

## ВІДГУК

рецензента доктора технічних наук, професора кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Лактіонова Івана Сергійовича на дисертаційну роботу Мороза Дмитра Максимовича «Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями», представлену до захисту в разову спеціалізовану раду на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки, галузь знань 12 – Інформаційні технології

**Актуальність теми дисертації.** В теперішній час практика висуває різного роду проблеми, що пов'язані з оперативним і надійним збором та опрацюванням даних, повне рішення яких у більшості випадків можливе тільки шляхом застосування багатопроцесорних обчислювальних комплексів. На сьогодні відома й широко апробована значна кількість різних варіантів побудови високопродуктивних обчислювальних систем. Один із перспективних напрямів цієї діяльності – розробка й використання таких систем на основі "блейд"-технологій. Визначальна особливість побудови подібних комплексів полягає в застосуванні мережевої технології, вибір якої залежить передусім, від класу розв'язуваних користувачами задач. Отже, виникає проблема створення такої архітектури багатопроцесорних модульних обчислювальних систем, яка дозволяла б розв'язувати велику кількість різних прикладних задач. Таким чином, тема розробки кластерних багатопроцесорних систем на сьогодні є актуальною та такою, що перебуває на етапі свого сталого розвитку. Також варто акцентувати увагу на тому, що за допомогою високопродуктивних модульних систем було знайдено ефективний спосіб опрацювання значної кількості прикладних актуальних задач.

На сьогоднішній день розвиток багатопроцесорних кластерних систем перейшов на більш високий рівень із використанням нових сучасних мережевих технологій. При цьому ефективність необхідного на цьому етапі розпаралелювання обчислень зумовлена багатьма чинниками, серед яких вирішальним є вибір та організація мережевого інтерфейсу. Аналіз режимів його функціонування в багатопроцесорній системі приводить до виникнення такої науково-прикладної задачі: синтез науково-прикладних рішень, що є збалансованими з точки зору конструктивних особливостей архітектури обчислювальних мереж багатопроцесорних кластерних систем та їх інтегральною ефективністю.

В дисертаційній роботі Мороз Д.М. запропонував вирішити таку науково-прикладну задачу шляхом багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу. При цьому обмін даними між обчислювальними вузлами було винесено в окрему мережу, яка працює на каналному рівні з використанням технології *channel bonding*. Такий підхід було спрямовано на збільшення швидкості обміну даними між вузлами кластера і зменшення завантаження каналу, який з'єднує вузли кластера. Під час розробки багатопроцесорної системи дисертант використовував нові серійні технічні комплектуючі.

Крім того, дисертант показав, що новий якісний рівень розвитку багатопроцесорних кластерних систем пов'язаний із використанням нових сучасних мережевих технологій. Нині задачі, що пов'язані з вибором і аналізом мережевих технологій для модульних багатопроцесорних кластерних систем, не набули належного розвитку, так само як і задачі реорганізації структури мережевого інтерфейсу шляхом агрегації його каналів.

З іншого боку необхідно зазначити, що вдосконалення наявних та створення принципово нових технологічних процесів ТО металу потребує

значних матеріальних витрат на проведення багатьох натурних експериментів, які проводяться в лабораторних, дослідно-промислових умовах, а також на виробничих установках. Цілком очевидно, що тільки застосовуючи багатопроцесорні комплекси можна суттєво скоротити кількість експериментальних досліджень та відповідний час на їх проведення, аби отримати необхідну інформацію для створення й упровадження нових технологічних розробок. Дисертант показав, що запроваджуючи в практику сучасні багатопроцесорні комп'ютерні технології можна ефективно керувати виробничими процесами.

Отже, науково-прикладна задача розвитку сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого керування технологічними процесами, які відображають процеси металургійного виробництва (наприклад, металургійної теплофізики), є актуальною.

