників надійності програмних систем на різних етапах ЖЦ.
7. На основі побудованих моделей і методів показано шляхи підвищення ефективності розробки ПЗ з урахуванням вимог до його надійності, які містять: критерій достатності процесу тестування; метод прогнозування кількості невиявлених помилок в ПЗ; модель функціонування програмних систем з урахуванням змінних коду та архітектури; методи автоматизованого формування сценаріїв тестування ПЗ за стратегіями "чорної" і "білої скриньки".
8. Використання критерію достатності процесу тестування виступає як числова метрика, на основі якої можна приймати рішення стосовно процесу тестування ПЗ. Метод прогнозування кількості невиявлених помилок в ПЗ дає можливість покращити точність оцінки кількості невиявлених помилок на 3–5 %, або ж скоротити тривалість тестування на 30–40 % (при збереженні точності прогнозу кількості невиявлених помилок). Засоби автоматизованого формування сценаріїв тестування забезпечують рівномірне покриття програмного коду тестами та дають можливість зменшити часові, фінансові та людські ресурси на

етапі тестування; на основі побудованої моделі функціонування програмних систем розроблено рекомендації щодо вибору стратегії тестування ПЗ.

9. Показано, що рекурентна нейронна мережа Елмана при належному підборі параметрів її архітектури здатна прогнозувати відмови програмних систем значного ступеня складності з достатньою точністю (середня квадратична похибка апроксимації не більша 6–10 %). При використанні нейронної мережі RBF найкращі результати прогнозування відмов програмних систем отримують в конфігурації з функцією активації "Inverse Multiquadric", 10 нейронами у вхідному шарі та 30 нейронами у прихованому. У такій конфігурації середня квадратична похибка апроксимації сягає 1,0%, а коефіцієнт детермінації між прогнозованою та контрольною вибірками – 0,9965. Разом з тим, за рахунок незначного погіршення точності прогнозу до 1,7%, можна зменшити тривалість навчання нейронної мережі у 3–6 разів завдяки використанню функції активації Гауса з 15 вхідними нейронами при 10 нейронах прихованого шару.
10. Розроблені моделі та методи реалізовані у вигляді програмних засобів, які дають можливість здійснювати оцінювання показників надійності програмних систем на основі архітектурного підходу та прогнозувати відмови програмних систем з використанням штучних нейронних мереж. Ефективність розроблених програмних засобів підтверджується результатами їх впровадження у виробничі процеси ДП НДІ "Система" та ПП "Лінк Ап Студіо".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем : монографія / Ю. Я. Бобало, Б. Ю. Волочій, О. Ю. Лозинський, Б. А. Мандзій, Л. Д. Озирковський, Д. В. Федасюк, С. В. Щербовських, В. С. Яковина ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – 300 с.
2. Моделі, методи та засоби аналізу надійності програмних систем : монографія / Яковина В. С., Федасюк Д. В., Сенів М. М., Нитребич О. О. ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 220 с.
3. Software reliability assessment using high-order Markov chains / V. Yakovyna, D. Fedasyuk, O. Nytrebych, Iu. Parfenyuk, V. Matselyukh // International Journal of Engineering Science Invention. – 2014. – Vol. 3, Issue 7. – P. 1–6.
4. Variable state-based software usage-model based on its variables / D. Fedasyuk, V. Yakovyna, P. Serdyuk, O. Nytrebych // Econtechmod. – 2014. – Vol. 3, № 2. – P. 15–20.
5. Яковина В. С. Метод аналізу надійності програмних засобів з урахуванням їх складності / В. С. Яковина // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2015. – № 2 (72). – С. 127–133.
6. Яковина В. С. Компонентні моделі надійності програмного забезпечення вищого порядку / В. С. Яковина // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2015. – № 19 (95). – С. 252–255.

