МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МОСТОВИЙ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 004:45

МЕТОД ТА ЗАСОБИ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ВЗАЄМОБЛОКУВАННЯ ПРОЦЕСІВ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Хмельницький – 2026

Дисертацією є рукопис.
Роботу виконано у Хмельницькому національному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Савенко Олег Станіславович,
Хмельницький національний університет,
професор кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дичка Іван Андрійович,
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
декан факультету програмних систем та прикладної математики, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем

доктор технічних наук, професор
Пастух Олег Анатолійович,
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,
професор кафедри програмної інженерії

Захист відбудеться «11» грудня 2026 р. о 14 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.70.052.06 у Хмельницькому національному університеті за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська 11, аудиторія 4-005.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Хмельницького національного університету за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Кам'янецька, 110/1.

Автореферат розіслано «10» листопада 2026 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Андрій НІЧЕПОРУК

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні комп'ютерні системи (КС) характеризуються високим рівнем паралелізму, що зумовлює одночасне опрацювання спільних даних багатьма процесами, внаслідок чого множина одночасно виконуваних процесів формує складні групи взаємопов'язаних задач, які конкурують за спільний пул ресурсів. За фізичною природою такі ресурси поділяють на апаратні та програмні, за можливістю спільного використання – на поділювані й неподілювані, за можливістю примусового вилучення – на відновлювані та невідновлювані, а за кількістю доступних екземплярів – на одноекземплярні та багатоекземплярні.

Особливе значення для КС мають неподілювані ресурси, зокрема апаратні або програмні об'єкти, які в певний момент часу можуть використовуватися лише одним процесом і тому потребують монопольного доступу. До них належать окремі пристрої введення-виведення, файли та записи баз даних у режимі модифікації, критичні секції, м'ютекси, семафори й інші об'єкти синхронізації. Якщо такий ресурс уже зайнятий, то інші процеси переходять у стан очікування його звільнення.

Критичною для досліджуваного класу комп'ютерних систем є ситуація, за якої група взаємопов'язаних процесів одночасно претендує на підмножину неподілюваних ресурсів: кожний процес утримує принаймні один виділений йому ресурс і очікує звільнення ресурсу, зайнятого іншим процесом цієї групи. За одночасного виконання умов взаємного виключення, утримання й очікування, невідчужуваності ресурсів та циклічного очікування в системі формується замкнений цикл ресурсних залежностей, унаслідок чого процеси не можуть продовжити виконання і переходять у стан взаємоблокування, що спричиняє збільшення часу виконання або відмову в обслуговуванні відповідних задач.

Неузгодженість процедур захоплення та вивільнення неподілюваних ресурсів у межах групи задач є першопричиною виникнення низки деструктивних станів КС. До них належать ресурсні блокування, невизначено тривале очікування ресурсів окремими процесами, та найбільш критичний стан, яким є взаємоблокування. Збільшення таких конфліктів спричиняє непродуктивне утримання ресурсної множини, експоненційне зростання часу виконання задач, деградацію загальної пропускної здатності системи та порушення регламентованих термінів обслуговування запитів. У граничних випадках формування циклічних залежностей між задачами групи призводить до часткової або повної відмови програмних комплексів. Це вимагає застосування ресурсомістких процедур відновлення: примусового переривання процесів, відкату транзакцій, перезапуску всієї системи.

Масштабування кількості паралельних обчислень, висока динаміка навантаження критично ускладнюють підтримання цілісної та актуальної інформації про глобальний стан системи. За таких умов традиційні механізми недопущення або вирішення взаємоблокувань демонструють недостатню ефективність. Відповідно, об'єктивною необхідністю є розроблення нових методів, які забезпечують комплексний аналіз ресурсної поведінки групи задач в умовах

монопольного доступу до ресурсів та дозволяють проактивно оцінювати ризик переходу комп'ютерної системи у стан взаємоблокування.

Значний внесок у дослідження проблеми взаємоблокування процесів зробили як зарубіжні, так і українські науковці. Теоретичні основи дослідження взаємоблокувань були закладені в роботах Е. Коффмана (Edward G. Coffman), М. Елфіка (Michael J. Elphick) та А. Шошані (Arie Shoshani), які сформулювали базові умови виникнення взаємоблокувань та запропонували підходи до їх аналізу в багатопрограмних системах.

Подальший розвиток теорії управління ресурсами та уникнення взаємоблокувань пов'язаний із роботами Е. Дейкстри (Edsger W. Dijkstra), який запропонував алгоритм банкіра для забезпечення безпечного розподілу ресурсів між процесами. Значний вплив на розвиток методів аналізу взаємоблокувань також мали дослідження Дж. Холта (James W. Holt), присвячені використанню графів розподілу ресурсів для виявлення циклів очікування та аналізу потенційних взаємоблокувань.

Вагоме концептуальне значення для систематизації методів боротьби із взаємоблокуваннями мають праці Е. Таненбаума (Andrew S. Tanenbaum) та В. Столлінгса (William Stallings). У своїх фундаментальних публікаціях Е. Таненбаум детально дослідив графові моделі управління ресурсами, класифікував алгоритми виявлення тупиків та обґрунтував умови доцільності застосування "алгоритму страуса". В. Столлінгс розробив підходи до інтегрованого управління взаємоблокуваннями, глибоко систематизувавши механізми їх запобігання, уникнення та виявлення в умовах багатопотокового виконання. Праці цих учених дозволили уніфікувати стратегії обробки тупикових ситуацій та заклали стандарти для проектування підсистем управління процесами в сучасних операційних системах.

Вагомий внесок у розвиток методів виявлення взаємоблокувань у розподілених системах зробили Е. Кнапп (Edgar Knapp), Дж. Холлідей (JoAnne L. Holliday), А. Ель-Аббаді (Amr El Abbadi), а також К. Чанді (K. Mani Chandy), Дж. Місра (Jayadev Misra) та Л. Хаас (Laura Haas), які розробили алгоритми розподіленого виявлення взаємоблокувань на основі графів очікування та механізмів поширення повідомлень між вузлами мережі.

Серед сучасних зарубіжних досліджень особливої уваги заслуговують роботи У. Матура (Umang Mathur), А. Павлоджіанніса (Andreas Pavlogiannis), М. Вісванатана (Mahesh Viswanathan), Ю. Чжана (Yu Zhang), К. Чжана (Kaiwen Zhang) та інших науковців, присвячені питанням прогнозування, статичного та динамічного виявлення взаємоблокувань у багатопотокових програмних системах і середовищах програмування нового покоління.

Серед українських учених вагомий внесок у розвиток теоретичних і прикладних засад функціонування комп'ютерних систем, розподілених обчислень, управління ресурсами та забезпечення надійності програмно-апаратних комплексів зробили А. О. Мельник, В. Є. Мухін, І. А. Дичка, А. М. Волокита, А. О. Дорошенко, І. В. Сергієнко, О. А. Пастух, М. З. Згуровський, О. В. Палагін та інші дослідники. Зокрема, А. О. Мельник розвинув наукові засади побудови високопродуктивних комп'ютерних систем, багатопроцесорних архітек-

тур та паралельних обчислень, В. Є. Мухін та його наукова школа досліджують розподілені комп'ютерні системи, хмарні обчислення, адаптивне управління ресурсами та забезпечення надійності функціонування складних інформаційних систем, у працях І. А. Дички досліджено теоретичні та прикладні засади побудови паралельних і розподілених комп'ютерних систем, організації обчислювальних процесів та підвищення ефективності використання системних ресурсів, О. А. Пастух досліджував функціонування програмно-технічних і комп'ютерних систем, організації оброблення даних, керування обчислювальними ресурсами та підвищення надійності їх роботи, А. М. Волокита досліджував питання аналізу ресурсної залежності, функціонування розподілених обчислювальних середовищ та проблеми взаємоблокувань процесів. Праці зазначених учених створили наукове підґрунтя для розвитку сучасних методів моніторингу станів комп'ютерних систем, аналізу критичних ситуацій та управління ресурсами.