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.** Отримані пошукачем наукові результати розв'язують науково-прикладну задачу розвитку теоретичних і практичних основ удосконалення архітектур модульних багатопроцесорних систем шляхом упровадження багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу, а також за рахунок використання шести віртуальних локальних мереж надання можливості не тільки підвищувати ефективність розпаралелювання, але й істотно зменшувати час обчислень, забезпечивши високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів системи, створивши при цьому умови для автоматизованого керування технологічними процесами. Це дозволило дисертанту отримати наступні основні наукові результати:

Дисертантом уперше розроблено багатопроцесорну обчислювальну систему, де передбачено багатовимірну агрегацію каналів мережевого інтерфейсу. У цій системі за рахунок нового багатоканального гібридного шлюзу NVIDIA Skyway InfiniBand у зв'язці з процесорним модулем нового

покоління TCA обладнаного інтерфейсом NVMe2.\* і жорстким диском SSD, а також за допомогою віртуальних локальних мереж, проміжних буферів пам'яті керованих комутаторів вдалося 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 багатопроцесорної системи в цілому.

Дисертантом уперше в багатопроцесорних системах реалізовано багатовимірну агрегацію каналів мережевого інтерфейсу на основі шести віртуальних локальних мереж VLAN, що дало можливість у порівнянні з іншими багатопроцесорними системами, не тільки підвищити ефективність розпаралелювання, але й істотно зменшити час обчислень за рахунок забезпечення високошвидкісного доступу до певної пам'яті обчислювальних slave-вузлів.

Дисертантом уперше, порівняно з іншими багатопроцесорними системами, шляхом використання нового стандарту NVMe2.\* накопичувачів SSD створено нові можливості спряження main-вузла обчислювальної системи з різними обчислювальними середовищами, що зумовлює підвищення швидкостей обміну обчислювальними даними між основними елементами обчислювальної системи та сприяє розвантаженню системної шини.

Дисертантом уперше за допомогою застосування крос-панелі або WEB-інтерфейсу реалізовано можливість змінювати топологію локальних мереж системи, адаптувавши їхні структури до розв'язування задач потрібного типу.

Дисертантом уперше на основі багатопроцесорного обчислювального комплексу створено систему комп'ютерного контролю необхідних температурних режимів термічної обробки (ТО) металевого виробу в режимі

реального часу, коли відбувались процеси рекристалізації та сфероїдизувального відпалювання каліброваної сталі. Запропонований підхід дозволяє виконувати комп'ютеризований контроль технологічних параметрів ТО металу. При цьому відбувається комп'ютеризований контроль температури зразка в центрі його перерізу, завдяки чому забезпечується надання металу необхідних властивостей, зокрема всій площині перерізу і вздовж зразка.

*Достовірність наукових положень*, поданих в дисертаційній роботі, зумовлюється наступними чинниками:

*Методологію дослідження.* Дисертант ретельно розробив методологію дослідження, яка включала кроки з обґрунтування структури обчислювальної системи, розробці алгоритмів роботи, моделювання процесів комп'ютеризованого контролю виробничими технологіями, емуляції робочих умов та валідації результатів на реальних макетах.

*Експериментальна база досліджень та тестування.* Дисертант провів низку експериментів із використанням різних тестових сценаріїв, які відображали реальні умови роботи розробленої установки. При цьому аналізувалися показники продуктивності, точності та інші важливі параметри системи.

*Порівнянням з існуючими рішеннями.* Дисертант проводив порівняльний аналіз своєї системи з існуючими рішеннями. При цьому порівнювалися продуктивність, ефективність, масштабованість та інші аспекти.

*Публікації та підтримка.* Результати дослідження були опубліковані в рецензованих наукових журналах та апробовані на відповідних конференціях. Інші науковці та фахівці мали можливість ознайомитися з результатами, а також скористатися кодом та алгоритмами для подальших досліджень.

*Реплікація результатів.* Інші дослідники та фахівці мали можливість повторити експерименти та валідацію на основі опублікованих даних та коду.

Усе відзначене підтверджує достовірність та відтворюваність результатів і висновків дисертаційної роботи, що рецензується.

Аналіз змісту розділів та використовуваних методів у дисертаційній роботі дозволяє зробити висновок про належну обґрунтованість наукових положень дисертації Мороза Д.М. При цьому наукові положення та висновки, представлені у дисертації, обґрунтовано теоретичним аналізом, результатами практичного впровадження на підприємствах та в науково-дослідній організації.