7. Yakovyna V. S. Software failures prediction using RBF neural network / V. S. Yakovyna // *Праці Одеського політехнічного університету*. – 2015. – Вип. 2 (46). – С. 111–118.
8. Муляк О. В. Вплив моделей надійності програмних засобів на показники надійності програмно-апаратних систем / О. В. Муляк, В. С. Яковина, Б. Ю. Волочій // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. – Т. 4, № 9 (76). – С. 53–57.
9. Критерій достатності процесу тестування програмного забезпечення / Яковина В. С., Сенів М. М., Чабанюк Я. М., Федасюк Д. В., Хімка У. Т. // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. – 2010. – № 672 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 346–358.
10. Аналіз використання моделі надійності програмного забезпечення з динамічним показником складності проекту протягом життєвого циклу / Сенів М. М., Федасюк Д. В., Чабанюк Я. М., Яковина В. С. // *Комп'ютерні технології друкарства*. – 2010. – № 24. – С. 107–122.
11. Яковина В. С. Моделювання параметра потоку відмов програмного забезпечення та визначення діапазонів показника його складності / В. С. Яковина // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. – 2014. – № 806 : Комп'ютерні системи та мережі. – С. 296–302.
12. Метод оцінювання та прогнозування надійності програмного забезпечення на основі моделі з динамічним показником величини проекту / Максим Сенів, Віталій Яковина, Ярослав Чабанюк, Дмитро Федасюк // *Комп'ютинг*. – 2011. – Т. 10, Вип. 2. – С. 97–107.
13. Метод побудови сценаріїв тестування програмного забезпечення на основі аналізу його змінних / Д. В. Федасюк, В. С. Яковина, П. В. Сердюк, О. О. Нитребич // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. – 2014. – № 2 (30). – С. 50–58.
14. Яковина В. С. Удосконалена процедура прогнозування відмов програмних засобів на основі моделі надійності з індексом складності / Яковина В. С., Федасюк Д. В. // *Інженерія програмного забезпечення*. – 2015. – № 2 (22). – С. 5–13.
15. Оцінювання та прогнозування надійності програмного забезпечення на основі моделі з індексом складності проекту / В. С. Яковина, Я. М. Чабанюк, М. М. Сенів, У. Т. Хімка // *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія : Технічні науки. – 2011. – № 2 (174). – С. 149–157.
16. Використання марковських ланцюгів вищого порядку в задачах моделювання надійності програмного забезпечення / В. Яковина, П. Сердюк, О. Нитребич, Д. Федасюк // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. – 2013. – № 771 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 209–213.
17. Яковина В. С. Використання засобів UML для прогнозування надійності програмного забезпечення на етапі його проектування / В. С. Яковина, Ю. І. Парфенюк // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. – 2013. – № 773 : Комп'ютерні системи та мережі. – С. 151–156.

18. Яковина В. С. Прогнозування відмов програмного забезпечення з використанням НМ на основі радіально-базисних функцій / В. С. Яковина // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2014. – № 805 : Інформаційні системи та мережі. – С. 230–236.

19. Яковина В. С. Використання інформаційного критерію Акаїке в задачах моделювання надійності програмного забезпечення / В. Яковина, О. Нитребич, Д. Федасюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2012. – № 732 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 190–192.

20. Яковина В. С. Аналіз використання інформаційних критеріїв у моделях оцінки надійності програмного забезпечення / В. С. Яковина, Д. В. Федасюк, О. О. Нитребич // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Нові рішення в сучасних технологіях. – 2014. – № 26 (1069). – С. 108–115.

21. Система оцінювання та прогнозування надійності програмного забезпечення / Сенів М. М., Федасюк Д. В., Парфенюк Ю. І., Яковина В. С., Чабанюк Я. М. // Відбір і обробка інформації. – 2010. – № 33 (109). – С. 123–129.

22. Сенів М. М. Розробка методу оцінювання і прогнозування надійності програмного забезпечення з врахуванням критерію достатності процесу тестування / М. Сенів, Д. Федасюк, В. Яковина // Комп'ютерні технології друкарства. – 2011. – № 25. – С. 72–83.

23. Яковина В. С. Огляд основних підходів до аналізу надійності програмного забезпечення / В. Яковина, В. Смірнов // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2011. – № 719 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 278–282.

24. Яковина В. С. Вдосконалений протокол взаємної аутентифікації на основі смарт-карт для побудови модуля захисту розподіленої системи теплового проектування / Яковина В. С., Одуха О. В. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2009. – № 650 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 214–221.

25. Дослідження характеристик криптостійкості алгоритму симетричного шифрування DES / В. С. Яковина, Д. В. Федасюк, С. І. Салій, М. М. Сенів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2008. – № 626 : Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. – С. 55–62.