Перспективним напрямом підвищення ефективності управління ресурсами комп'ютерних систем є перехід від реактивних механізмів виявлення взаємоблокувань до проактивних засобів їх прогнозування. На відміну від традиційних підходів, прогнозування дозволяє виявляти потенційно небезпечні стани ще до фактичного виникнення взаємоблокування та своєчасно виконувати коригувальні дії щодо перерозподілу ресурсів або зміни параметрів планування процесів.

Аналіз наукових праць показує, що існуючі дослідження переважно зосереджені на розробленні методів запобігання та виявлення взаємоблокувань, тоді як питання прогнозування таких станів досліджено недостатньо. Зокрема, потребують подальшого розвитку методи побудови моделей станів процесів і ресурсів, алгоритми оцінювання ризику виникнення взаємоблокувань та засоби інтеграції прогнозних механізмів у сучасні операційні системи.

Отже, наявне науково-технічне протиріччя між необхідністю забезпечення достовірного та своєчасного прогнозування переходу процесів у стан взаємоблокування в умовах динамічної зміни ресурсного стану комп'ютерної системи, з однієї сторони, та з іншої обмеженими можливостями відомих методів, що переважно орієнтовані на виявлення та усунення взаємоблокування після його виникнення або на запобігання йому шляхом застосування обмежень щодо розподілу ресурсів. Наявні підходи недостатньо враховують сукупність ідентифікаційних, ресурсних, часових і поведінкових характеристик процесів, а формування правил оцінювання небезпечних станів значною мірою залежить від експертного втручання. Вирішення зазначеного протиріччя потребує розроблення моделей, методів і засобів, які забезпечують формування інформативних сигнатур процесів, автоматизований аналіз їх ресурсної поведінки та завчасне оцінювання ризику переходу комп'ютерної системи у стан взаємоблокування.

Таким чином, науково-прикладна задача полягає у розробленні методів та засобів достовірного і своєчасного прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах на основі формування та аналізу сигнатур процесів, автоматизованої побудови бази нечітких правил і завчасного оцінювання ризику переходу процесів у стан взаємоблокування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконувалось у рамках науково-дослідних тематик Хмельницького національного університету: держбюджетної науково-дослідної теми № 2Б-2008 "Теорія інтелектуального діагностування відмовостійких комп'ютерних систем з програмованою логікою" та міжнародного проєкту "Кібербезпека критично важливої інфраструктури України", що фінансувався USAID (2021-2024рр., договір № 72012120C00002), в яких автор дисертації був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення достовірності та забезпечення своєчасності прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах шляхом розроблення методу та засобів аналізу сигнатур процесів, автоматизованого формування бази нечітких правил і завчасного оцінювання ризику переходу процесів у стан взаємоблокування.

Для вирішення вказаної проблематики необхідне розв'язання таких завдань:

1) провести аналіз відомих моделей, методів та алгоритмів вирішення задачі взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах і визначити їхні обмеження щодо завчасного прогнозування стану взаємоблокування, урахування ресурсної поведінки процесів та придатності до реалізації в сучасних операційних системах;

2) удосконалити архітектуру засобів прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах, яка забезпечує збирання даних про процеси та ресурси, формування сигнатур процесів, побудову бази нечітких правил і виконання прогнозування ризику переходу процесів у стан взаємоблокування;

3) удосконалити метод побудови сигнатури процесу в комп'ютерних системах шляхом формалізованого перетворення ідентифікаційних, ресурсних, часових та поведінкових характеристик процесу у впорядкований вектор ознак, придатний для подальшої кластеризації, нечіткого аналізу та прогнозування стану взаємоблокування;

4) удосконалити метод побудови бази нечітких правил для прогнозування стану взаємоблокування процесів на основі нечіткої кластеризації Fuzzy C-Means, що забезпечуватиме автоматизоване виділення типових сценаріїв ресурсної поведінки процесів і формування правил нечіткого логічного висновку з меншим рівнем залежності від експертного налаштування;

5) розробити метод прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерній системі, який на основі сигнатур процесів, поточного ресурсного стану системи та сформованої бази нечітких правил забезпечуватиме завчасне оцінювання ризику переходу процесів у стан взаємоблокування і формування підстав для прийняття превентивних рішень щодо керування ресурсами;

6) розробити програмні засоби реалізації запропонованих методів і провести експериментальну перевірку достовірності та своєчасності прогнозування стану взаємоблокування процесів з оцінюванням якості за показниками Accuracy, Precision, Recall, Specificity, F1-score, а також виконати оцінювання часової складності та порівняння розробленого методу з відомими підходами.

Об'єкт дослідження – процеси функціонування комп'ютерних систем в умовах конкурентного використання системних ресурсів процесами, що можуть призводити до виникнення стану взаємоблокування.

Предмет дослідження – моделі, методи та засоби побудови сигнатур процесів, формування бази нечітких правил і прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах на основі аналізу ресурсної взаємодії процесів, нечіткої кластеризації та нечіткого логічного висновку.

Методи досліджень. Для розв'язання поставлених у дисертаційній роботі завдань використано комплекс взаємопов'язаних теоретичних та експериментальних методів дослідження:

1) методи системного аналізу та теорії операційних систем для дослідження процесів функціонування комп'ютерних систем, аналізу механізмів розподілу ресурсів, причин виникнення взаємоблокувань та формалізації задачі прогнозування стану взаємоблокування процесів;

2) методи математичного моделювання для розроблення моделі сигнатури процесу, моделі стану комп'ютерної системи, моделі формування бази нечітких правил та моделі прогнозування стану взаємоблокування процесів;

3) методи теорії нечітких множин і нечіткої логіки для формалізації невизначеності параметрів функціонування процесів, побудови функцій належності, формування бази нечітких правил та реалізації нечіткого логічного висновку під час оцінювання ризику виникнення взаємоблокування;

4) методи теорії ймовірностей та математичної статистики для оцінювання достовірності результатів прогнозування, аналізу експериментальних даних та статистичної обробки результатів досліджень;

5) методи обчислювального експерименту та імітаційного моделювання для перевірки працездатності розроблених моделей, методів і алгоритмів прогнозування взаємоблокувань процесів у різних сценаріях функціонування комп'ютерної системи;

6) методи оцінювання якості моделей класифікації для визначення ефективності запропонованого методу прогнозування за показниками Accuracy, Precision, Recall, Specificity та F1-score.

Наукова новизна отриманих результатів. На підставі теоретичних і практичних досліджень, виконаних у дисертаційній роботі, отримано такі нові наукові результати::

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 систе-

мні 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 ви-ділення 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.