Можна відзначити, що дисертаційна робота Мороза Д.М. є завершеним науковим дослідженням.

**Практичне значення та цінність отриманих результатів.** Дисертаційна робота Мороза Д.М. виконана на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Результати дисертації використовувалися в проєктах: «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).

Впровадження розробленої Морозом Д.М. багатопроцесорної системи має значний практичний вплив на різні сфери технологій та бізнесу, зокрема:

*Підвищення продуктивності.* Розроблена багатопроцесорна система з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу дозволяє розподіляти завдання між різними процесорами, що сприяє значному підвищенню загальної продуктивності. Це особливо важливо у великих обчислювальних завданнях, таких як наукові дослідження, обробка великих обсягів даних, комп'ютеризованого керування складними технологіями.

*Забезпечення паралельності.* Розроблена багатопроцесорна система дозволяє виконувати кілька завдань паралельно, що сприяє більш ефективному використанню ресурсів та скороченню часу обробки.

*Відповідність режиму роботи в реальному часі.* У представлених в дисертаційній роботі додатках багатопроцесорна система дозволяє забезпечити швидку обробку даних та вчасне прийняття рішень.

*Масштабованість.* Розроблена багатопроцесорна система передбачає можливість масштабування шляхом додавання нових процесорів, що дозволяє адаптувати систему під зростаючі потреби.

*Обробка великих обсягів даних.* В сучасному світі обробка великих обсягів даних є ключовою. Розроблена багатопроцесорна система з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу сприяє збільшенню швидкості обробки та аналізу великих даних, що спрямовано до знаходження інших цінних інсайтів.

*Застосування в інтелектуальних системах.* Розроблена багатопроцесорна система може використовуватися для завдань штучного інтелекту й машинного навчання, прискорюючи процес навчання, а також дозволяючи швидше створювати та вдосконалювати моделі.

*Енергоефективність.* Розроблена багатопроцесорна система дозволяє ефективніше використовувати енергію, оскільки різні процесори можуть бути активовані або деактивовані в залежності від завдань.

*Мініатюризація.* Розроблена багатопроцесорна система спрямована на використання у вбудованих технологічних процесах, що дозволяє отримати більше обчислювальної потужності при менших розмірах.

Таким чином, поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання розвитку теоретичних і практичних основ удосконалення архітектур модульних багатопроцесорних систем шляхом упровадження багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.** За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Мороза Д.М. повністю відповідає Стандарту вищої освіти за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки та напрямом досліджень відповідно до освітньо-наукової програми Комп'ютерні науки, що запроваджена в НТУ «Дніпровська політехніка».

В представленій роботі наведені результати досліджень повністю відповідають поставленій меті та задачам. Висновки до кожного розділу чіткі та лаконічні.

Обрані дисертантом методи дослідження відповідають поставленим завданням та сьогоденним трендам розвитку комп'ютерних і інформаційних технологій. Описані конструктивні реалізації та теоретичні викладки повною мірою обґрунтовані та відрізняються можливості їх відтворення та перевірки.

Отримані в дисертаційній роботі результати аналізовані з урахуванням поставлених дослідницьких завдань. Наведені графіки, діаграми та таблиці повною мірою відрізняються обґрунтованістю та сприяють зрозумінню інтерпретації певних процесів..



Представлені результати досліджень у повній мірі обґрунтовані науковими доказами, включаючи теоретичні аргументи та підтвердження на підставі емпіричних даних.

Наведені висновки до кожного розділу дисертаційної роботи відповідають здобутим результатам. Вони відзначаються логічним виокремленням основних досягнень дослідження.

Наведені літературні джерела правильно цитовані, перелік літератури включає всі використані джерела.

Отже, можна відзначити, що дисертаційна робота Мороза Д.М. є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «комп'ютерні науки».

Розглянувши звіт унікальності тексту дисертаційної роботи Мороза Дмитра Максимовича, можна зробити висновок, що його дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації та текстових запозичень без посилань на відповідні літературні джерела.

