

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу **Чопея Ратібора Степановича** на тему **«Засоби автоматизованого тестування спеціалізованого програмного забезпечення вбудованих систем»**, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем

Актуальність теми виконаних досліджень

Сучасний етап розвитку вбудованих систем зумовлений постійним розвитком внутрішньої архітектури мікроконтролерів, що у свою чергу призвело до розширення функціоналу вбудованих систем та сфер їхнього застосування. Саме це, призвело до зростання кількості систем реального часу, що реалізовані на базі мікроконтролерних вбудованих систем.

Водночас, зростання складності вбудованих систем, а також ускладнення та розширення функціоналу вбудованих систем загостило потребу в автоматизації процесу їхнього тестування. Це підтверджує актуальність представленої роботи.

У дисертаційній роботі вирішується завдання підвищення ефективності автоматизованого тестування мікроконтролерних вбудованих систем у спосіб удосконалення існуючих методів тестування тривалості виконання програмного коду, обґрунтування плану тестування, а також впровадження нових методів аналізу тривалості виконання програмного коду, що враховують вплив зовнішніх та внутрішніх чинників на периферійні пристрої вбудованої системи. Тому тема, мета та поставлені задачі дисертації Чопея Р.С., є без сумніву актуальними.

Актуальність задачі, важливість та перспективність отриманих результатів підтверджується також тим, що робота виконувалась відповідно до наукового напряму кафедри програмного забезпечення НУ «Львівська політехніка» «Програмне і математичне забезпечення автоматизованих систем», а саме “Розроблення математичного забезпечення для програмного засобу аналізу функціональної безпечності та надійності програмно-апаратних систем відповідального призначення” (№ держреєстрації 0117U004458, 2018), а також в межах госпдоговірних науково-дослідних робіт №0538, 0565 та 0581, що виконувалися впродовж 2016 – 2018р. за тематикою “Автоматизоване тестування вбудованого програмного забезпечення”.

Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності

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

У *вступі* обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, визначені мета і задачі дослідження, сформульовано об'єкт і предмет, а також методи дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих

результатів, надано інформацію про особистий внесок автора в роботи виконані у співавторстві, наданий перелік та відомості про апробацію за темою роботи.

У першому розділі проведено огляд існуючих моделей, методів та засобів тестування тривалості виконання програмного коду (ТВПК). На основі розглянутих методів тестування тривалості виконання програмного коду, обґрунтовано застосування методів динамічного тестування, зокрема, методів тестування, що виконуються за допомогою апаратного трасування. У завершальній частині розділу акцентовано увагу на актуальності та задачах автоматизації тестування тривалості виконання програмного коду вбудованих систем реального часу.

Недоліком оглядової частини дисертації є використання застарілих літературних джерел, що стосується аналізу статичних методів оцінювання тривалості виконання програмного коду. Варто зазначити, що це не впливає на об'єктивність результатів проведеного аналізу.

У другому розділі сформульовано принципи, яких необхідно дотримуватись при розробленні нових методів та засобів для автоматизованого тестування тривалості виконання програмного коду.

В склад розробленого засобу входить удосконалений метод динамічного тестування тривалості виконання програмного коду. Оригінальність цього методу полягає в тому, що він забезпечує можливість вимірювання тривалості виконання програмного коду безпосередньо на вбудованій системі без внесення змін у її програмне чи апаратне забезпечення. Своєю чергою, запропонований метод тестування тривалості виконання програмного коду може бути автоматизований, що дає змогу широко використовувати його у засобах для автоматизованого тестування вбудованих систем.