26. Дослідження основних характеристик алгоритму симетричного шифрування RC5 для побудови модуля захисту розподіленої системи теплового проектування / В. Яковина, О. Одуха, М. Сенів, О. Білас // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2008. – № 616 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 143–150.

27. Порівняння швидкодії програмної реалізації алгоритмів симетричного (DES) та асиметричного (RSA) шифрування / В. Яковина, Д. Федасюк, М. Сенів, О. Білас // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2007. – № 598 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 181–185.

28. Побудова і дослідження моделі надійності програмного забезпечення з індексом величини проекту / Я. М. Чабанюк, В. С. Яковина, Д. В. Федасюк,

М. М. Сенів, У. Т. Хімка // Інженерія програмного забезпечення. – 2010. – № 1. – С. 24–29.

29. Яковина В. С. Аналіз використання аспектно-орієнтованого програмування як засобу підвищення надійності програмного забезпечення / В. С. Яковина, Д. В. Федасюк, Н. М. Мамроха // Інженерія програмного забезпечення. – 2010. – № 2. – С. 24–29.

30. Yakovyna V. S. Discrete and continuous time high-order Markov models for software reliability assessment [Електронний ресурс] / Vitaliy Yakovyna, Oksana Nytrebych // ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer (ICTERI 2015) : Proceedings of the 11th International Conference, 14–16 May 2015, Lviv. – P. 419–431. – Режим доступу : http://ceur-ws.org/Vol-1356/paper_62.pdf

31. Yakovyna V. S. Influence of RBF neural network input layer parameters on software reliability prediction / V. Yakovyna // Inductive Modelling (ICIM'2013) : Proceedings of the 4-th International Conference, 16–20 September 2013, Kyiv. – Kyiv, 2013. – P. 344–347.

32. Information model of data representation for software reliability estimation framework / Fedasyuk D. V., Seniv M. M., Yakovyna V. S., Mamrokhа N. M. // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2009) : Proceedings of the Xth International Conference, 24–28 February 2009, Lviv–Polyana. – Lviv, 2009. – P. 287–291.

33. Dataware and software of client-server system for software reliability indexes evaluation / Seniv M. M., Yakovyna V. S., Parfenyuk Y. I., Lobutskа O. I., Noha Y. M. // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2011) : Proceedings of the XIth International Conference, 23–25 February 2011, Lviv–Polyana. – Lviv, 2011. – P. 324–326.

34. Yakovyna V. S. Determination of transition probabilities between software components, written in Java, based on monitoring of its execution / Yakovyna V., Parfeniuk Iu. // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013) : Proceedings of the 12th International Conference, 19–23 February 2013, Lviv–Polyana. – Lviv, 2013. – P. 382–383.

35. Yakovyna V. S. Markov chain dynamic representation model for reliability testing / Yakovyna V., Serdyuk P., Nytrebych O. // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013) : Proceedings of the 12th International Conference, 19–23 February 2013, Lviv–Polyana. – Lviv, 2013. – P. 384–385.

36. Reliability estimation of embedded systems with software is presented by piecewise linear function / B. Volochiy, L. Ozirkovskyi, M. Miskiv, V. Yakovyna, O. Mulyak // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2014) : Proceedings of the XIIth International Conference, 25 February – 1 March 2014, Lviv–Slavske. – Lviv, 2014. – P. 255–257.

37. Yakovyna V. S. Introduction to reliability development lifecycle / V. Yakovyna // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science

(TCSET'2014) : Proceedings of the XIIth International Conference, 25 February – 1 March 2014, Lviv–Slavske. – Lviv, 2014. – P. 192–194.

38. Yakovyna V. S. Influence of the activation function of RBF neural network on software reliability time series prediction / V. Yakovyna, V. Ketsman // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH'2012) : Proceedings of the VIIIth International Conference, 18–21 April 2012, Polyana. – Lviv, 2012. – P. 91–92.

39. Yakovyna V. S. On using AIC in software reliability modeling / V. Yakovyna, D. Fedasyuk, O. Nytrebych // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH'2012) : Proceedings of the VIIIth International Conference, 18–21 April 2012, Polyana. – Lviv, 2012. – P. 93–94.

40. Yakovyna V. S. Determination of transition probabilities between software components on the design stage / V. Yakovyna, Iu. Parfeniuk // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2013) : Proceedings of the IXth International Conference, 16–20 April 2013, Polyana. – Lviv, 2013. – P. 156–157.