**Мова та стиль викладання результатів дисертації.** При аналізі мови та стилю дисертації було помічено, що автор зазвичай використовує чітку та конкретну лексику, що допомагає передати його дослідницькі результати точно та зрозуміло. Текст організований за логічними блоками, просліджується методично вивіреним зв'язок між розділами, що забезпечує достатньо наглядний перехід від одного аспекту дослідження до іншого. В цілому, дотримання академічного стилю, уникнення надмірних деталей та вживання паралельних структур робить текст цілком доступним для аудиторії та допомагає передати ідеї наукового дослідження.

Також варто відзначити стиль мовлення, який характеризується виразністю та чіткістю. Автор використовує наглядні приклади та ілюстрації, що допомагають усвідомити основні ідеї та результати досліджень.

В цілому, дисертація написана із дотриманням наукового стилю з використанням сучасних термінів та мовних аспектів. Дисертація демонструє високий професіоналізм та володіння загальноприйнятою термінологією в сфері інформаційних технологій. Автор вміло використовує терміни та поняття, що визначені в наукових джерелах.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 214 сторінок.

У вступі викладаються мета та основні завдання дослідження, а також обґрунтовується його актуальність. Описуються проблематичні аспекти, що виникають під час розробки багатопроцесорних обчислювальних комплексів. Автор також наголошує на науковій і практичній новизні досягнутих результатів. Здобувач вказує на власний внесок у дослідження, подає інформацію щодо апробації матеріалів дисертації та перелік публікацій, пов'язаних із темою досліджень.

У першому розділі дисертації здобувачем викладено аналіз сучасних багатопроцесорних систем, а також наведені задачі, які потребують вирішення під час обробки значної кількості процесорного часу. В основі такого аналізу лежить систематичний огляд напрямів розвитку сучасних багатопроцесорних обчислювальних систем. Окремо відзначена роль застосування багатопроцесорних систем під час комп'ютеризації та автоматизації технологічних процесів. У висновках розділу підкреслено актуальність вирішуваної науково-прикладної задачі та напрями подальших досліджень.

Другий розділ дисертації присвячено опису запропонованої багатопроцесорної обчислювальної системи з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу. Зокрема наголошується на використанні сучасного технічного обладнання, такого як нового багатоканального

гібридного шлюзу NVIDIA Skyway InfiniBand у зв'язці з процесорним модулем нового покоління TCA обладнаного інтерфейсом NVMe2.\* і жорстким диском SSD. Це дозволяє створити принципово нові можливості функціонування системи 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, обробку та зберігання результатів обчислень і, як наслідок, підвищити ефективність усієї багато процесорної системи в цілому.

Третій розділ дисертації логічно впливає з першого, де автор висвітлює особливості використання й налаштування системного програмного забезпечення розробленої модульної багато процесорної системи. Основна особливість цього розділу дисертації орієнтована на висвітлення проблем системної агрегації багатоканального мережевого інтерфейсу модульного комплексу.

Четвертий розділ дисертаційного дослідження є логічним розвитком попередніх. В ньому дисертант висвітлює власні результати досліджень щодо оцінок ефективності розробленої багато процесорної системи. Принципова відмінність наведених досліджень полягає в розробці методики впливу мережевого інтерфейсу багато процесорної системи на показники її ефективності. При цьому 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 було уточнено оптимальне число вузлів системи через параметри багато процесорної кластерної будови. 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.

П'ятий розділ дисертації присвячено вирішенню задач розробки нових комп'ютеризованих засобів щодо контролю технологічних процесів термічної обробки металу. При цьому на основі багатопроцесорного обчислювального комплексу створено систему комп'ютеризованого контролю необхідних температурних режимів термічної обробки (ТО) металевого виробу в режимі реального часу, коли відбувались процеси рекристалізації та сфероїдизивного відпалювання каліброваної сталі. Запропонований підхід дозволяє виконувати комп'ютеризований контроль технологічних параметрів ТО металу. При цьому відбувається вимірювальний контроль температури зразка в центрі його перерізу, завдяки чому забезпечується надання металу необхідних властивостей, зокрема всій площині перерізу і вздовж зразка.

