

## ВІДГУК

рецензента доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Корнієнка Валерія Івановича на дисертаційну роботу Мороза Дмитра Максимовича «Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями», подану до захисту в разову спеціалізовану раду на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки галузі знань 12 Інформаційні технології

Актуальність обраної теми. Наразі одним із визначальних чинників розвитку обчислювальної техніки є використання високопродуктивних паралельних і розподілених обчислювальних систем. У зв'язку з цим актуальними є проблеми конструювання спеціалізованих багатопроцесорних обчислювальних систем та ефективної реалізації на паралельних і розподілених засобах обчислювальної техніки різних прикладних програмних продуктів, що раніше напрацьовані для розрахунку на ЕОМ з однопроцесорною архітектурою. Актуальною також є проблема розробки нових програмних продуктів, необхідних не тільки для вирішення практичних і дослідницьких завдань, а також і для використання як складові елементи різного роду експертних систем, систем управління технологічними процесами тощо.

Паралельні обчислення на сьогоднішній день є однією з найбільш динамічних та цікавих галузей розвитку засобів обчислювальної техніки. Тому, вважаю цілком виправданим, актуальним і раціональним вибір теми дисертаційної роботи Мороза Дмитра Максимовича «Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями». Зокрема, на с. 25–26 дисертант аргументовано та логічно доводить необхідність наукового

дослідження в умовах сучасного розвитку засобів обчислювальної техніки. Обравши напрям свого дослідження, автор чітко визначив мету, яка полягає в удосконаленні структури та підвищенні продуктивності багатопроцесорних систем із застосуванням багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу. Крім того, передбачено підвищення надійності й енергоефективності систем, їх конструювання у вигляді блоків, складених із пристроїв обчислювальної техніки масового виробництва (с. 27–28).

Поставлені наукові завдання (с. 28–29), відповідають визначеним меті, об'єкту, предмету та методології дослідження (с. 29). Для вирішення поставлених завдань автор залучив достатній обсяг фахової літератури, проаналізував численні наукові праці та розробки іноземних і вітчизняних вчених. Використання цих матеріалів забезпечило належну обґрунтованість головних положень дисертаційного дослідження, висновків і пропозицій автора.

Структура та зміст дисертаційної роботи. Мета і завдання, поставлені автором, знайшли своє відображення в структурі дисертації, яка складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У вступі відображено: актуальність роботи; сформульовано мету роботи; об'єкт, предмет та методи дослідження; отримані нові наукові результати та практична значущість роботи; наведено інформацію про апробацію й впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Перший розділ дисертаційної роботи містить огляд літературних джерел щодо розвитку багатопроцесорних обчислювальних систем, що дало можливість дисертанту обґрунтувати вибір методики дослідження, визначити поняття та розкрити сутність зарубіжних та вітчизняних концепцій вирішення задач розподільного моделювання, виокремити та проаналізувати процес конструювання модульних

багатопроцесорних систем з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу.

В цьому розділі дисертант також показує актуальність задачі вдосконалення режимів термообробки (ТО) металевих виробів і створення для цього нових технологій із використанням багатопроцесорних комплексів. Такий підхід сприяє зменшенню кількості експериментальних досліджень і їх тривалості, що загалом дозволяє отримувати необхідну інформацію з метою створення та впровадження різноманітних технологічних нововведень.

У цьому розділі дисертації рекомендовано застосовувати багатопроцесорні системи в установці для інтенсифікації сфероїдизивного відпалювання сталевих виробів. Її використання має на меті істотно скоротити тривалість технологічного процесу сфероїдизивного відпалювання металу шляхом проведення неізотермічної витримки. Таким чином поліпшуються технологічні властивості металопрокату і зокрема в досягненні високої дисперсності та структурної однорідності зразка за всією площиною його перерізу.

Таким чином, перший розділ дисертації присвячений дослідженням теоретико-методологічних засад конструювання багатопроцесорних систем з розподіленою областю обчислень, де окреслюються методологічні підходи для розв'язання поставлених в дисертаційній роботі задач.

В другому розділі дисертаційної роботи обґрунтовується метод побудови багатопроцесорного обчислювального комплексу, призначеного для розв'язування досліджуваного в дисертаційній роботі класу задач. Блоки пропонованої системи реалізовані за допомогою засобів обчислювальної техніки масового виробництва. При цьому автор показує, що набула подальшого розвитку технологія *FAWN*.

