

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора

Вовни Олександра Володимировича

на дисертацію Мороза Дмитра Максимовича «Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки, галузь знань 12 – Інформаційні технології

Відгук складено на основі вивчення дисертаційної роботи, наукових праць, що опубліковані здобувачем та документів, які свідчать про реалізацію й впровадження результатів проведених досліджень.

Актуальність теми дисертації. У теперішній час комп'ютерне моделювання є одним з найбільш розповсюджених та ефективних методів дослідження складних динамічних систем. Під час цього наукові дослідження характеризуються наявністю сучасних технічних засобів величезної обчислювальної потужності. Проте, існує широкий клас задач, розв'язування яких зі застосуванням класичного (послідовного) моделювання відзначається неприйнятними часовими витратами, а також недостатньою продуктивністю. У світі спостерігається стрімке зростання числа багатопроцесорних обчислювальних систем кластерного типу та їх сумарної продуктивності.

Отже, одним з визначальних факторів сучасного розвитку обчислювальної техніки є застосування високопродуктивних паралельних і розподілених обчислювальних систем. У зв'язку з цим актуальними є проблеми, пов'язані, по-перше, з конструюванням спеціалізованих багатопроцесорних обчислювальних систем і, по-друге, з ефективною реалізацією на паралельних і розподілених засобах обчислювальної техніки різних прикладних програмних продуктів, що раніше розроблялися лише за класичною однопроцесорною архітектурою.

Актуальна також є проблема розробки нових технологічних процесів, що необхідно не тільки для вирішення практичних і дослідницьких завдань, а також і для використання як складові елементи систем автоматизації та різного роду експертних систем.

У теперішній час паралельні обчислювальні системи є одними з найбільш динамічними засобами обчислювальної техніки. Отже, вважаю цілком виправданим, актуальним і позитивним вибір теми дисертаційної роботи Мороза Д.М. «Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями». Зокрема, на стор. 24 – 27 дисертант аргументовано та логічно доводить необхідність наукового дослідження в умовах сучасного розвитку засобів обчислювальної техніки. Обравши напрям свого дослідження, автор чітко визначив його проблему, яка полягає в розвитку теоретичних і практичних основ створення високопродуктивних обчислювальних систем, побудованих на базі сучасних комп'ютерних функціональних модулів масового виробництва, які мали б забезпечити розв'язування багатовимірних задач, та задач, що вимагають великої кількості процесорного часу (стор. 27).

Визначивши проблему досліджень, дисертантом правильно поставлені наукові завдання (стор. 28 – 29), вірно визначені об'єкт, предмет і методологія дослідження (стор. 29). Для вирішення поставлених завдань автор залучив достатню кількість джерел літератури, проаналізувавши наукові праці та розробки іноземних і вітчизняних вчених. Використання цих матеріалів забезпечило належну обґрунтованість головних положень дисертаційного дослідження, висновків і пропозицій автора.

Дисертаційна робота виконувалась у рамках таких науково-дослідних робіт:

«Високопродуктивні багатопроцесорні системи: особливості конструювання, дослідження оцінок ефективності, застосування до розв'язування прикладних задач» (державний реєстраційний номер 0122U201569), (автор – відповідальний виконавець); «Методологія соціально-

економічного, інформаційного та науково-технічного розвитку регіонів, галузей виробництва, підприємств та їх об'єднань» (розділ «Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks») (державний реєстраційний номер 0116U006782), (автор – відповідальний виконавець); «Розробка інноваційної «зеленої» технології глибинної переробки вугілля з метою отримання термоантрациту та штучного графіту високої якості» (державний реєстраційний номер 0121U109528), (автор – відповідальний виконавець); «Підвищення ефективності організації управління перевезеннями у міжнародному сполученні» (державний реєстраційний номер 0120U105547), (автор – відповідальний виконавець).

Зміст, завершеність, стиль викладу. Мета й завдання, які поставлені автором, знайшли своє відображення в структурі дисертації. Представлена робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел. Додатки на 24 сторінках містять акти впровадження результатів роботи та додаткові результати розробок і досліджень.