41. Yakovyna V. S. The use of modern software development tools to analyze its reliability / V. Yakovyna, Iu. Parfeniuk // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2014) : Proceedings of the Xth International Conference, 22–24 June 2014, Lviv. – Lviv, 2014. – P. 112–114.

42. Algorithm for automated test scenario construction / D. Fedasyuk, V. Yakovyna, P. Serdyuk, O. Nytrebych // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2014) : Proceedings of the Xth International Conference, 22–24 June 2014, Lviv. – Lviv, 2014. – P. 59–62.

43. Яковина В. С. Удосконалена процедура визначення кількості дефектів програмного продукту на ранніх етапах тестування / Яковина В. С., Сенів М. М., Гаранджа І. Я. // Міжнародна наукова конференція "Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту" (ISDMCI'2012) : збірка наукових праць, 27–31 травня 2012, Євпаторія. – Херсон, 2012. – С. 238.

44. Яковина В. С. Вплив кількості вхідних нейронів мережі RBF з функцією активації Гаусса на ефективність прогнозування відмов програмного забезпечення / Яковина В. С., Гаранджа І. Я. // Міжнародна наукова конференція "Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту" (ISDMCI'2013) : збірка наукових праць, 20–24 травня 2013, Євпаторія. – Херсон, 2013. – С. 520–522.

45. Яковина В. С. Аспектна декомпозиція компонентів захисту розподіленої системи теплового проектування / В. Яковина, Н. Мамроха, М. Сенів // "Інтернет – Освіта – Наука – 2008" (ІОН-2008) : збірник матеріалів 6-ої міжнародної конференції, 7–11 жовтня 2008, Вінниця. – Вінниця, 2008. – Т. 2. – С. 407–410.

46. Architecture of software system for the software reliability evaluation and prediction / M. Seniv, D. Fedasyuk, Yu. Parfenyuk, V. Yakovyna, Ya. Chabanyuk // Computer Science and Information Technologies (CSIT 2010) : Proceedings of the Vth International Scientific and Technical Conference, 14–16 October 2010, Lviv. – Lviv, 2010. – P. 164–167.

47. On the possibility of software reliability prediction using RBF neural network / V. Yakovyna, O. Synytska, T. Kremen, V. Smirnov // Computer Science and Information Technologies (CSIT 2011) : Proceedings of the VIth International Scientific and Technical Conference, 16–19 November 2011, Lviv. – Lviv, 2011. – P. 39–42.
48. Yakovyna V. S. Review of architecture-based software reliability models / V. Yakovyna, O. Nytrebych // Computer Science and Information Technologies (CSIT 2011) : Proceedings of the VIth International Scientific and Technical Conference, 16–19 November 2011, Lviv. – Lviv, 2011. – P. 106–109.
49. Yakovyna V. S. Modified high-order software reliability Gokhale model / V. Yakovyna, O. Nytrebych, D. Fedasyuk // Computer Science and Information Technologies (CSIT 2012) : Proceedings of the VIIth International Scientific and Technical Conference, 20–24 November 2012, Lviv. – Lviv, 2012. – P. 194–195.
50. Yakovyna V. S. Evaluation matrix transition probabilities between software components based on UML use case diagram / V. Yakovyna, Iu. Parfeniuk // Computer Science and Information Technologies (CSIT 2012) : Proceedings of the VIIth International Scientific and Technical Conference, 20–24 November 2012, Lviv. – Lviv, 2012. – P. 196–197.
51. Yakovyna V. S. The model for software reliability estimation using high-order continuous-time Markov chains / V. Yakovyna, V. Masyukevych // Computer Science and Information Technologies (CSIT'2014) : Proceedings of the IXth International Scientific and Technical Conference, 18–22 November 2014, Lviv. – Lviv, 2014. – P. 83–86.
52. Кремень Т. І. Використання НМ Елмана для прогнозування надійності програмного забезпечення / Т. Кремень, В. Яковина, О. Синицька // Комп'ютерні науки та інженерія (CSE-2011) : матеріали V міжнародної конференції молодих вчених, 24–26 листопада 2011, Львів. – Львів, 2011. – С. 88–89.
53. Yakovyna V. S. The representation of high order Markov process through equivalent first order process [Електронний ресурс] / V. Yakovyna, O. Nytrebych, D. Fedasyuk // Computer Science and Engineering 2013 (CSE-2013) : Proceedings of the 6th International Academic Conference of Young Scientists, 21–23 November 2013, Lviv. – Lviv, 2013. – P. 216–217. – CD-ROM. – Заг. з етикетки диска.
54. Яковина В. С. До питання про визначення діапазонів значень індексу складності програмного засобу / В. С. Яковина, В. І. Коцун // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті (СІТЕМ-2011) : матеріали II всеукраїнської науково-практичної конференції, 18 листопада 2011, Львів. – Львів, 2011. – С. 140–143.
55. Яковина В. С. Про ефективність НМ Елмана для прогнозування відмов програмного забезпечення / В. С. Яковина, В. Д. Кецман // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті (СІТЕМ-2012) : матеріали III всеукраїнської науково-практичної конференції, 21 листопада 2012, Львів. – Львів, 2012. – С. 223–227.