Автор на відміну від існуючих вводить в багатопроцесорну систему окрему обчислювальну мережу обміну даними стандарту *InfiniBand*, що реалізовує підтримку режиму *VLAN*, застосовує спеціально організований режим обміну даними в мережі керованого комутатора *KIB*, а також режим мережевого завантаження процесорів та механізм резервування ключових компонентів модуля. При цьому, через термінал або *WEB*-інтерфейс можна змінювати конфігурацію обчислювальної мережі, адаптуючи її структуру до розв'язування конкретного типу задач. Крім того, завдяки застосуванню засобів *RDMA* технології *InfiniBand* здійснюється прямиий обмін даними між оперативною пам'яттю вузлів багатопроцесорної системи, що поліпшує швидкодію обчислень, розвантажує систему *CPU* при обміні даними та знижує завантаження каналу між вузлами кластера. За рахунок модульного принципу побудови можна спростити процес проектування, нарощування або заміни обчислювальних вузлів, що вийшли з ладу.

Автором за рахунок застосування віртуальних локальних мереж *VLAN* та завдяки багатовимірній агрегації каналів мережевих інтерфейсів вдалося збільшити пропускну спроможність порту мережевих інтерфейсів з 200 до 800 Мб/с, що в чотири рази підвищує швидкості в процесі обміну даними між обчислювальними вузлами багатопроцесорного комплексу.

У третьому розділі дисертації висвітлюються питання розробки спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ). Зауважу, що під час використання будь-якої технології паралельного програмування, зрештою, отримують комплекси програм. У зв'язку з цим розгляд засобів розробки паралельних комплексів програм дисертант відокремлює від розгляду засобів їх комунікації та виконання. Узагальнюючи цю обставину, дисертант дійшов висновку, що робота багатопроцесорних систем забезпечується декількома видами

спеціалізованого системного програмного забезпечення, які і розкриваються в даному розділі дисертаційної роботи.

В даному розділі також висвітлені нові можливості віддаленого доступу до пам'яті процесорів системи завдяки застосуванню засобів *RDMA* технології *InfiniBand*. Так, принцип *RDMA*, разом з формуванням окремої обчислювальної мережі в середовищі обміну даними, та реалізація механізмів *VLAN* створили можливість обміну даними між пам'яттю вузлів багатопроцесорної системи без додаткової буферизації. Зазначений підхід не потребує активної роботи ОС, бібліотек або додатків стосовно тих вузлів системи, у пам'ять яких спрямовано запит. Запропоновані механізми дали змогу підвищити швидкодію обчислень під час розв'язування сильно зв'язаних задач, забезпечити високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів системи та обмін даними між ними, розвантажити процесори *CPU-GPU* при обміні даними та знизити завантаження каналу, що проходить між обчислювальними вузлами.

Крім того, дисертант показує, що паралельні програми для локального збереження результатів і проміжних обчислень застосовують систему *TSA*, перевага якої полягає в простоті впровадження та суттєвому розвантаженні майстер-вузла.

У четвертому розділі проведено дослідження щодо виявлення показників ефективності модульної системи в режимі багатовимірної агрегації каналів її мережевих інтерфейсів, які характеризують продуктивність розробленої багатопроцесорної системи. Розроблено модель оцінювання показників продуктивності модульної багатопроцесорної системи, запропонованої в дисертаційній роботі. В результаті проведених досліджень було виведено основні аналітичні співвідношення, що визначають залежність часу розв'язування задачі від основних параметрів багатопроцесорної системи. Вони показали, що час розрахунку задачі змінюється за нелінійним законом від обсягу

оперативної пам'яті вузла, пропускної здатності мережі системи та характеру обміну даними між обчислювальними вузлами.

Для аналізу перевірки коректності вибору мережевого устаткування дисертант ввів коефіцієнт завантаженості каналів комутації багатопроцесорної системи. Виконано розрахунки параметра завантаженості каналів комутації обчислювальної системи, що дозволило переконатися в коректності підбору мережевого устаткування.

Подані в розділі теоретичні положення узгоджуються з даними числового моделювання характеристик ефективності кластерної багатопроцесорної системи. Порівняльний аналіз результатів розрахунків, виконаних після введення режиму агрегації каналів мережевого інтерфейсу, показав, що підвищення швидкості обміну даними між вузлами обчислювального комплексу сприяло зменшенню завантаження каналів, які з'єднують ці вузли. Таким чином було поліпшено показники ефективності запропонованої багатопроцесорної системи.