Успішне вирішення поставлених завдань дало змогу дисертанту послідовно та концептуально розкрити предмет дослідження, отримавши нові, науково обґрунтовані положення та висновки.

У першому розділі дисертаційної роботи «Проблеми розвитку системних архітектур високопродуктивних інтегрованих середовищ на основі модульних багатопроцесорних обчислювальних комплексів та аналіз засобів автоматизованого контролю параметрів технологічних процесів» (стор. 36 – 54) проаналізовано стан проблеми розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями. Показано, що виникає потреба моделювання архітектури багатопроцесорних модульних обчислювальних систем таким чином, аби вони були здатні розв'язувати прикладні задачі широкого спектра. Доведено, що тема конструювання кластерних багатопроцесорних комплексів на сьогодні є цікавою, актуальною та вона знаходиться на етапі активного розгляду та розвитку.

Відзначено, що застосування стандартних підходів викликає чималі проблеми, подолати які вдається шляхом використання сучасних багатопроцесорних комп'ютерних технологій. Саме вони здатні підвищити показники швидкодії та продуктивності проведених обчислень. Безпосередньо показники високої продуктивності обчислень дають можливість досліджувати багатовимірні задачі, а разом ті з них, що потребують значної тривалості процесорного часу. Показник швидкодії створює можливість ефективного керування технологічними процесами, а також формує базу для розробки перспективних технологічних процесів.

Під час проектування нових багатопроцесорних систем здійснюється облік їх функціональних особливостей. Сучасна технологія розширення HDR дозволяє виконувати обмін обчислювальними даними між вузлами системи зі швидкістю близько 200 Гб/с. З іншого боку, згідно з даними виробника технологія HDR4 має затримку передачі даних, що становить від 0,4 до 0,5 мкс. У такому разі підвищення ефективності та швидкодії багатопроцесорної системи вирішено реалізувати шляхом багатовимірної агрегації каналів мережевих інтерфейсів. За таких обставин обмін обчислювальними даними між вузлами системи було винесено в окрему мережу, яка працює на каналному (другому) рівні з використанням технології channel bonding. Такі дії забезпечують підвищення швидкостей обміну обчислювальними даними між вузлами, а також зменшення завантаженості каналу, який з'єднує згадані вузли комплексу. Під час застосування технології HDR4x2 вдається збільшити швидкість обміну обчислювальними даними з 200 Гбіт/с до 400 Гбіт/с. З іншого боку, завдяки розподілу агрегованих каналів для симетричного використання контролерів з агрегованими компонентами латентність може знизитись до 0,1 мкс.

Проведений аналіз конструювання багатопроцесорних систем показав, що новий інноваційний етап їх розвитку належить до сфери використання нових мережевих технологій. Такий підхід пояснюється істотними відмінностями між мережами кластерної обчислювальної системи та робочих станцій. Відомо, що мережа обчислювальної системи призначається не для зв'язку між окремими

комп'ютерами, а для зв'язку певних обчислювальних процесів. Отже, чим вищою буде пропускна спроможність обчислювальної мережі системи, тим швидше будуть виконані поставлені користувачем паралельні завдання. За таких обставин, технічні характеристики обчислювальної мережі набувають першочергового значення, особливо коли йде мова про багатопроцесорні обчислювальні системи. Зважаючи на ці міркування, було рекомендовано застосувати технологію InfiniBand. Отже, обмін обчислювальними даними між задіяними вузлами багатопроцесорного комплексу здійснюється за допомогою стандарту InfiniBand. Виявилось, що у порівнянні з певними іншими мережевими технологіями, розроблена система може мати такі принципові відмінності: мережеве завантаження процесорів, підтримка режиму VLAN, механізм резервування елементів модуля, спеціально розроблений режим обміну обчислювальними даними між вузлами в мережі комутаторів InfiniBand.