АНОТАЦІЇ

Яковина В.С. Методи та засоби аналізу надійності функціонування програмного забезпечення з урахуванням етапів життєвого циклу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора 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, 2016.

У дисертації вирішено науково-прикладну проблему створення моделей, методів та засобів аналізу надійності програмного забезпечення (ПЗ), що враховують його складність, архітектуру та етапи життєвого циклу.

Розроблено модель надійності ПЗ з показником складності на основі неоднорідного пуассонового процесу, яка, на відміну від існуючих, враховує складність ПЗ і належить до класу узагальнених пуассонових моделей. Розроблено метод оцінювання показників надійності ПЗ, який базується на моделі надійності з показником складності та критерії достатності процесу тестування, що дає можливість більш достовірно оцінювати показники надійності ПЗ з урахуванням їх складності, але без урахування їх архітектури. Розроблено три моделі оцінювання показників надійності складних програмних систем, що використовують ланцюги Маркова вищого порядку – з дискретним часом; з неперервним часом; з неперервним часом та урахуванням відмов інтерфейсів модулів. Розроблено метод подання марковського процесу вищого порядку через еквівалентний процес першого порядку, що дає можливість звести роботу з ланцюгами Маркова вищого порядку до класичних ланцюгів Маркова. Розроблено узагальнений метод аналізу надійності ПЗ з урахуванням його складності, архітектури та процесів життєвого циклу. Розроблено програмний засіб прогнозування відмов ПЗ з використанням штучних нейронних мереж та досліджено вплив параметрів та архітектури нейронних мереж Елмана та RBF на ефективність прогнозування відмов ПЗ.

Ключові слова: програмне забезпечення, надійність, програмно-апаратна система, модель надійності, марковський процес вищого порядку, неоднорідний пуассонів процес.

Яковина В.С. Методы и средства анализа надежности функционирования программного обеспечения с учетом этапов жизненного цикла. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора 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, 2016.

В диссертации решена научно-прикладная проблема создания моделей, методов и средств анализа надежности программного обеспечения (ПО), учитывающие его сложность, архитектуру и этапы жизненного цикла.

В первой главе проведен анализ современного состояния теории и практики анализа надежности ПО и тенденций их развития. Осуществлен сравнительный

анализ подходов к трактовке свойства надежности программных и аппаратных средств, показаны наиболее существенные различия и задачи анализа их надежности. Осуществлен обзор и анализ моделей надежности ПО, при этом особое внимание уделено моделям на основе неоднородного пуассоновского процесса и моделям на основе компонентного подхода; показаны основные ограничения и недостатки существующих моделей и возможные пути их устранения. Показано, что существующие модели и методы анализа надежности ПО не учитывают его возрастающей сложности и не обеспечивают необходимый уровень точности оценки показателей его надежности.