У п'ятому розділі розглянуто особливості моделювання ТО металу із застосуванням багатопроцесорної системи, яка для цього використовує відповідне математичне та програмне забезпечення. Розроблена модель ТО сталевих виробів, яка використовується в процесах рекристалізаційного та сфероїдизувально-відпалювання каліброваного металовиробу. При цьому було показано, що удосконалення наявних і створення принципово нових видів технологічних процесів ТО металу пов'язано із суттєвими матеріальними витратами на проведення великої кількості натурних експериментів. При цьому використання багатопроцесорних обчислювальних систем дозволяє суттєво скоротити необхідну кількість експериментальних досліджень. Розроблена модель обчислювальної установки використовується з метою вивчення

швидкісних режимів ТО довгомірних виробів. Результати цих досліджень стають корисними у створенні новітніх технологій, режимів та устаткування для теплової обробки металів.

Запропоновано використання сучасних багатопроцесорних комп'ютерних технологій з метою підвищення характеристик продуктивності та швидкодії обчислень, а це, своєю чергою, дозволяє ефективно керувати технологічними процесами. На основі багатопроцесорної системи із засобам спеціального ПЗ можливо здійснювати управління потрібними температурними режимами металозаготовки по всій площині її перерізу під час нагрівання й витримки металу із контролем теплового режиму обробки сталевих виробів в інтервалі заданих температур відпалювання. Наведені в роботі результати експериментів свідчать про можливість реалізації моделювання швидкісних режимів обробки металевих заготовок як складову конструювання новітніх технологічних процесів.

У додатках представлено, зокрема, акти впровадження результатів досліджень в діяльності підприємств, науково-дослідної організації, вищих навчальних закладів. Крім того, тут наводяться акти при розробці дисертантом наукових тем дослідження з наступними номерами державної реєстрації: 0116U006782, 0121U109528, 0120U105547.

Ступінь обґрунтованості, новизни та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, обумовлені використанням сучасних експериментальних методів дослідження, їх відповідністю сучасним 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 детальністю зроблених висновків. Послідовно і логічно розкриваються, аналізуються й аргументуються положення, винесені на захист.

Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, які одержані в дисертаційній роботі, полягає у новому підході до процедури конструювання багатопроцесорних систем, визначення їх продуктивності і розробки математичного забезпечення системи.

При цьому:

1. Уперше розроблено багатопроцесорну обчислювальну систему, де передбачено багатовимірну агрегацію каналів мережевого інтерфейсу, що дозволило створити принципово нові можливості її функціонування порівняно з іншими обчислювальними середовищами, зокрема істотно підвищити керованість системи, 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.

2. Уперше розроблено метод багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу обчислювальної системи на основі шести віртуальних локальних мереж VLAN, що у порівнянні з іншими багатопроцесорними системами, не тільки підвищує ефективність розпаралелювання, але й істотно зменшує час обчислень за рахунок забезпечення високошвидкісного доступу до пам'яті slave-вузлів. При цьому в 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.



3. Уперше запропонована обчислювальна технологія, яка шляхом використання нового стандарту NVMe2.\* накопичувачів SSD підвищує можливості поєднання main-вузла обчислювальної системи з різними обчислювальними середовищами, що зумовлює підвищення швидкості обміну даними між основними елементами обчислювальної системи та сприяє розвантаженню системної шини; крім того за допомогою застосування крос-панелі або WEB-інтерфейсу з'явилася можливість змінювати топологію локальних мереж системи, адаптувавши їхні структури до розв'язування задач заявленого типу.

4. Уперше розроблена математична модель кластерної системи з оцінкою її параметрів, що дає можливість раціональним чином здійснювати компоновку вузлів системи. До того ж вдосконалено аналітичні залежності, за допомогою яких визначено оптимальне число її вузлів через параметри багатопроцесорної кластерної системи, що дозволяє зменшити час розв'язування відповідної задачі. При цьому виконано розрахунки завантаженості каналів комутації обчислювальної системи з метою перевірки коректності налаштування мережевого устаткування.

5. Уперше на основі багатопроцесорного обчислювального комплексу розроблено структуру автоматизованої системи управління, що реалізує комп'ютерний контроль необхідних температурних режимів ТО металевого виробу в режимі реального часу, а це дозволяє удосконалити технологію ТО металу з використанням внутрішнього теплоносія із суттєвим скороченням тривалості процесу ТО металу на відміну від інших технологічних процесів сфероїдизації сталі.