Було визначено, що оцінки ефективності паралелізації обчислень істотно залежить від певних факторів, найважливіший з яких – процес пересилання обчислювальних даних між вузлами багатопроцесорного комплексу, саме він є найбільш повільний етап алгоритму виконуваних обчислень, а це може істотно знижувати ефект від кількості задіяних у кластері процесорів. З огляду на це було встановлено, що один з основних шляхів підвищення показників продуктивності багатопроцесорних комплексів – це агрегація каналів мережеских інтерфейсів в мережі обміну обчислювальними даними між їх slave-вузлами. На підставі цього встановлено, що тема підвищення показників продуктивності багатопроцесорних комплексів завдяки реорганізації структури мережеских інтерфейсів на сьогодні є цікавою, актуальною, а її дослідження знаходиться на етапі активного розвитку.

Порівняльний аналіз розробки згаданої теми показав, що нині проблема агрегації каналів у модульних багатопроцесорних комплексах не розв'язана належним чином. Серед публікацій цієї тематики критично мало робіт у яких досліджувався б вплив архітектури мережі кластерної системи на ефективність розпаралелювання обчислень.

Загалом же, перший розділ дисертації можна вважати закінченим дослідженням теоретико-методологічних засад моделювання складних динамічних систем та їх розв'язання на основі високопродуктивного багатопроцесорного середовища, оскільки саме тут розкривається зміст понять, що досліджуються, окреслюються методологічні підходи, застосування яких є доцільним і необхідним для досягнення поставлених в дисертаційній роботі задач.

Другий розділ дисертаційної роботи «Модульна багатопроцесорна система з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу» (стор. 59 – 91) присвячено висвітленню концепції побудови багатопроцесорного обчислювального комплексу, призначеного для розв'язання досліджуваного в дисертаційній роботі класу задач. Цілком правомірно автор показує, що така система має пікову реальну ефективність і продуктивність. До того ж розроблена система відзначається підвищеною надійністю та високою енергоефективністю. Блоки пропонованої системи реалізовані за допомогою засобів обчислювальної техніки масового виробництва. Автор роботи показує, що набула подальшого розвитку технологія FAWN.

Автор не обходить увагою й принципові відмінності розробленої системи від існуючих (стор. 85 – 86) та вказує особливості її застосування до розв'язування заявленого класу задач (стор. 89 – 93). Цей розділ відображає комплексний формалізований підхід до конструювання модульного багатопроцесорного комплексу з багатовимірною агрегацією мережевих інтерфейсів. Під час аналізу наявних можливостей створення такої системи виявлено, що останнім часом виробники комп'ютерної техніки пропонують пристрої, у яких запроваджені блейд-технології. Отже, сконструювавши багатопроцесорну систему на базі блейд-серверів, отримують готове рішення з необхідними засобами керування та належним мережевим інтерфейсом. Основні переваги такого конструктивного рішення порівняно з іншими: блейд-системи компактніші та зручніші в обслуговуванні, особливості їх конструкції дозволяють зручно формувати необхідну конфігурацію.

У третьому розділі дисертації «Розробка спеціалізованого програмного забезпечення модульного обчислювального комплексу як засоби комутації та керування процесами» (стор. 92 – 117) автор розкриває особливості використання та налаштування системного програмного забезпечення модульної багатопроцесорної системи. Визначено особливість цієї багатопроцесорної системи, у якій майстер-вузол PM001 за допомогою віртуальних мереж Net1 та Net2 зовнішніх і хмарних з'єднань виконує процедуру завантаження даних про керування її роботою та про встановлення конфігурації. У той самий час slave-вузли системи не накопичують дані. Тоді стає зрозумілим, що кожний блейд модульної установки функціонує під керуванням стандартної операційної системи. Потужність кожного вузла, так само як і їх набір у модулі можуть бути різними. У дисертаційній роботі було спроектовано однорідний кластер, взаємодія між вузлами якого відбувається за допомогою використання засобів спеціалізованих бібліотек з потрібними функціями.

Безпосередньо основні принципи функціонування модульної багатопроцесорної системи проілюстровано в цьому розділі з огляду на використання спеціалізованого програмного забезпечення.