Во второй главе рассмотрена модель надежности ПО на основе неоднородного пуассоновского процесса, которая включает в качестве параметра динамический показатель сложности программного средства. Эта модель используется для оценки таких показателей надежности ПО, как общее количество ошибок в коде, параметр потока отказов, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и т.д., по результатам его тестирования. Исследованы зависимости между параметрами модели и установлены диапазоны показателя сложности ПО. Рассматриваемая модель надежности ПО, за счет введения динамического показателя сложности, относится к классу обобщенных моделей на основе неоднородного пуассоновского процесса и позволяет определять показатели надежности ПО с большей степенью достоверности по сравнению с известными моделями этого класса. Приведены результаты исследования влияния модели надежности ПО на оценку показателей надежности отказоустойчивой программно-аппаратной системы, и показано, что модель надежности с показателем сложности позволяет повысить достоверность оценки интенсивности отказов ПО на три порядка, и, соответственно, повысить достоверность оценки функции и коэффициента готовности программно-аппаратной системы.

В третьей главе представлены разработанные модели и методы анализа сложных программных систем с использованием процессов Маркова высших порядков, позволяющие учесть взаимозависимость выполнения модулей ПО, и таким образом повысить достоверность оценки показателей его надежности. Описаны модели надежности ПО на основе цепей Маркова высшего порядка с дискретным и непрерывным временем, а также для случая неидеальной интеграции модулей. Показано преимущество использования цепей Маркова высшего порядка над моделями, использующими аппарат классических процессов Маркова. Разработан обобщенный метод анализа надежности программных систем, который включает использование различных моделей надежности в зависимости от сложности системы на различных этапах жизненного цикла.

Четвертая глава посвящена средствам повышения эффективности разработки ПО с учетом требований к его надежности. Обоснованы критерий достаточности процесса тестирования ПО и усовершенствованная процедура прогнозирования количества ошибок ПО, которые дают возможность на этапе тестирования обоснованно принимать решения касательно достижения заданных показателей надежности и распределения ресурсов проекта по разработке ПО. Описаны новая модель функционирования ПО, которая учитывает его архитектуру и переменные

программного кода, и методы автоматизированного формирования сценариев тестирования, которые позволяют повысить эффективность процесса тестирования ПО и достоверность оценки показателей его надежности.

В пятой главе представлены разработанные программные средства оценки и прогнозирования показателей надежности ПО, пригодные для использования при разработке программных систем. Спроектировано и реализовано средство предварительной обработки данных об отказах ПО, интегрированное с системой JIRA. Разработано программное средство для эмпирического оценивания вероятностей переходов между модулями программной системы. Описана система оценивания надежности ПО с использованием архитектурных моделей. Создано программное средство прогнозирования отказов ПО на основе нейронных сетей, и проведено исследование влияния параметров и архитектуры нейронной сети на эффективность прогнозирования отказов ПО.

Ключевые слова: программное обеспечение, надежность, программно-аппаратная система, модель надежности, процесс Маркова высшего порядка, неоднородный пуассоновский процесс.

Yakovyna V.S. Methods and tools of software reliability analysis considering lifecycle stages. – On the right of manuscript.

Dissertation for scientific degree of doctor of technical sciences in specialty 01.05.03 – mathematical methods and software of computer systems. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The applied problem of creating models, methods and tools to analyze software reliability, taking into account its complexity, architecture and life cycle processes has been solved in this thesis.

The nonhomogeneous Poisson process (NHPP) software reliability model with complexity index has been created. This model, in contrast to the existing ones, takes into account the complexity of the software and belongs to generalized NHPP models. The method of software reliability assessment has been developed on the basis of generalized NHPP model and the criteria of testing sufficiency. This method enables more accurate software reliability assessment considering software complexity, but excluding its architecture. To assess the reliability of complex software systems, three higher order Markov chains (HOMC) software reliability models have been created – discrete time; continuous time; as well as imperfect modules integration continuous time one. The method of a HOMC representation through an equivalent first order process has been proposed, thus enabling processing of HOMC as classical ones. The generalized method of software reliability analysis considering its complexity, architecture and life cycle processes has been elaborated. Software tool for software failures prediction using artificial neural networks has been developed. The influence of Elman and RBF nets parameters and architecture on software failures forecasting efficiency has been studied.

Keywords: software, reliability, computer system, reliability model, higher order Markov chain, nonhomogeneous Poisson process.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Папір офсетний. Умовн. друк. арк. 2,32.
Зам. № 01/16. Тираж 100 прим.

Видруковано у Дослідно-видавничому центрі
Наукового товариства ім. Шевченка
79008, Львів, вул. Винниченка, 26
Тел. (032) 276 51 55

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи ДК № 884 від 04.04.2002 р.