Основні недоліки цього розділу полягають у тому, що усі висновки стосовно розробленого методу динамічного аналізу ТВПК отримано на основі тестування тривалості виконання опорної функції, яка змінює рівень напруги сигналу на виході мікроконтролера із заданим періодом (с. 55) (генератор меандра). Невідомо, чи такі самі висновки будуть при використанні іншого програмного забезпечення? Також варто зауважити, що чим менший період слідування імпульсів, генерованих програмно цією опорною функцією, тим більша частота його випадкової варіації (через процедури переривання в обчислювальному процесі). У роботі автор вважає цей період не змінним. Також у запропонованому методі допущено методичну неточність, яка пов'язана із наявною систематичною похибкою оцінювання ТВПК. У цьому легко пересвідчитись проаналізувавши колонку тривалості виконання функції з таблиць 2.2 - 2.4.

У третьому розділі дисертант представив метод формування плану тестування, що враховує поведінку периферійних пристроїв. Цей метод входить до переліку пунктів наукової новизни дисертації.

Спираючись на математичний апарат методу Монте-Карло, в дисертації створено засіб для автоматизованого визначення важливості тестування кожної програмної функції. Експериментально доведена ефективність запропонованого методу для п'яти вбудованих систем реального часу. Наведені

результати показують зниження витрат часу на тестування тривалості виконання програмного коду вбудованих систем. Саме це є дуже важливим при розв'язанні задачі підвищення ефективності тестування тривалості виконання програмного коду. Розглянуто характеристики трьох відомих інтерфейсів та затримки часу при їх використанні для зв'язку з периферійними пристроями.

Разом з тим, *розглянуті методи у цьому підрозділі мають ряд недоліків*, зокрема, не враховують функціонування операційного середовища, а тільки час виконання прикладних функцій. Запропонований метод вимагає виконання рутинних процедур співставлення результатів компіляції програми, написаній на мові високого рівня з асемблерними мікроінструкціями. Зазначений автором план тестування, по суті не є планом, а лишень визначає порядок тестування функцій, відповідно до встановлених для них вагових коефіцієнтів, а для розрахунку цих коефіцієнтів використана емпірична формула (3.8), в якій не достатньо обґрунтовано ймовірність створення потоку, в якому викликається зазначена функція. Також для оцінювання зміни часу відгуку периферійного пристрою автор задає інтервали тривалості виконання мікроінструкцій, а потім на цих інтервалах генерує випадкові величини за нормальним законом розподілу. Після цього обчислює середнє значення та дисперсію. Така схема, на мою думку, є непрацевдатною, оскільки для відомих інтервалів часу виконання мікроінструкцій, з яких складається функція, завжди можна обчислити нижню та верхню межу часу її виконання.

У четвертому розділі представлено розроблений метод прогнозування ТВПК з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх чинників на периферійні пристрої вбудованої системи, що відображено у пункті наукової новизни дисертації.

Оригінальність цього методу полягає у тому, що для аналізу тривалості виконання програмного коду враховується не лише внутрішня архітектура мікроконтролера, а й вплив зовнішніх та внутрішніх чинників на апаратне забезпечення вбудованої системи, а відтак і на тривалість виконання програмного коду. Своєю чергою, запропонований метод підвищує ефективність процесу аналізу ТВПК і відповідно, підвищує рівень їхньої безпечності.

Недоліками цього розділу є те, що усі його результати стосуються дослідження конкретних периферійних пристроїв і не можуть бути науковими узагальненнями. Модель прогнозування часу виконання програмного забезпечення у вигляді кубічної залежності (4.3) - не є моделлю, оскільки побудована тільки для конкретного пристрою і є звичайною апроксимацією вибірки даних. Вибірка даних є дуже малою, щоб оцінювати прогностичні властивості цієї залежності. Таблиці 4.5 – 4.7 є однаковими, що показує відсутність залежності часу виконання програми від температури.

У п'ятому розділі представлено розроблену дисертантом архітектуру програмного засобу для автоматизованого тестування тривалості виконання програмного коду. У програмному засобі реалізовано запропоновані методи та алгоритми.

В цьому розділі також наведено приклад використання програмного засобу для автоматизованого тестування ряду вбудованих систем жорсткого реального часу.