У четвертому розділі «Дослідження ефективності модульної системи в режимі багатовимірної агрегації каналів її мережевих інтерфейсів» (стор. 118 – 143) Мороз Д.М. проводить дослідження ефективності розробленої багатопроцесорної обчислювальної системи для різних режимів її роботи. Позитивною стороною проведених досліджень вважаю, що автор приділяє велику увагу шляхам підвищення ефективності розробленої системи завдяки реорганізації мережевого інтерфейсу. Під час цього основна увага приділялась особливостям впливу мережевого інтерфейсу розробленої системи на показники її ефективності. Аналіз виявлених режимів роботи мережевого інтерфейсу та їх вплив на ефективність багатопроцесорних систем дозволив визначити умови роботи комутаційної матриці в режимі наскрізної комутації. Такий підхід забезпечує високу швидкість передачі пакетів даних та сприяє поліпшенню

показників ефективності багатопроцесорної системи. З огляду на зазначене, вважаю що, дисертанту вдалося вивести аналітичні співвідношення для визначення оптимального числа вузлів багатопроцесорної системи та виконати перевірку правильності підбраного мережевого устаткування.

У п'ятому розділі «Комп'ютеризований контроль параметрів сучасних складних технологічних процесів» (стор. 144 – 173) дисертант розглядає проблеми розробки нових технологічних процесів термічної обробки металу. Під час цього розроблено установку процесу термічної обробки довгомірного сталевого виробу, яку використовують для виготовлення високоміцних кріпильних виробів методом холодного об'ємного штампування. Ця модель має на меті поліпшити технологічні властивості металопрокату завдяки забезпеченню високої дисперсності та однорідності структури зразка на всій площині його перерізу. Технологічний процес термічної обробки сталі набуває таких переваг, як висока продуктивність, знижене енергоспоживання, поліпшення експлуатаційних характеристик. Цих переваг автору вдалося досягти завдяки застосуванню багатопроцесорної обчислювальної системи, виконаної у вигляді окремого модуля. За допомогою спеціального програмного забезпечення вона задає й контролює необхідні температурні режими на всій площині перерізу зразка під час нагрівання та витримці металу, а за необхідністю можна контролювати тепловий режим обробки сталі в інтервалі температур відпалювання.

Загальні висновки дисертації відповідають основному змісту роботи та висвітлюють наукові й практичні результати.

Дисертаційне дослідження Мороза Дмитра Максимовича чітко структуроване. Як результат – логічний та зрозумілий виклад стану розвитку багатопроцесорних обчислювальних систем та подальші передумови для перспективного їх розвитку. Отже, дисертація написана за логічно побудованим планом, має чітку структуру, що дозволило автору в повному обсязі розкрити тему дослідження, послідовно проаналізувати всі основні питання та успішно завершити свою наукову роботу.

Також необхідно зазначити, що автору вдалося поєднати декілька наукових підходів, що відносяться до розробки проблеми застосування високопродуктивних обчислень, з-поміж яких – концепція побудови високоефективної багатопроесорної кластерної системи підвищеної надійності; концепція визначення оцінок ефективності багатопроесорної кластерної системи для різних режимів її функціонування.

Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях

На тему дисертації опубліковано 33 наукові праці, серед яких одна монографія, один патент, 4 праці входять у міжнародні наукометричні бази SCOPUS та Web of Science, 7 наукових статей у фахових журналах і збірниках, 6 публікацій у зарубіжних наукових виданнях, 6 тез доповідей, що входять до наукометричної бази SCOPUS, а також 9 публікацій за матеріалами вітчизняних конференцій та симпозіумів. Основні результати роботи опубліковано у фахових виданнях, вони охоплюють усі положення, що виносяться на захист.

Основні положення, наукові результати й практичні розробки дисертації доповідались та обговорювались на міжнародних і національних конференціях та симпозіумах і презентувались у збірниках наукових праць.

