ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора
Пастуха Олега Анатолійовича, професора кафедри програмної інженерії
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя,
на дисертацію Мостового Сергія Володимировича «Метод та засоби прогнозування стану взаємоблокування процесів в комп'ютерних системах»
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

1. Актуальність теми дослідження та її зв'язок із науковими програмами, планами й темами

Функціонування комп'ютерних систем в умовах конкурентного використання системних ресурсів процесами передбачає постійну взаємодію процесів із ресурсами, частина яких використовується на засадах взаємного виключення. У разі несприятливого чергування запитів процесів може сформуватися цикл очікування ресурсів, що призводить до стану взаємоблокування та перешкоджає завершенню відповідної групи процесів. Для серверних застосунків, систем транзакційного оброблення та інших програмних комплексів це означає втрату продуктивності й потребу в додаткових механізмах відновлення.

Методи, які ґрунтуються лише на аналізі графа розподілу ресурсів або графа очікування, надають достовірну інформацію про сформований цикл, проте сам факт його виявлення часто запізнюється відносно моменту, коли ще можна змінити розвиток ситуації. Перспективним є підхід, що трактує сигнатури процесів, які відображають їх ресурсну взаємодію як джерело ознак для оцінювання майбутнього ризику. Це зумовлює потребу поєднати моделі стану комп'ютерної системи, нечітку кластеризацію Fuzzy C-Means і нечіткий логічний висновок.

Дисертація С. В. Мостового спрямована саме на розв'язання цього завдання. Її зміст відповідає дослідженням із побудови комп'ютерних систем та їх програмних компонентів. Зв'язок із науковими роботами Хмельницького національного університету, у тому числі темою «Теорія інтелектуального діагностування відмовостійких комп'ютерних систем з програмованою логікою» і проєктом щодо кібербезпеки критично важливої інфраструктури, засвідчує науково-практичну спрямованість обраної тематики.

2. Наукова новизна отриманих результатів

Наукові здобутки автора доцільно розглядати як систему взаємопов'язаних рішень: побудову сигнатури процесу, автоматизоване формування бази нечітких правил, прогнозування стану взаємоблокування та

архітектуру відповідних програмних засобів. Заявлені в дисертації положення наукової новизни мають такий зміст:

1) вперше розроблено метод прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах, який, на відміну від відомих методів виявлення взаємоблокувань після їх виникнення або запобігання їм на основі наперед заданих обмежень розподілу ресурсів, забезпечує завчасне оцінювання ризику переходу процесів у стан взаємоблокування шляхом обробки сигнатур процесів базою нечітких правил, сформованою за результатами кластеризації, що дає змогу враховувати поточний ресурсний стан системи, особливості взаємодії процесів із ресурсами та формувати підстави для прийняття превентивних рішень щодо керування ресурсами комп'ютерної системи;

2) удосконалено метод побудови сигнатури процесу в комп'ютерних системах, який, на відміну від підходів, що описують процес через окремі системні параметри або поточний стан виконання, передбачає формалізоване перетворення ідентифікаційних, ресурсних, часових та поведінкових характеристик процесу у впорядкований вектор ознак із урахуванням зайнятих ресурсів, запитуваного ресурсу та особливостей ресурсної взаємодії, що дає змогу сформувати інформативний опис процесу для подальшої кластеризації, нечіткого аналізу та прогнозування стану взаємоблокування;

3) удосконалено метод побудови бази нечітких правил для прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах, який, на відміну від відомих підходів формування правил на основі повного експертного налаштування, використовує нечітку кластеризацію Fuzzy C-Means для автоматизованого виділення типових сценаріїв ресурсної поведінки процесів з подальшим формуванням правил нечіткого логічного висновку, що дає змогу зменшити залежність від експертних оцінок, врахувати приховані закономірності у вибірці станів процесів та підвищити адаптивність бази правил до зміни поведінки процесів у комп'ютерній системі;

4) удосконалено архітектуру засобів прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах, яка, на відміну від відомих підходів, орієнтованих переважно на виявлення або усунення взаємоблокування після його виникнення, передбачає поєднання модулів збору даних про процеси та ресурси, побудови сигнатур процесів, формування бази нечітких правил і прогнозування стану взаємоблокування, що забезпечує завчасне оцінювання ризику переходу процесів у стан взаємоблокування та створює основу для прийняття превентивних рішень щодо керування ресурсами комп'ютерної системи.