Варто зазначити, що у цьому розділі, доцільно було б ввести інтегрований показник ефективності тестування, який би враховував показники точності отриманих результатів тестування, витрат часу на тестування та можливості прогнозування результатів, оскільки це є суттю науково-прикладного завдання дисертації. Також додаткового пояснення вимагає таблиця 5.1, оскільки виміряне значення тривалості виконання програмного коду за допомогою розробленого програмного засобу більше ніж із застосуванням відомих засобів.

У додатках наведено довідки про впровадження результатів дисертації.

Наукова новизна одержаних результатів:

1) вперше розроблено метод прогнозування тривалості виконання програмного коду, який враховує вплив зовнішніх і внутрішніх чинників на периферійні пристрої вбудованої системи РЧ, що дає змогу підвищити рівень її надійності та безпечності;

2) удосконалено метод статичного аналізу тривалості виконання програмного коду для мікроконтролерних вбудованих систем, який на відміну від наявних враховує час обміну даними між внутрішніми модулями мікроконтролера, що дає змогу підвищити точність оцінки цієї тривалості;

3) отримав подальший розвиток метод формування плану тестування програмних функцій вбудованої системи, в якому, на відміну від відомого, враховано поведінку її периферійних пристроїв, що дає змогу встановити порядок тестування кожної програмної функції, і в такий спосіб підвищити ефективність процесу автоматизованого тестування;

4) отримав подальший розвиток метод динамічного тестування програмного забезпечення вбудованих систем з використанням інтерфейсу відлагодження, в якому, на відміну від відомого, враховано особливості мікроконтролерів з архітектурою ARM, що дає змогу здійснити тестування тривалості виконання програмних функцій вбудованої системи без внесення змін до її програмного чи апаратного забезпечення

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Обґрунтованість одержаних наукових результатів базується на коректному використанні теорії ймовірностей та математичної статистики, системного аналізу та математичного моделювання, теорії алгоритмів, принципів аспектно- та об'єктно-орієнтованого програмування під час розробки програмного засобу для автоматизованого тестування тривалості виконання програмного коду.

Достовірність отриманих результатів та висновків

Достовірність отриманих результатів підтверджується коректністю основних припущень і положень, на яких ґрунтуються методи тестування тривалості виконання програмного коду вбудованих систем; збігом результатів в прикладах використання запропонованих методів з відомими; результатами практичного використання запропонованих методів, та

прикладного програмного засобу, під час аналізу та тестування тривалості виконання програмного коду зразків вбудованих систем, що підтверджено актами про використання.

Практична цінність одержаних результатів та їх подальше використання

Практична цінність одержаних результатів полягає у створенні прикладного програмного засобу, який забезпечує:

- автоматизоване тестування тривалості виконання програмного коду вбудованих систем жорсткого реального часу;
- скорочує витрати на час на виконання тестування вбудованих систем та її вартість.

Все це є важливим етапом тестування вбудованої системи, адже дає змогу розробити вбудовану систему, що відповідає вимогам до надійності та безпечності з мінімальними затратами часу.

Підтвердженням практичного значення роботи є використання методів і програмного засобу у виробничі процеси компаній, що займають розробленням вбудованих систем жорсткого реального часу: Dinamica Generale S.p.A (м. Поджо Руско, Італія) та ПП НВПП “Спаринг-Віст Центр” (м. Львів) та використання отриманих результатів у навчальному процесі НУ «Львівська політехніка».

Повнота викладу результатів в опублікованих працях

Основні результати досліджень, що відображені у дисертації, опубліковано у 12 наукових працях (з них 6 статей наукових фахових виданнях України та періодичних виданнях інших держав, серед яких 2 видання включено до наукометричних баз SCOPUS та Web Of Science); 6 праць в матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій 2 з яких включено у наукометричної бази SCOPUS, що свідчить про визнання цінності для наукової спільноти.