Наукова новизна дослідження полягає, насамперед, в тому що у дисертаційній роботі започатковано новий комплексний формалізований підхід до конструювання модульної багатопроесорної системи з багатовимірною агрегацією мережевого інтерфейсу, що дозволило реалізувати автоматизований контроль параметрів складних технологічних систем.

Під час цього отримано такі основні наукові результати:

Уперше розроблено багатопроесорну обчислювальну систему, де передбачено багатовимірну агрегацію каналів мережевого інтерфейсу. У цій системі завдяки новому багатоканальному гібридному шлюзу NVIDIA Skyway InfiniBand у зв'язці з процесорним модулем нового покоління TCA обладнаного інтерфейсом NVMe2.* та жорстким диском SSD, а також за допомогою віртуальних локальних мереж, проміжних буферів пам'яті керованих

комутаторів, механізму резервування основних компонентів системи було створено принципово нові можливості її функціонування порівняно з іншими обчислювальними середовищами, що дозволяє істотно підвищити керованість системи, зокрема розвантажити центральний процесор (через обслуговування трафіку InfiniBand), скоротити час на перемикання режимів роботи віртуальних мереж, збір, передачу, опрацювання та зберігання результатів обчислень і, як наслідок, підвищити ефективність усієї багатопроесорної системи в цілому.

Уперше в багатопроесорних системах реалізовано багатовимірну агрегацію каналів мережевого інтерфейсу на основі шести віртуальних локальних мереж VLAN, що дає можливість у порівнянні з іншими багатопроесорними системами, не тільки підвищити ефективність розпаралелювання, але й істотно зменшити час розрахунків завдяки забезпеченню високошвидкісного доступу до пам'яті slave-вузлів. У процесі обміну даними між вузлами зменшується навантаження на систему CPU, а також знижується завантаження каналу, який проходить між згаданими вузлами, унаслідок чого між ними скорочується час граничного обміну даних.

Уперше, порівняно з іншими багатопроесорними системами, шляхом використання нового стандарту NVMe2.* накопичувачів SSD створено нові можливості «конективності» main-вузла обчислювальної системи з різними обчислювальними середовищами, що зумовлює підвищення швидкості обміну даними між основними елементами обчислювальної системи та сприяє розвантаженню системної шини.

Уперше за допомогою застосування крос-панелі або WEB-інтерфейсу з'явилася можливість змінювати топологію локальних мереж системи, адаптувавши їх структури до розв'язування задач заявленого типу.

Уперше було оцінено ефективність кластерної системи під час формування багатоканальних режимів її мережевого інтерфейсу. Результати такого оцінювання виражено через параметри обчислювальної системи, що дає можливість раціональним чином здійснювати компоновку її вузлів. До того ж було вдосконалено аналітичні залежності за допомогою яких уточнено

оптимальне число її вузлів через параметри багатопроцесорної кластерної системи. Це створило передумови для розв'язування відповідної задачі за мінімально можливий час. Також було виконано розрахунки завантаженості каналів комутації обчислювальної системи з метою перевірки коректності налаштування мережевого устаткування.

Уперше на основі багатопроцесорного обчислювального комплексу створено систему автоматизованого контролю необхідних температурних режимів термічної обробки (ТО) металевого виробу в режимі реального часу, коли відбувались процеси рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі. Запропонований підхід дозволяє виконувати автоматизований контроль технологічних параметрів ТО металу. Під час цього відбувається автоматизований контроль температури зразка в центрі його перерізу, завдяки чому забезпечується надання металу необхідних властивостей, зокрема всій площині перерізу та за довжиною зразка.