Практичне значення отриманих результатів. У результаті виконаного дисертаційного дослідження розроблено програмні засоби прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах, які забезпечують отримання системних подій, формування та збереження сигнатур процесів, використання автоматизовано сформованої бази нечітких правил, оцінювання ризику переходу процесів у стан взаємоблокування та формування підстав для превентивного керування ресурсами. Розділення процедур навчання та оперативного прогнозування дає змогу виконувати ресурсомісткі процедури кластеризації та формування бази правил поза контуром оперативного розподілу ресурсів, а під час функціонування системи використовувати сформовану базу правил для оцінювання поточних станів процесів. Результати прогнозування можуть бути використані в операційних системах і засобах керування ресурсами для посиленого моніторингу, зміни черговості доступу до ресурсів, відкладення ресурсного запиту та формування інших превентивних керуючих впливів.

Результати експериментальних досліджень підтвердили практичну придатність розроблених методів і засобів для достовірного та своєчасного прогнозування стану взаємоблокування процесів. За результатами імітаційного моделювання для різної кількості ресурсів і частки процесів, що потрапляють у стан взаємоблокування, забезпечено завершення 99,85–99,95 % процесів; значення Accuracy становило 99,65–99,88 %, Recall – 99,00 %, Precision – 98,61–98,67 %, F1-score – 98,80–98,84 %, при цьому частка пропущених небе-

зпечних процесів не перевищувала 1,00 %. Експериментальна перевірка на реальній комп'ютерній системі підтвердила стабільність результатів: Accuracy становила 99,65–99,82 %, Precision – 98,39–98,49 %, F1-score – 98,19–98,25 %, а прогноз формувався в середньому за 3,1–3,6 мс до фактичного виникнення взаємоблокування. Порівняно з методом на основі графа розподілу ресурсів середній час обробки скоротився на 8,6–8,8 %, а пропускна здатність зросла на 9,4 %.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в ПП "Авіві" (довідка від 29.06.2026р. м.Хмельницький), ТОВ "ІТТ" (акт від 25.06.2026р. м.Хмельницький), у освітній процес Хмельницького національного університету (акт від 26.06.2026р.) при викладанні дисциплін на кафедрі кібербезпеки для здо-бувачів спеціальності F5 Кібербезпека, зокрема в курсах "Основи інформаційної безпеки", "Операційні системи та технології їх захисту" та на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем для здобувачів спеціальності F7 Комп'ютерна інженерія, зокрема в курсах "Системне програмне забезпечення", "Технологія проєктування спеціалізованих операційних систем".

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У роботах, опублікованих автором одноосібно, отримано наступні результати: [3] - запропонована концепція вирішення науково-прикладної проблеми; [5] – розроблено засоби прогнозування стану взаємоблокування процесів в КС; [6] – розроблено архітектуру системи прогнозування взаємоблокування процесів у КС; [7] – розроблено модель та метод побудови сигнатури процесу; [8] – розроблено метод прогнозування стану взаємоблокування процесів в КС.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать основні ідеї, теоретична та практична розробка положень, відображених у характеристиці наукової новизни отриманих результатів, а саме: [1] – розроблена система прогнозування стану процесів та алгоритми її роботи; [2] – розроблено метод прогнозування входження процесів у взаємоблокування; [4] – розроблено метод побудови сигнатури процесу, метод побудови бази нечітких правил, метод прогнозування взаємоблокування; [9] – розроблено модель сигнатури процесу.

У роботах, які опубліковані у співавторстві, співавторам належать такі результати: [1] – проведено оцінку часової складності алгоритму прогнозування взаємоблокування (Кльоц Ю.П.); [2] – реалізовано постановку експерименту (Кльоц Ю.П., Нічепорук А.О.), опрацьовано результати експерименту (Яшина О., Нічепорук Ю.О.); [4] – проведено аналіз відомих рішень взаємоблокування (Пирч О.В.); [9] – запропоновано підхід до подання послідовних системних програм мережею багатогранних процесів та визначення ділянок їх паралельного виконання (O.Savenko, M.Fedula), формалізовано умови паралельного виконання програмних операцій з урахуванням залежностей між даними та обчислювальними ресурсами (J.Rabchan), реалізовано програмну модель мережі взаємодіючих процесів і постановку експериментального дослідження (K.Voznyi, A.Barabash).

Апробація результатів дисертації. Апробацію основних положень, ідей, висновків дисертаційної роботи проведено на розширеному науковому семі-

нарі кафедри кібербезпеки у Хмельницькому національному університеті. Наукові результати роботи доповідалися також на: XV Всеукраїнській науково-практичній конференції "Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2023" (Хмельницький, 17-18 листопада 2023р.); XVI Всеукраїнській науково-практичній конференції "Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024" (Хмельницький, 15-16 листопада 2024р.); XV міжнародній науково-технічній конференції "Безпека інформаційних технологій" (Тернопіль, 27-29 травня 2026р.); 7th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS-2026) (Khmelnytskyi, Ukraine, July 3, 2026).

Публікації. 10 наукових публікацій за темою кандидатської дисертації відповідно до законодавства (зокрема, 4 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України; 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, індексованому у базі даних Scopus, віднесеному до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank, що згідно із Наказом МОН України №1220 від 23.09.2019 р. прирівнюється до двох публікацій; 4 публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (у тому числі 1 індексована у наукометричній базі Scopus)).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та шести додатків. Повний обсяг роботи становить 233 сторінки друкованого тексту, з них анотація – на 14 с., зміст – на 2 с., перелік скорочень – на 1 с., основний текст – на 178 с., список із 160 використаних джерел – на 21 с., додатки – на 16 с. Дисертація містить 28 рисунків та 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність науково-прикладної задачі, сформульовано мету й завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відомості про особистий внесок, апробацію, публікації та впровадження.

У першому розділі досліджено проблему виникнення взаємоблокувань під час конкурентного використання процесами обмежених системних ресурсів. Показано, що взаємоблокування формується за циклічної залежності, коли процеси утримують одні неподілювані ресурси та одночасно очікують ресурси, зайняті іншими процесами. У класичній моделі життєвого циклу процесу взаємоблокування не виділяється як окремий стан, тому факт очікування ресурсу сам по собі не дає змоги відрізнити звичайну затримку від формування небезпечної ресурсної залежності.

Проаналізовано методи ігнорування, запобігання, уникнення, виявлення та усунення взаємоблокувань. Встановлено, що методи запобігання та уникнення накладають обмеження на розподіл ресурсів і можуть вимагати попередньої інформації про ресурсні потреби процесів, тоді як методи виявлення та усунення мають переважно реактивний характер, оскільки застосовуються після формування циклу очікування. Графи розподілу ресурсів і графи очіку-

вання забезпечують формалізацію ресурсних залежностей, однак також орієнтовані переважно на виявлення вже сформованого взаємоблокування.

Обґрунтовано необхідність переходу від реактивного виявлення до завчасного прогнозування на основі аналізу сукупності ідентифікаційних, ресурсних, часових і поведінкових характеристик процесу. Для їх формалізованого подання запропоновано використовувати сигнатуру процесу, яка враховує, зокрема, утримувані та запитувані ресурси. Для оцінювання поступового переходу процесів від безпечного до небезпечного стану обґрунтовано застосування нечіткої логіки, а для автоматизованого формування бази правил — нечіткої кластеризації Fuzzy C-Means. При цьому навчальні дані повинні зберігати часову послідовність станів, що дає змогу визначати конфігурації, які передують взаємоблокуванню.