Особливий інтерес становить поєднання Fuzzy C-Means з автоматизованим формуванням бази нечітких правил, оскільки цей механізм пов'язує вибірку сигнатур процесів з оцінюванням ризику переходу процесів у стан взаємоблокування. Зазначені результати характеризують взаємозв'язок запропонованих моделей, методів і програмних засобів прогнозування стану взаємоблокування.

3. Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам

У вступній частині сформульовано наукову задачу, наведено аргументи щодо її актуальності, відображено мету й завдання, об'єкт, предмет, методи дослідження, апробацію та практичне використання одержаних результатів. Подальший матеріал послідовно реалізує заявлений план досліджень.

Перший розділ містить огляд причин появи взаємоблокувань і порівняльний розгляд методів вирішення задачі взаємоблокування процесів. Автор відділяє стратегії, що обмежують порядок доступу до ресурсів, від методів виявлення та усунення взаємоблокувань. Окремо проаналізовано можливості інтелектуального опрацювання системних даних. Проведений аналіз обґрунтовує доцільність завчасного прогнозування стану взаємоблокування на основі сигнатур процесів, нечіткої кластеризації та нечіткого логічного висновку.

У другому розділі визначено інформаційні об'єкти прогнозування. На основі сигнатур активних процесів формується модель стану комп'ютерної системи; сигнатури приводяться до числового представлення, придатного для кластеризації. Для Fuzzy C-Means обрано чотири кластери, які інтерпретуються як нормальна робота, очікування ресурсу без критичного ризику, граничний стан і взаємоблокування. Ризик кластера визначається за зваженою часткою прикладів із відповідним прогнозним маркером.

У третьому розділі теоретичні побудови перетворено на завершені методи. Описано формування навчальних записів, перетворення ресурсних ознак, ітераційну процедуру нечіткої кластеризації, створення правил типу «якщо–то» та виконання логічного виведення. Позитивним є те, що прогнозний маркер використовується після кластеризації для оцінки ризику, а не вводиться до матриці ресурсних ознак як прихована підказка алгоритму.

Четвертий розділ містить програмну реалізацію і перевірку функціональних характеристик. У середовищі імітаційного моделювання досліджено вплив кількості ресурсів та частки небезпечних процесів; для числової оцінки застосовано матрицю помилок класифікації й похідні від неї метрики. Для зіставлення алгоритмів наведено результати застосування методів ігнорування взаємоблокувань, примусового вилучення ресурсу або відкату, заборони на переривання, алгоритму банкіра, графа розподілу ресурсів, графа очікування та запропонованого методу прогнозування взаємоблокувань.

Окремої уваги заслуговують експерименти з транзакційними блокуваннями на реальній системі. Збереження спільних вхідних наборів для різних досліджуваних методів й багаторазове повторення вимірювань сприяють коректнішому зіставленню режимів. Продемонстровано, що прогнозна обробка може бути виконана в часовому інтервалі, який передує фактичному виникненню стану взаємоблокування. Додатки містять відомості про програмний засіб Deadlock Prediction System v1.0 та експериментальні дані.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Для розв'язання поставлених задач використано методи теорії операційних систем, математичного моделювання, кластерного аналізу, теорії нечітких множин і статистичного оцінювання результатів. Для переходу між рівнями моделі задано математичні співвідношення, а прийняті рішення щодо бінарного подання ознак та евклідової міри близькості супроводжуються поясненнями. Взаємозв'язок навчального етапу та етапу прийняття рішення простежується від вихідного системного спостереження до оцінювання ризику переходу процесів у стан взаємоблокування.

У п'яти конфігураціях імітаційних досліджень метод забезпечив Recall 99,00 %, Precision 98,61–98,67 % та F1-score 98,80–98,84 %. При цьому частка пропущених небезпечних процесів не перевищила 1,00 %. На реальній платформі повторні випробування підтвердили значення Accuracy у межах 99,65–99,82 % і Precision 98,39–98,49 %. Задокументовані часові вимірювання показують випередження фактичного виникнення взаємоблокування на 3,1–3,6 мс та збільшення пропускної здатності на 9,4 % порівняно з методом на основі графа розподілу ресурсів.

Позитивно оцінюю розділення модельного часу та часу фізичного виконання під час експериментів. Це дозволяє не ототожнювати показники поведінки імітованих процесів із витратами самого алгоритму. Автор також зазначає обмеження щодо репрезентативності навчальних даних і поширення результатів на довготривалі виробничі навантаження. Така вказівка підвищує коректність інтерпретації отриманих оцінок.