Удосконалено технологію ТО металу з використанням внутрішнього теплоносія, що дозволяє суттєво скороти тривалість процесу ТО металу під час утворення в матриці феритно-перлітних і феритно-перлітно-бейнітних структур, на відміну від інших технологічних процесів сфероїдизації сталі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблені багатопроцесорні обчислювальні технології спрямовуються на розв'язування широкого кола прикладних задач і дозволяють підвищити точність, продуктивність й ефективність математичного моделювання. Математичні моделі, методи й апаратні засоби реалізовано у вигляді програмного продукту та промислових зразків, що дозволило використовувати їх у діяльності підприємств, науково-дослідних організаціях та закладах вищої освіти.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, їх достовірність і новизна обумовлена використанням сучасних експериментальних методів дослідження, їх

несуперечністю теоретичним уявленням і результатам досліджень інших авторів, модельними розрахунками на модульній багатопроцесорній обчислювальній системі та використанням апробованих програмних засобів для обробки результатів експерименту.

Загалом наукове дослідження Мороза Дмитра Максимовича характеризується структурованістю, методичною завершеністю та чіткістю зроблених висновків. Послідовно та логічно розкриваються, аналізуються й аргументуються положення, винесені на захист. Їх зміст доказово розкривається за допомогою методів емпіричного та теоретичного дослідження. На основі глибокого аналізу об'єкта дисертаційного дослідження, наукової розробки та інтерпретації автор доходить точних теоретичних висновків.

Зауваження до дисертаційної роботи та дискусійні положення. Позитивно оцінюючи представлену дисертацію як результат наукового дослідження важливої проблеми, слід **висловити ряд міркувань і зауважень**, які мають бути розглянуті під час захисту та зможуть допомогти автору в його подальшій науковій роботі.

1. У роботі часто вживаються довгі складнопідрядні речень. Особливо це проявилось під час висвітлення положень наукової новизни (стор. 29, перше положення; стор. 30, друге положення). Проте, це не заважає розумінню змісту роботи та може вважатися певною особливістю авторського стилю.

2. Велика кількість умовних скорочень у дисертації ускладнює сприйняття матеріалу дослідження.

3. Вважаю, що розділ 2 «Модульна багатопроцесорна система з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу» (стор. 59 – 91) переобтяжено інженерними викладками конструювання конкретної реалізації багатопроцесорної обчислювальної системи, крім того, деякі рисунки подані з надлишковою деталізацією.

4. Розділ 4 «Дослідження ефективності модульної системи в режимі багатовимірної агрегації каналів її мережевих інтерфейсів» (стор. 118 – 143) виконано з певним дублюванням аналізу отриманих результатів у двох різних

форматах подання даних: табличному та графічному. Вважаю за доцільне подавати такі результати в одному, зручному для аналізу форматі.

5. Розділ 5 «Автоматизований контроль параметрів сучасних складних технологічних процесів» (стор. 144 – 173) , безумовно, має важливе значення як для розвитку гірничо-металургійних технологій, так і паралельних обчислень, проте його переобтяжено викладками і деякими поняттями із металургійної тематики, а система керування контурів установки термічної обробки довгомірного сталевого виробу, яка моделює гібридну багатопроцесорну систему, на мою думку, висвітлюється у недостатньому обсязі.

Відсутність наявності порушення академічної доброчесності. Під час вивчення результатів дисертаційної роботи порушень академічної доброчесності та її принципів не було виявлено.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Висловлені зауваження не змінюють позитивної оцінки поданої наукової роботи. Дисертація відрізняється оригінальністю, високим науковим рівнем і новизною, строгим логічним обґрунтуванням, має важливе наукове та практичне значення. Висновки та положення дисертації аргументовані та достовірні. Публікації автора повно відображають зміст дисертації та підтверджують достатньо високий рівень проведеного дослідження. Зміст роботи, об'єкт і предмет дослідження, основні положення та результати відповідають спеціальності, за якою дисертація подана до захисту.

Дисертація Мороза Дмитра Максимовича «Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями» відповідає спеціальності 122 – Комп'ютерні науки та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету

Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Дисертація Мороза Дмитра Максимовича «Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями» є самостійною, завершеною науковою роботою, в якій міститься рішення проблеми, що має істотне значення для науки і техніки. Автор дисертації Мороза Дмитра Максимовича заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки, галузь знань 12 – Інформаційні технології.

Офіційний опонент: доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних систем та мереж,
Національного авіаційного університету

Олександр ВОВНА