Важливість отриманих результатів для науки і практики полягає в наступному. Розроблені в дисертації багатопроцесорні обчислювальні технології спрямовано на дослідження прикладних задач широкого спектра і дозволяють суттєво підвищити продуктивність, ефективність

і точність опрацювання експериментальних даних. Моделі, методи й апаратні засоби подані у вигляді програмного забезпечення та промислових зразків. Практичне значення проведених досліджень полягає в тому, що в прикладній сфері з'являються такі можливості:

- застосовувати розроблену багатопроесорну систему з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу як інтегроване середовище для забезпечення розподіленого проектування програмних та апаратних засобів, що здатні виконувати автоматизований контроль параметрів сучасних технологічних процесів;

- реалізувати процес модифікації розробленої обчислювальної системи для гарантування необхідних оцінок ефективності в результаті розв'язування певного класу прикладних задач, зокрема, реалізувати процес конструювання багатопроесорної системи, призначеної для використання в системах управління сучасними технологічними процесами з одночасним оцінюванням продуктивності та прискорення обчислень;

- за рахунок застосування процесорного модуля з інтерфейсом *TCA* нового покоління та жорсткого диска *SSD*, що має інтерфейс *NVMe*, знизити час завантаження операційної системи в *main*-вузлі на 180 %, у *slave*-вузлах на 320 %; час програмної реорганізації мережевого інтерфейсу скоротити на 530 %; до того ж на 250 % знизити час обробки, пересилання й зберігання проміжних та кінцевих результатів розрахунку; причому на 240 % зменшити тривалість обробки системних статистичних даних;

- шляхом застосування віртуальних локальних мереж *VLAN* і багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу збільшити пропускну спроможність порту мережевого інтерфейсу від 200 до 800 Мб/с, що в чотири рази підвищує швидкість обміну даними між вузлами багатопроесорної системи;

– істотно скоротити кількість та час опрацювання експериментальних даних, а також підвищувати ефективність обчислень, використавши багатопроцесорну систему з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях. Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи Д.М. Мороза достань повно викладені у 33 наукових працях, 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 України категрії «А» та «Б», 6 публікацій у зарубіжних наукових виданнях, 6 тез доповідей, які входять до наукометричної бази SCOPUS, а також 9 публікацій за матеріалами вітчизняних конференцій і симпозіумів. Основні результати роботи опубліковано у фахових виданнях, вони охоплюють усі положення, що виносяться на захист.

Академічна доброчесність. У дисертаційній роботі та публікаціях, що містять основні результати наукових досліджень Д.М. Мороза, порушень принципів академічної доброчесності (плагіату та самозапозичень, фабрикації та фальсифікації) не виявлено.

Як зауваження до представленої роботи вважаю відмітити наступне:

1. Здобувач в дисертаційній роботі достатньо детально висвітлив аналіз напрямків розвитку багатопроцесорних обчислювальних систем, проте, не вказав, чому використовується не промислова система, а спеціально розроблена.

2. У дисертаційній роботі при висвітленні питань вибору процесорів і мережевого інтерфейсу багатопроцесорної системи для різних режимів її роботи не наводиться обґрунтування вибору активного устаткування обчислювального комплексу, зокрема, мережевих карт та комутаторів.

3. В дисертаційній роботі отримано аналітичні залежності для визначення оптимального числа вузлів багатопроцесорної системи. На жаль, дисертант обходить питання впливу числових методів на продуктивність багатопроцесорних систем і не вказує, яким чином ці особливості будуть впливати на відповідні аналітичні залежності.

4. В дисертаційній роботі розглянуті впровадження засобів паралельних обчислень для розв'язування задач металургійного виробництва. Розроблені методи, моделі та засоби, як стверджує дисертант, можуть застосовуватися для розв'язування широкого кола задач, тож доцільно було б навести аналіз області застосування розробленого підходу.

Наведені зауваження не мають принципового характеру та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. В цілому, дисертація відрізняється достатньо високим рівнем наукової новизни, логічним обґрунтуванням, має важливе наукове та практичне значення. Висновки і положення дисертації аргументовані і коректні. Публікації автора повно відображають зміст дисертації та підтверджують достатньо високий рівень проведеного дослідження. Зміст роботи, об'єкт і предмет дослідження, основні положення і результати відповідають спеціальності, за якою дисертація подана до захисту.

Висновок. 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.

За актуальністю розв'язаних задач, обсягом дослідження, науковим рівнем і практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота повністю відповідає діючим вимогам щодо наукового ступеня доктора філософії. Є всі підстави констатувати, що дисертація Мороза Дмитра Максимовича «Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями», є самостійною, завершеною науковою роботою, в якій міститься рішення задач, що мають важливе значення, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки, галузі знань 12 Інформаційні технології.

*Рецензент:*

*доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри безпеки інформації та  
телекомунікацій Національного технічного  
університету «Дніпровська політехніка»*

*Валерій КОРНІЄНКО*