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

Відповідність дисертаційної роботи паспорту спеціальності

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем, зокрема у формулі спеціальності, оскільки стосується створення *методів тестування та верифікації програм*, а також створення *методів та засобів вимірювання, оцінювання якості та оптимізації програм*. Розроблені методи входять до складу прикладного програмного засобу автоматизованого тестування вбудованих систем.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У дисертаційній роботі доцільно було б обмежитися тестуванням ТВПК вбудованих систем з конкретною архітектурою.
2. Запропоновані методи тестування ТВПК придатні для вбудованих

- мікропроцесорних систем, функціонування яких не вимагає складного операційного середовища. У іншому випадку аналіз мікроінструкцій стає надзвичайно трудомістким, або взагалі практично не можливим.
3. В оглядовій частині дисертації для аналізу статичних методів оцінювання ТВПК використано застарілі літературні джерела. Варто зазначити, що в цілому це не вплинуло на об'єктивність результатів проведеного аналізу.
 4. Висновки стосовно ефективності розробленого методу динамічного аналізу ТВПК ґрунтуються на тестуванні тривалості виконання однієї опорної функції (генератор меандра). Невідомо, чи такі самі висновки будуть при тестуванні іншого програмного забезпечення? Також варто зауважити, що чим менший період слідування імпульсів, генерованих програмно цією опорною функцією, тим більша частота його випадкової варіації (через процедури переривання в обчислювальному процесі). Також у запропонованому методі допущено методичну неточність, яка пов'язана із не урахуванням систематичної похибки оцінювання ТВПК. У цьому легко пересвідчитись проаналізувавши колонку тривалості виконання тестової функції з таблиць 2.2 - 2.4.
 5. Запропонований у третьому розділі метод оцінювання ТВПК з урахуванням поведінки периферійних пристроїв вимагає виконання рутинних процедур співставлення результатів компіляції програми, написаній на мові високого рівня з асемблерними мікроінструкціями. Розроблений в цьому ж розділі алгоритм формування плану тестування, по суті є лишень алгоритмом визначення порядку тестування функцій, відповідно до встановлених для них вагових коефіцієнтів. Для розрахунку цих коефіцієнтів використана емпірична формула (3.8) в якій не достатньо обґрунтовано ймовірність створення потоку, в якому викликається зазначена функція.
 6. Усі результати четвертого розділу ґрунтуються на дослідженні конкретних периферійних пристроїв і не можуть бути узагальненими. Модель прогнозування часу виконання програмного забезпечення у вигляді кубічної залежності (4.3) не є моделлю, оскільки побудована тільки для конкретного пристрою і є звичайною апроксимацією вибірки даних. Вибірка даних є дуже малою для оцінювання прогностичних властивостей цієї залежності. Таблиці 4.5 – 4.7 є однаковими, що показує відсутність залежності ТВПК від температури.
 7. У п'ятому розділі доцільно було б ввести інтегрований показник ефективності тестування, який би ураховував показники точності отриманих результатів тестування, витрат часу на тестування та можливості прогнозування результатів, оскільки це є суттю науково-прикладного завдання дисертації. Також додаткового пояснення вимагає таблиця 5.1, оскільки виміряне значення тривалості виконання програмного коду за допомогою розробленого програмного засобу більше ніж із застосуванням відомих засобів.

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

Загальні висновки

Оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, вважаю, що дисертація Чопея Р. С. на тему «Засоби автоматизованого тестування спеціалізованого програмного забезпечення вбудованих систем» є завершеною науковою працею, у якій отримані нові наукові і практичні результати, що вирішують важливе науково-прикладне завдання підвищення ефективності автоматизованого тестування програмного забезпечення мікроконтролерних вбудованих систем у спосіб удосконалення методів тестування тривалості виконання програмного коду.

Дисертаційна робота здобувача за своїм рівнем, обсягом і якістю досліджень відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567 (зокрема, п.11 щодо кандидатських дисертацій), а її автор Чопей Ратібор Степанович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

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



Дивак М. П.

Прізвище	<u>Дивака М. П.</u>
Завіряю:	
Зав. загальним відділом	<u>Тарасово Г. С.</u>