Особливість запропонованої технології комп'ютеризованого контролю ТО металу полягає у використанні 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.

В загальних висновках до дисертації подано чітке узагальнення головних результатів дослідження, підкреслюється їх важливість, теоретична та практична цінність науково-прикладної розробки.

**Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.** Наукові результати дисертаційного дослідження висвітлені у 33 наукових працях, серед яких одна монографія, один патент на корисну модель, 3 наукові праці входять до періодичних видань із міжнародних наукометричних баз SCOPUS та Web of Science, 7 наукових статей у фахових журналах і збірниках категорії Б, 14 робіт

апробаційного характеру (в тому числі, у виданнях Scopus) та інше. Основні результати роботи опубліковано у фахових вітчизняних і закордонних виданнях, вони охоплюють усі положення, що виносяться на захист.

Науковий рівень здобувача достатньо високий, суттєвий особистий внесок прослідковується у кожній роботі. Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки, зауваження та дискусійні положення щодо дисертаційної роботи.**

1. Дисертант показує, що для розширення обчислювальних можливостей можуть використовуватися компоненти розширення. Проте автор не розкриває характерні особливості налаштування мережевого інтерфейсу для зазначеного випадку.

2. В дисертаційній роботі не висвітлюються питання переконфігурації мережевого інтерфейсу працездатного вузла, коли виходить з ладу відповідне обладнання.

3. У дисертаційній роботі не набула розвитку процедура діагностики неполадок розробленої системи, що не дозволяє оцінити об'єктивність припущень автора щодо надійності роботи системи в реальних умовах застосування.

4. Дисертант не розкриває питання меж застосування розширення обчислювальних можливостей розробленої системи.

5. В дисертаційній роботі отримано аналітичні співвідношення для визначення оптимального числа вузлів багатопроцесорної системи, проте дисертант обходить питання впливу застосування числових методів розв'язання задач щодо продуктивності багатопроцесорних систем і не вказує, яким чином ці особливості будуть впливати на відповідні аналітичні співвідношення.

6. У своїх дослідженнях автор використовує технологію паралельних обчислень, проте не приділяє достатньої уваги техніці та алгоритмам розподілу команд та даних між функціональними вузлами системи.

7. Під час аналізу відомих багатопроцесорних систем автор оперує такими характеристиками, як «значне енергоспоживання», «висока вартість експлуатації», «висока складність експлуатації», «висока латентність» та інше. Проте, на мій погляд, такий стиль викладення результатів критичного аналізу систем-аналогів носить характер суб'єктивних суджень і не дозволяє об'єктивно оцінити відповідність техніко-функціональних характеристик аналізованих систем реальним експлуатаційним вимогам.

8. Автор відносить наукові праці № 2, 3, 5, 6 та 9 до категорії «Основні наукові результати дисертації», проте роботи 3, 5, 6 і 9 є матеріалами конференцій, а отже, не є періодичними та мають бути віднесені до категорії «Наукові праці апробаційного характеру». Наукова праця № 2 є патентом на корисну модель, що, на мій погляд, має відношення до наукових праць, які додатково відображають наукові результати роботи. Проте, варто зазначити, що навіть запропоновані мною зміни формальних ознак щодо категорій, до яких відносяться вищезазначені публікації, не впливають на необхідну кількість та повноту викладення матеріалів дисертації в наукових публікаціях.

Висловлені зауваження не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів дисертаційної роботи і не впливають на її позитивну оцінку, а можуть слугувати лише предметом наукової дискусії під час захисту.

**Висновки про дисертаційну роботу.** Вважаю, що дисертаційна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії Мороза Дмитра Максимовича «Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями» виконана на високому науковому рівні, не містить порушень

академічної доброчесності, є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукові задачі, що має істотне значення в галузі інформаційних технологій. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені Порядком 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.

Здобувач Мороз Дмитро Максимович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань Інформаційні технології за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки.

**Рецензент,**

доктор технічних наук, професор кафедри  
програмного забезпечення комп'ютерних систем  
Національного технічного університету  
«Дніпровська політехніка»

Іван ЛАКТИОНОВ