Для розв'язання встановленої проблеми сформульовано задачі аналізу відомих підходів; удосконалення архітектури засобів прогнозування, методу побудови сигнатури процесу та методу формування бази нечітких правил; розроблення методу прогнозування стану взаємоблокування; створення програмних засобів і експериментального оцінювання їх достовірності та своєчасності.

За результатами розділу визначено необхідність побудови моделей і методів, які забезпечують формування сигнатур процесів, автоматизоване навчання за накопиченими станами та оцінювання ризику взаємоблокування до фактичного утворення циклічної ресурсної залежності.

У другому розділі сформовано взаємопов'язаний комплекс моделей, що визначає архітектуру системи прогнозування, структуру сигнатури процесу, часово впорядковане подання стану комп'ютерної системи, формування навчальних даних і бази нечітких правил, а також оперативне прогнозування. Архітектура є аналітичною надбудовою над штатними механізмами операційної системи: вона використовує відомості про процеси й ресурси, не замінюючи планувальник або менеджер ресурсів.

Множину елементів, що беруть участь у прогнозуванні, подано як сукупність системних сутностей, поточного розподілу ресурсів, функцій реакції та функціональних компонентів системи:

$$M_{p,KS} = \langle M_S, M_{OS,pr}, M_{OS,pr,p}, M_R, M_{r,OS}, M_{act}, G_{p,KS} \rangle, \quad (1)$$

де M_S – множина елементів системи прогнозування; $M_{OS,pr}$ – множина активних процесів ОС; $M_{OS,pr,p}$ – підмножина процесів, для яких виконується прогнозування; M_R – множина ресурсів комп'ютерної системи; $M_{r,OS}$ – поточний розподіл ресурсів між процесами; M_{act} – множина функцій реакції; $G_{p,KS}$ – сукупність структурних і функціональних зв'язків.

Відношення між цими множинами подано графом зв'язків. Множини ресурсів, процесів ОС, розподілу ресурсів і функцій реакції входять до складу елементів системи прогнозування, а множина процесів для прогнозу є підмножиною активних процесів. Поточний розподіл ресурсів визначає процеси, для яких необхідно виконати прогнозне оцінювання.

Загальний процес прогнозування подано через три методи: побудови сигнатури процесу M_1, побудови бази нечітких правил M_2 та прогнозування M_3. Така декомпозиція відокремлює підготовку даних, навчання та оперативне прийняття рішення. Ресурсомісткі процедури кластеризації виконуються на

етапі M_2, тоді як у поточному циклі використовуються результати M_1 і попередньо сформована база правил.

$$M_{prog} = \langle M_{OS,pr,p}, M_R, M_{r,OS}, M_1, M_2, M_3, P \rangle \quad (2)$$

Сигнатура процесу є впорядкованим вектором ідентифікаційних, часових, поведінкових та ресурсних характеристик:

$$a(t) = (a_1^t, \dots, a_k^t, a_{k+1}^t, \dots, a_{z-1}^t, a_z^t, a_{z+1}^t) \quad (6)$$

Компоненти $a_1^t, \dots, a_k^t$ ідентифікують процес і контекст його виконання; ресурсна частина $a_{k+1}^t, \dots, a_{z-1}^t$ містить ідентифікатори ресурсів, які процес утримує; a_z^t задає запитуваний ресурс або нульове значення за відсутності запиту. У навчальному режимі додатковий маркер a_{z+1}^t використовується для фіксації факту подальшого переходу до взаємоблокування, однак не включається до ознак FCM-кластеризації.

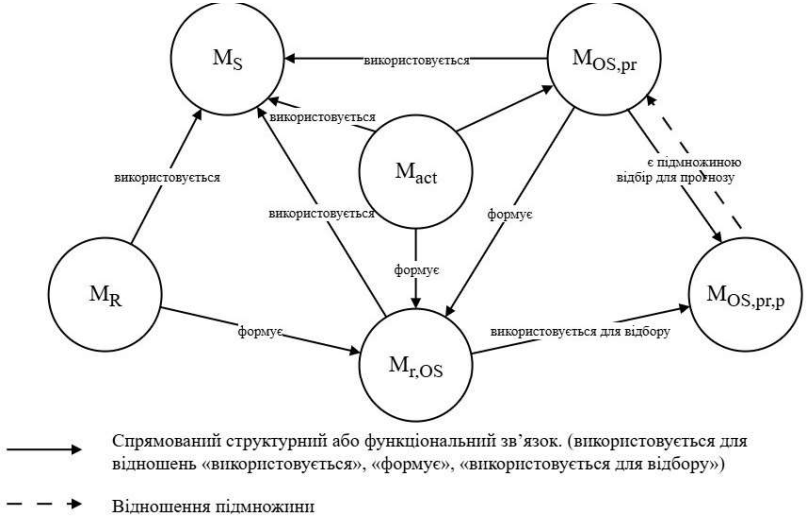


Рис. 1. Граф зв'язків між множинами системи прогнозування

Поточний стан комп'ютерної системи задається множиною актуальних сигнатур активних процесів у певний момент часу:

$$w_t = (A_t, \mathrm{t}, \mathrm{R}_e) \quad (7)$$

де A_t – множина сигнатур у момент t; R_e – множина ідентифікаторів ресурсів. Для навчання формується часова послідовність станів:

$$W = \{\mathrm{w_t} | t_s \le \mathrm{t} \le t_e\}, \quad (8)$$

що дає змогу встановити зв'язок між поточною ресурсною конфігурацією та її подальшим наслідком. Із сигнатури виділяється ресурсна частина:

$$a^*(t) = (a_{k+1}^t, \dots, a_{z-1}^t, a_z^t), \quad (9)$$

після чого визначається прогнозний маркер $y(a)^t$. Він набуває значення 1, якщо в межах прогнозного горизонту Δt процес переходить у взаємоблокування, і 0 – в іншому випадку:

$$y(a)^t = \begin{cases} 1, & \exists \tau \in [t, t + \Delta t]: a_{z+1}^\tau = 1, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (10)$$

Таким чином формуються навчальні пари «поточна ресурсна сигнатура – результат її подальшого розвитку». Перед кластеризацією ідентифікатори ресурсів перетворюються на бінарний вектор сталої розмірності: перший блок відображає утримувані ресурси, другий – активні запити. Час і прогнозний маркер до матриці ознак не включаються. Нормалізоване подання ресурсної сигнатури задається блоками h і q:

$$\tilde{a}^{(s)}(t) = \left(h_1^{(s),t}, \dots, h_m^{(s),t}, q_1^{(s),t}, \dots, q_m^{(s),t}\right), \tag{11}$$

$$\dim(\tilde{a}^{(s)}(t)) = 2m \tag{12}$$

Кожна сигнатура має розмірність $2m$, де m – кількість контрольованих ресурсів. Це забезпечує однакову структуру векторів, незалежність від порядку ресурсів і коректне обчислення відстаней між ресурсними станами.

Для кластеризації прийнято чотири стани: нормальний, потенційно ризиковий, передблокувальний та взаємоблокування. Метод Fuzzy C-Means мінімізує зважену суму квадратів відстаней між навчальними векторами та центрами кластерів:

$$J_{m_f}(U,V) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{c} u_{ij}^{m_f} \parallel x_i - v_j \parallel_2^2 \tag{13}$$

де n – кількість навчальних сигнатур; $c = 4$ – кількість кластерів; u_{ij} – ступінь належності і-ї сигнатури до j-го кластера; m_f>1 – параметр нечіткості; v_j – центр j-го кластера. Як міру близькості використано евклідову норму:

$$d_E(x_i, v_j) = \parallel x_i - v_j \parallel_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^{2m}\left(x_{ik} - v_{jk}\right)^2} \tag{14}$$

Центр кластера визначається як зважене середнє навчальних векторів:

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_{ij}^{m_f} x_i}{\sum_{i=1}^{n} u_{ij}^{m_f}} \tag{15}$$

Ітераційне оновлення ступенів належності та центрів виконується до збіжності. Отримані центри інтерпретуються як нечіткі прототипи типових ресурсних конфігурацій, що дозволяє описувати поступовий перехід від нормального очікування до передблокувального стану.

Після кластеризації для кожного кластера визначається ризик взаємоблокування за прогнозними маркерами навчальних сигнатур, зваженими ступенями їх належності:

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^{|A^*|} u_{ij}^{m_f} \cdot y_i}{\sum_{i=1}^{|A^*|} u_{ij}^{m_f}}, j = \overline{1,4} \tag{16}$$

Чим ближче значення P_j до одиниці, тим частіше відповідні ресурсні конфігурації передували взаємоблокуванню. За центрами кластерів, функціями належності та оцінками ризику автоматизовано формуються правила типу «якщо–то»:

$$R_j: IF\ a_s^t \sim v_j\ THEN\ P_d = P_j, j = \overline{1,4} \tag{17}$$

$$B = \{R_1, R_2, R_3, R_4\} \tag{18}$$

База B містить чотири правила відповідно до кластерних станів і є результатом навчального контуру. В оперативному режимі вона використовується багаторазово без повторного виконання FCM; повторне навчання потрібне у разі суттєвої зміни складу ресурсів або характеру навантаження.

Модель оперативного прогнозування активується після ненадання процесу запитуваного ресурсу. Поточна сигнатура перетворюється у той самий простір ознак і подається на базу правил. Результатом нечіткого логічного висновку є вектор ступенів належності до чотирьох станів:

$$F_B(a_i^{*\,t+\Delta t}) = (\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \gamma_{i3}, \gamma_{i4}) \quad (19)$$

Оцінка небезпечності визначається об'єднанням ступенів належності до передблокувального та критичного станів:

$$\gamma_i^{3,4} = \gamma_{i3} \vee \gamma_{i4} = \max(\gamma_{i3}, \gamma_{i4}) \quad (20)$$

Якщо процес має активний незадоволений запит на ресурс, а об'єднана оцінка перевищує порогове значення $\theta = 0{,}6$, його сигнатура включається до множини ризикових процесів:

$$\left(a_{i,z}^{t+\Delta t} \neq 0\right) \wedge \left(\gamma_i^{3,4} > \theta\right) \Rightarrow a_i^{t+\Delta t} \in D_\theta \quad (21)$$

Для передблокувального або критичного стану з множини ризикових процесів вилучаються системні процеси, після чого як кандидат для превентивної дії обирається несистемний процес з найменшим часом перебування в системі:

$$a_{i,1}^{t+\Delta t}: \left[a_i^{t+\Delta t} \in D_\theta \wedge a_{i,4}^{t+\Delta t} \neq 1 \wedge a_{i,5}^{t+\Delta t} = \min\left\{a_{k,5}^{t+\Delta t} \mid a_k^{t+\Delta t} \in D_\theta \wedge a_{k,4}^{t+\Delta t} \neq 1\right\}\right] \quad (22)$$

Таким чином, удосконалена архітектура поєднує отримання системних даних, побудову сигнатур, формування стану комп'ютерної системи, FCM-кластеризацію, побудову бази нечітких правил і оперативне прогнозування. Розроблені моделі забезпечують послідовний перехід від системної події до формалізованого вектора ознак, від накопичених сигнатур – до бази знань, а від поточної сигнатури – до кількісної оцінки ризику. Розділення навчального й оперативного контурів дозволяє винести ресурсоємні процедури кластеризації за межі поточного циклу розподілу ресурсів і забезпечити завчасне прогнозування взаємоблокування.

У третьому розділі моделі другого розділу конкретизовано у вигляді трьох послідовно пов'язаних методів. Перший формує актуальну сигнатуру процесу за системними даними; другий перетворює накопичені сигнатури у базу нечітких правил; третій використовує поточну сигнатуру та сформовану базу правил для прогнозного оцінювання і, за високого ризику, формує рішення про примусовий перезапуск обраного несистемного процесу.

Метод побудови сигнатури процесу реалізує платформозалежне отримання даних та їх перетворення у спільну інваріантну структуру. Він виконується за такими кроками.

Крок 1. Отримується PID процесу та дані про системну подію.

Крок 2. Перевіряється наявність процесу в множині сигнатур.

Крок 3. Формується ідентифікаційна, часова та поведінкова складові.

Крок 4. Визначається множина ресурсів, утримуваних процесом.

Крок 5. Фіксується запитуваний ресурс або відсутність такого запиту.

Крок 6. Формується або оновлюється сигнатура процесу.

Крок 7. Сигнатура передається для формування поточного стану КС.

Отримана сигнатура є єдиним форматом подання процесу для навчального та оперативного режимів. Платформозалежною залишається лише процедура отримання первинних даних; подальші методи працюють із уніфікованою структурою й не залежать від конкретного системного API.

Коректність методу визначається чотирма умовами: унікальною ідентифікацією процесів і ресурсів, повнотою контрольованих даних, канонічним кодуванням ресурсної складової та часовою узгодженістю параметрів. Порушення цих умов може створити сигнатуру, що не відповідає фактичному локальному стану процесу, тому такий запис повинен бути повторно сформований до передавання на наступні етапи.

Метод побудови бази нечітких правил реалізує навчальний контур і виконує перехід від часової послідовності станів до компактної бази знань. Метод містить такі кроки:

Крок 1. Формується часова послідовність станів комп'ютерної системи.

Крок 2. Із сигнатур формуються навчальні записи.

Крок 3. Послідовно вибираються неопрацьовані сигнатури.

Крок 4. Виділяється ресурсна складова сигнатури.

Крок 5. Визначається прогнозний маркер процесу.

Крок 6. Формуються навчальні пари «сигнатура–маркер».

Крок 7. Ресурсні ознаки нормалізуються до вектора сталої розмірності.

Крок 8. Нормалізовані сигнатури зберігаються з маркерами та часовими даними.

Крок 9. Формується матриця ознак для кластеризації.

Крок 10. Виконується кластеризація методом Fuzzy C-Means на чотири кластери.

Крок 11. Для кожного кластера визначається рівень ризику.

Крок 12. За результатами кластеризації формуються нечіткі правила типу «якщо–то».

Таким чином, прогнозний маркер надає їм ризикову інтерпретацію після завершення FCM. Це зменшує залежність формування правил від експертного налаштування та дозволяє повторно навчати систему на оновлених історичних даних у разі зміни ресурсного навантаження.

Результатом виконання методу є база нечітких правил B. Центри кластерів, параметри функцій належності та оцінки ризику зберігаються разом із правилами; за незмінного простору ресурсних ознак ця база застосовується багаторазово. Це безпосередньо реалізує вимогу винесення навчальної ресурсоємності за межі оперативного циклу.

Метод прогнозування стану взаємоблокування процесів реалізує оперативний контур. Він виконується за подією зміни ресурсної взаємодії і використовує вже сформовану базу нечітких правил:

Крок 1. Перевіряється наявність актуальної бази нечітких правил.

Крок 2. За її відсутності виконується формування бази правил.

Крок 3. Завантажуються та перевіряються правила і параметри кластерів.

Крок 4. Реєструється зміна ресурсного стану процесу.

Крок 5. Формується або оновлюється сигнатура процесу.

Крок 6. Визначається наявність незадоволеного ресурсного запиту.

Крок 7. Сигнатура нормалізується та подається на базу правил.

Крок 8. Обчислюється рівень ризику взаємоблокування.

Крок 9. Формується множина ризикових процесів.

Крок 10. Вилучаються системні процеси та обирається кандидат на перезапуск.

Крок 11. Обраний несистемний процес примусово перезапускається.

Крок 12. Стан системи оновлюється, після чого прогнозування продовжується.

Результатом виконання методу є прогнозне оцінювання поточного ресурсного стану та, за наявності небезпечної конфігурації, сформована множина D_θ. Якщо D_θ порожня, система продовжує спостереження без втручання. Якщо D_θ не порожня, виконується примусовий перезапуск обраного несистемного процесу, після чого оновлюються множина сигнатур A^t і відомості про доступні ресурси.

Метод побудови сигнатури забезпечує однозначне перетворення системних даних у структурований опис процесу; метод побудови бази нечітких правил узагальнює накопичені ресурсні конфігурації засобами Fuzzy C-Means і формує правила з урахуванням фактичних наслідків; метод прогнозування застосовує ці правила до поточних сигнатур після ненадання ресурсу. Разом три методи утворюють завершену послідовність від системної події до оцінювання ризику і превентивного рішення до фактичного виникнення взаємоблокування.

У четвертому розділі розроблено програмний засіб і середовище експериментальної перевірки, що забезпечують отримання подій операційної системи, формування сигнатур процесів, використання бази нечітких правил, оцінювання ризику та формування керуючого рішення. Для імітаційного моделювання використано Python і SimPy, а конфігурації процесів, ресурсів, центрів кластерів і правил задано зовнішніми файлами, що забезпечує відтворюваність експериментів.

Для порівняння досліджено методи ігнорування взаємоблокувань (ІГН), примусового вилучення ресурсу або відкату (ПВР), запобігання умові hold-and-wait (ЗП), алгоритм банкіра (АБ), граф розподілу ресурсів (ГПР), граф очікування (ГО) та запропонований метод прогнозування (МП). Їх основна відмінність полягає у моменті прийняття рішення відносно фактичного формування взаємоблокування.

ІГН не формує активної реакції до таймауту; ПВР, ГПР і ГО реагують після появи ознак сформованого взаємоблокування; ЗП та АБ виконують перевірки до надання ресурсів. Запропонований МП активується після ненадання процесу запитуваного ресурсу, коли ресурсна залежність уже виникла, але замкнений цикл ще може бути відсутнім. У цей момент актуалізується сигнатура, виконується нечітке оцінювання ризику та, за перевищення встановленого порогу, формується множина ризикових процесів.

Імітаційні дослідження проведено для 10 000 процесів у п’яти конфігураціях: 30, 100 і 300 ресурсів за 5 % потенційно небезпечних процесів, а також 30 ресурсів за 10 % і 15 % процесів, що потрапляють до взаємоблокування. Запропонований метод забезпечив завершення 99,85–99,95 % процесів. Accuracy становила 99,65–99,88 %, Recall – 99,00 %, Precision – 98,61–98,67 %, F1-score – 98,80–98,84 %. Частка пропущених небезпечних процесів не перевищувала 1,00 %, а хибних спрацювань – 0,24 %.

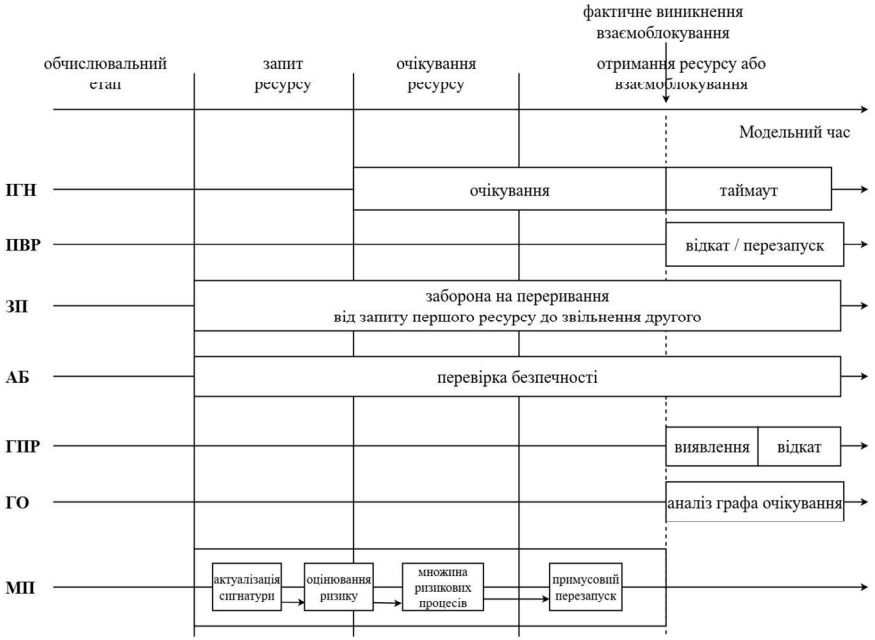


Рис. 2. Часова діаграма реагування методів на зміну ресурсного стану

Експериментальну перевірку на реальній комп'ютерній системі виконано для двох наборів по 10 000 процесів із 5 % і 10 % взаємоблокувань у десяти повторних запусках. Для набору з 5 % взаємоблокувань середні значення Accuracy, Recall, Specificity, Precision і F1-score становили відповідно 99,82 %, 98,00 %, 99,92 %, 98,39 % та 98,19 %; для набору з 10 % – 99,65 %, 98,00 %, 99,83 %, 98,49 % та 98,25 %. Частка хибних спрацювань становила 0,08–0,17 %, а кількість хибних перезапусків була у 12,36–13,10 раза меншою за кількість обґрунтованих.

Прогноз формувався в середньому на 3,1±0,08 мс до фактичного виникнення взаємоблокування для набору з 5 % небезпечних процесів і на 3,6±0,08 мс – для набору з 10 %. Порівняно з методом на основі графа розподілу ресурсів середній час обробки скорочено на 8,6–8,8 %, а пропускну здатність підвищено на 9,4 %. Отриманий часовий резерв використовується для виконання превентивного перезапуску несистемного процесу та звільнення конфліктного ресурсу до замикання циклу очікування.

Особливість прогнозування проілюстровано для двох процесів P1 і P2, що конкурують за ресурси R1 і R2. Після ненадання процесу P1 ресурсу R2 його сигнатура вже містить конфігурацію «утримує R1 – очікує R2», однак цикл ще не сформовано, оскільки P2 не запитує R1. Метод на основі ГПР може зафіксувати взаємоблокування лише після появи зворотного запиту P2→R1. Запропонований МП починає оцінювання раніше – одразу після ненадання R2 процесу P1.

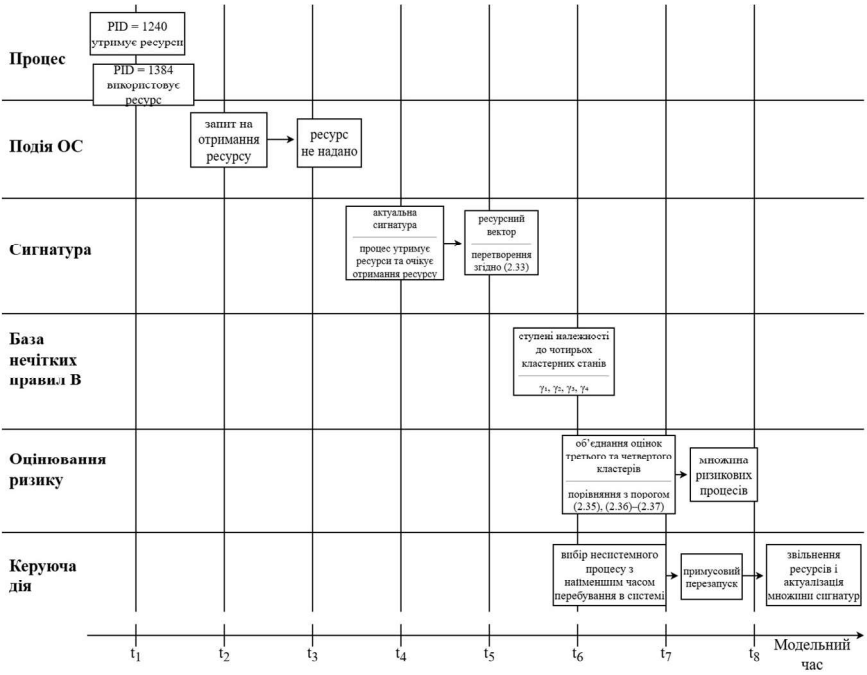


Рис. 3. Часова діаграма прогнозування стану взаємоблокування процесу

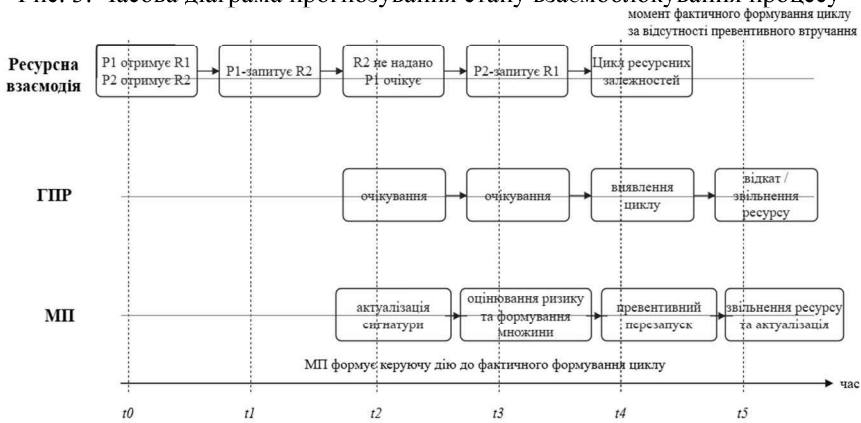


Рис. 4. Часова діаграма зміни ресурсного стану та реагування ГПР і МП

Часова діаграма показує, що до моменту ненадання ресурсу обидва підходи спостерігають однакову послідовність подій. Далі ГПР очікує замкненого циклу, тоді як МП використовує проміжний передблокувальний стан: актуалізує сигнатуру, оцінює ризик і за необхідності виконує превентивну дію. Результати підтверджують достовірність і своєчасність прогнозування та практичну придатність розроблених засобів; при цьому обмеження методу пов'язані з репрезентативністю навчальної вибірки, актуальністю бази правил

і тим, що оперативне оцінювання запускається після події ненадання запитуваного ресурсу.

У додатках наведено матеріали апробації та впровадження результатів дисертації, допоміжні експериментальні дані, конфігураційні файли та лістинги розробленого програмного забезпечення.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення достовірності та забезпечення своєчасності прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах шляхом розроблення та удосконалення моделей, методів і засобів аналізу сигнатур процесів, автоматизованого формування бази нечітких правил та завчасного оцінювання ризику переходу процесів у стан взаємоблокування.

1. Проведено системний аналіз причин та умов виникнення взаємоблокувань, моделей подання ресурсних залежностей і відомих методів їх вирішення. Встановлено, що запобігання та уникнення накладають додаткові обмеження на розподіл ресурсів, а виявлення та усунення мають переважно реактивний характер. Обґрунтовано доцільність переходу до завчасного прогнозування на основі сигнатур процесів, нечіткої кластеризації та нечіткого логічного висновку.

2. Удосконалено архітектуру засобів прогнозування, яка поєднує отримання системних подій, формування сигнатур, накопичення даних, навчання, Fuzzy C-Means кластеризацію, побудову бази правил, оперативне прогнозування та формування керуючого рішення. Відокремлення навчання від оперативного контуру дозволило винести ресурсомісткі процедури кластеризації за межі поточного розподілу ресурсів.

3. Набув подальшого розвитку метод побудови сигнатури процесу, що перетворює різнорідні дані ОС на впорядкований вектор сталої структури. У сигнатурі враховано ідентифікаційні, часові, поведінкові та ресурсні характеристики, зокрема утримувані та запитуваний ресурси. Розділення ознак і навчального маркера забезпечило однакове подання даних під час навчання та прогнозування.

4. Удосконалено метод побудови бази нечітких правил. Навчальна вибірка формується з накопичених сигнатур, ресурсні ознаки нормалізуються, після чого виконується FCM-кластеризація, визначається ризик кластерів і автоматизовано генеруються правила типу «якщо–то». Це зменшило залежність від повного експертного налаштування та створило формалізовану базу знань про типові небезпечні конфігурації.

5. Розроблено метод прогнозування, який після ненадання процесу запитуваного ресурсу оцінює його належність до кластерних станів. Для передблокувального й критичного станів формується множина кандидатів, із якої вилучаються системні процеси; для несистемного процесу з найменшим часом перебування в системі формується рішення про примусовий перезапуск. Це дає змогу розірвати потенційний ланцюг взаємного очікування до фактичного взаємоблокування.

6. Розроблено програмні засоби та проведено імітаційну й експериментальну перевірку. Імітаційне моделювання забезпечило завершення 99,85–99,95 % процесів, Accuracy 99,65–99,88 %, Recall 99,00 %, Precision 98,61–98,67 % і F1-score 98,80–98,84 %. На реальній системі Accuracy становила 99,65–99,82 %, Precision 98,39–98,49 %, F1-score 98,19–98,25 %, а прогноз випереджав фактичне взаємоблокування на 3,1–3,6 мс. Порівняно з графом розподілу ресурсів середній час обробки зменшено на 8,6–8,8 %, пропускну здатність підвищено на 9,4 %.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України та міжнародних наукометричних баз:

1. Ю.П. Кльоц, С.В. Мостовий. Прогнозування взаємоблокувань процесів в комп'ютерних системах. *Електротехнічні та комп'ютерні системи.* – 2015, № 19 (95) – С.205-209. URL: https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/1897/946

2. Nicheporuk A., Klots Y., Yashyna O., Mostovyi S., Nicheporuk Y. Prediction of entering processes into the deadlock state. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2019, 14 (3), pp. 1484–1492. URL: http://doi.org/10.11591/ijeecs.v14.i3.pp1484-1492 (індексована в наукометричній базі Scopus)

3. Мостовий С. Аналіз методів та моделей вирішення задачі взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2021, №5. С.27-31. URL: http://doi.org/10.31891/2307-5732-2021-301-5-27-31

4. Мостовий С., Пирч О. Прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025, №4. С.284-292. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-32

5. Мостовий С. Система прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2026, №2. С.418-424. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-86-49

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Мостовий С.В. Архітектура системи прогнозування взаємоблокування процесів у комп'ютерній системі. *Збірник наукових праць за матеріалами XV Всеукраїнської науково-практичної конференції "Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2023"*, м.Хмельницький, 17-18 листопада 2023р. / ХНУ Хмельницький, 2023. С. 343-345. URL: https://kn.khmnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/18/apkn-2023_corpuspaper.pdf

7. Мостовий С.В. Модель та метод побудови сигнатури процесу для прогнозування взаємоблокувань у комп'ютерній системі. *Збірник наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції "Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024"*, м.Хмельницький, 15-16 листопада 2024р. / ХНУ Хмельницький, 2024. С. 580-583. URL: https://kn.khmnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/18/apkn-2024-corpuspaper.pdf

8. Мостовий С.В. Метод прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерній системі. ITSec: *Безпека інформаційних технологій: мате-*

ріали XV Міжнар.наук.-техн. конф., м. Тернопіль, 27-29 трав. 2026 р. / Тернопіль-Київ:ТНТУ-ДУІКТ, 2026. С. 378-380 URL: https://itsec.tntu.edu.ua/#conference-abstracts

9. Oleg Savenko, Mykola Fedula, Jan Rabchan, Kyrylo Voznyi, Serhii Mostovyi, Anatolii Barabash. The method of parallelization of dynamic sequential system programs using networks of multifaceted processes. *Proceedings of the 7th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS-2026)*. / Khmelnytskyi, 2026. P. 124-142. URL: https://ceur-ws.org/Vol-4242/paper10.pdf

АНОТАЦІЯ

Мостовий С.В. Метод та засоби прогнозування стану взаємоблокування процесів в комп'ютерних системах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2026.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення достовірності та забезпечення своєчасності прогнозування стану взаємоблокування процесів у комп'ютерних системах. Запропоновано підхід до завчасного оцінювання небезпечних ресурсних станів на основі формалізованого подання поведінки процесів у вигляді сигнатур, автоматизованого формування бази нечітких правил із використанням Fuzzy C-Means та нечіткого логічного висновку.

Розроблено комплекс моделей прогнозування, метод побудови сигнатури процесу, метод автоматизованого формування бази нечітких правил та метод прогнозування стану взаємоблокування. Сигнатура поєднує ідентифікаційні, ресурсні, часові та поведінкові характеристики, у тому числі утримувані й запитуваний ресурси. Навчальна частина відокремлена від оперативного прогнозування: кластеризація і формування правил виконуються за накопиченими даними, а в робочому режимі використовується сформована база знань.

Удосконалений метод формування бази правил використовує чотири кластери, що інтерпретуються як нормальна робота, очікування ресурсу без критичного ризику, передблокувальний стан і критичний стан. Після кластеризації ризик кластерів визначається за фактичними наслідками історичних сигнатур, а правила типу «якщо–то» генеруються автоматизовано. Метод прогнозування активується після ненадання процесу запитуваного ресурсу; для передблокувального або критичного стану передбачено примусовий перезапуск несистемного процесу з найменшим часом перебування в системі.

Імітаційне моделювання підтвердило завершення 99,85–99,95 % процесів, Accuracy 99,65–99,88 %, Recall 99,00 %, Precision 98,61–98,67 % і F1-score 98,80–98,84 %. На реальній комп'ютерній системі Accuracy становила 99,65–99,82 %, Precision – 98,39–98,49 %, F1-score – 98,19–98,25 %, а прогноз формувався на 3,1–3,6 мс раніше фактичного взаємоблокування. Порівняно з графом розподілу ресурсів середній час обробки скорочено на 8,6–8,8 %, пропускну здатність підвищено на 9,4 %. Результати впроваджено в ПП «Авіві», ТОВ «ІТТ» та освітній процес Хмельницького національного університету.

Ключові слова: комп'ютерні системи; процес; системні ресурси; взаємоблокування процесів; прогнозування; сигнатура процесу; ресурсна взаємодія;

розподіл ресурсів; нечітка кластеризація; Fuzzy C-Means; база нечітких правил; нечіткий логічний висновок; оцінювання ризику; операційна система.

ABSTRACT

Mostovyi S.V. Method and Tools for Predicting the Process Deadlock State in Computer Systems. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2026.

The dissertation solves the scientific and applied problem of improving the reliability and timeliness of predicting process deadlock states in computer systems. The proposed approach performs early assessment of dangerous resource configurations using formalized process signatures, an automatically generated fuzzy rule base based on Fuzzy C-Means clustering, and fuzzy logical inference.

A set of prediction models, a process-signature construction method, an automated fuzzy-rule-base construction method, and a deadlock-state prediction method have been developed. The process signature combines identification, resource, temporal, and behavioral characteristics, including resources held and the currently requested resource. Training is separated from operational prediction: clustering and rule generation are performed on accumulated observations, while the operational loop uses the previously generated rule base.

The improved rule-base construction method forms four clusters interpreted as normal operation, non-critical resource waiting, a pre-deadlock state, and a critical/deadlock state. Cluster risk is determined after clustering from the actual outcomes of historical signatures, and interpretable “if–then” rules are generated automatically. Prediction is activated when a requested resource is not granted. For pre-deadlock or critical states, the control action is a forced restart of the non-system process with the shortest residence time in the system.

Simulation experiments provided completion of 99.85–99.95% of processes, Accuracy of 99.65–99.88%, Recall of 99.00%, Precision of 98.61–98.67%, and F1-score of 98.80–98.84%. Experiments on a real computer system showed Accuracy of 99.65–99.82%, Precision of 98.39–98.49%, F1-score of 98.19–98.25%, with the prediction generated 3.1–3.6 ms before the actual deadlock. Compared with the resource-allocation-graph method, the average processing time was reduced by 8.6–8.8% and throughput increased by 9.4%. The results were implemented at PE “Avivi”, LLC “ITT”, and in the educational process of Khmelnytskyi National University.

Keywords: computer systems; process; system resources; process deadlock; prediction; process signature; resource interaction; resource allocation; fuzzy clustering; Fuzzy C-Means; fuzzy rule base; fuzzy logical inference; risk assessment; operating system.