5. Практичне значення результатів дослідження, апробація та повнота їх опублікування

Розроблений комплекс методів придатний для систем моніторингу процесів і ресурсів та засобів керування ресурсами комп'ютерних систем, у яких може застосовуватися завчасне оцінювання ризику переходу процесів у стан взаємоблокування. Особливістю застосування є використання вже сформованої бази нечітких правил під час оперативного прогнозування за поточними сигнатурами процесів, що знижує потребу в повторному навчанні при кожній ресурсній події.

Підтвердження практичного використання результатів наведене у документах про впровадження в ПП «Авіві» та ТОВ «ІТТ», а також у матеріалах щодо застосування в освітньому процесі Хмельницького національного університету. Виконані напрацювання можуть використовуватися для підготовки фахівців з операційних систем, комп'ютерної інженерії та технологій захисту інформації.

За результатами дослідження опубліковано п'ять наукових статей: чотири у трьох фахових наукових журналах України та одну в міжнародному науковому журналі, що індексується у наукометричній базі Scopus. Апробацію результатів засвідчують чотири праці в матеріалах міжнародних конференцій, одна з яких індексується у наукометричній базі Scopus. У розділі про особистий внесок здобувача визначено його участь у спільних працях.

Представлені публікації розкривають основні результати дисертації та відповідають її змістовому спрямуванню.

6. Структура, мова та оформлення дисертаційної роботи

Дисертація складається з чотирьох змістових розділів із висновками, вступу, загальних підсумків, бібліографії та додатків. Виклад матеріалу є послідовним, а використана термінологія загалом відповідає понятійному апарату дисертації. Рисунки та таблиці використовуються не лише для ілюстрації, а й для представлення структури програмного засобу, алгоритмів прогнозування стану взаємоблокування та результатів експериментального порівняння. У цілому оформлення є належним.

7. Зауваження до дисертації та дискусійні питання

1. У другому розділі кількість кластерів Fuzzy C-Means прийнято рівною чотирьом, однак не наведено експериментального обґрунтування стійкості результатів прогнозування до зміни кількості кластерів і параметра нечіткості. Доцільно було б дослідити вплив цих параметрів на показники якості прогнозування та кількість сформованих нечітких правил.

2. У роботі не проведено кількісного аналізу внеску окремих компонентів сигнатури процесу у результат прогнозування. Порівняння повного вектору ознак із його скороченими варіантами дало б змогу оцінити інформативність окремих ідентифікаційних, часових та ресурсних характеристик процесу.

3. Недостатньо деталізовано процедуру формування навчальної та контрольної вибірок із часово пов'язаних станів процесів. Необхідно чіткіше визначити механізм розподілу спостережень, який унеможливлює потрапляння станів одного й того самого епізоду взаємоблокування одночасно до навчальної та контрольної вибірок.

4. У методі прогнозування використано порогове значення ризику 0,6, однак не наведено аналізу чутливості результатів до зміни цього параметра. Доцільно було б дослідити залежність Recall, Precision, F1-score та кількості хибних превентивних втручань від кількох значень порогу в околі обраного значення.

5. Для експериментів на реальній комп'ютерній системі наведено результати повторних випробувань, однак статистичне оцінювання варіативності показників якості прогнозування подано недостатньо повно. Доцільним є наведення довірчих інтервалів для Recall, Precision і F1-score або статистичних характеристик зміни елементів матриці помилок між окремими повтореннями експерименту.

6. У роботі не формалізовано критерій необхідності повторного формування бази нечітких правил у разі зміни характеру навантаження або ресурсної поведінки процесів. Доцільно визначити кількісні індикатори, за якими приймається рішення про повторне навчання, зокрема на основі зміни частоти ресурсних конфліктів, характеристик поточних сигнатур процесів або ступеня їх відповідності сформованим кластерам.

Наведені зауваження стосуються можливого поглиблення аналізу експериментальних даних та уточнення окремих процедур налаштування. Вони не змінюють позитивної оцінки завершеності дослідження, достовірності основних висновків і значення розробленого методу та засобів прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах.

8. Загальні висновки

Дисертаційна робота Мостового Сергія Володимировича «Метод та засоби прогнозування стану взаємоблокування процесів в комп'ютерних системах» є самостійним завершеним дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання, одержано нові наукові результати та продемонстровано їх практичну придатність.

Робота відповідає пп. 2, 3 паспорту спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, та вимогам пп. 9, 11-12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 (зі змінами), а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 - комп'ютерні системи та компоненти.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри програмної інженерії
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
«10» листопада 2026 р.

_____ О. А. Пастух

ВІДДІЛ КАДРІВ 05408102

Підпис О. А. Пастуха
засвідчую: