

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ТКАЧ МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.032.24

**УДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ПІДВИЩЕННЯ
ПРОДУКТИВНОСТІ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РОЗПОДІЛЕНОЇ ОБЛАСТІ ОБЧИСЛЕНЬ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Красноармійськ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національній металургійній академії України
Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Швачич Геннадій Григорович,
Національна металургійна академія України
(м. Дніпропетровськ), завідувач кафедри прикладної
математики та обчислювальної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Семенов Сергій Геннадійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут» (м. Харків),
завідувач кафедри обчислювальної техніки та
програмування;

доктор технічних наук, доцент
Федоров Євген Євгенович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний
університет» (м. Красноармійськ), завідувач кафедри
комп'ютерних наук.

Захист відбудеться «27» квітня 2016 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.03 Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 85300, м. Красноармійськ, пл. Шибанкова, 2, корп. 1, ауд. 1.211.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 85300, м. Красноармійськ, пл. Шибанкова, 2.

Автореферат розісланий «26» березня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Г.В. Мокрий

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У сучасних умовах кластерні системи конструюються шляхом використання обчислювальних вузлів на базі стандартних процесорів, з'єднаних високошвидкісною системною мережею (інтерконектом), а також, як правило, допоміжною і сервісною мережами. Разом з тим, останнім часом лідери виробництва апаратних засобів комп'ютерної техніки пропонують свій формфактор, зокрема компанії *IBM*, *LinuxNetworx* та ін. мають у своєму розпорядженні кластерні рішення, побудовані на базі лезових технологій (так званих блейд-технологій). Дійсно, формуючи кластер на базі серверів-лез, користувач фактично отримує готове шасі, оснащене необхідним інтерконектом і засобами керування. Досить розглянути розробки від компаній *HP BladeSystem c7000*, *IBM BladeCenter*, *SUN Blade 6000*, *Dell PoweEdge 1955*, щоб виявити цілий ряд можливостей для побудови кластерів на основі таких рішень. Блейд-системи компактні й зручні в обслуговуванні, їхнє конструктивне рішення дозволяє зручно формувати необхідну конфігурацію, проте воно трохи дорожче в реалізації порівняно з традиційним підходом.

Необхідність дослідження й розробки багатопроцесорних обчислювальних систем відзначається в роботах провідних зарубіжних і вітчизняних учених. Досліджуючи проблеми проектування, створення й експлуатації багатопроцесорних обчислювальних комплексів для розв'язування конкретного типу задач, як правило, беруть до уваги перший досвід таких розробок, що має назву "Беовульф", який було створено Томасом Стерлінгом і Доном Беккером. На сьогодні джерельна база створення багатопроцесорних обчислювальних систем поповнилась дослідженнями багатьох авторів, серед яких провідні: Д. Івенс, Є. Валях, Г. Родриг, Г.І. Шпаковський, В.П. Гергель, В.М. Баканов, Є.О. Башков, В.П. Іващенко, В.А. Святний, І.І. Левін та ін.

У той же час проблема моделювання архітектури високопродуктивних багатопроцесорних систем обробки даних, які використовуються при розв'язуванні задач із розподіленою областю обчислень, не набула свого розвитку. Зауважимо, що практичне застосування таких систем орієнтовано на розв'язування задач у викладеній далі постановці. Наприклад, маємо при цьому різницеву сітку розмірності M ; час виконання обчислень, передбачених умовою задачі при використанні однопроцесорної системи, являє собою параметр t . Але його величина не має особливого значення. Принциповою виявляється проблема збільшення розміру сітки, який перевищить кількість зосереджених там даних, котрі можуть оброблятися в пам'яті одного процесора. Саме реалізація такої процедури є визначальною для більш детального розрахунку або пояснення деяких нових ефектів у досліджуваних процесах.

З іншого боку, щоб досягти допустимої точності числового розв'язку згаданих задач, їх область визначення необхідно покрити сіткою, яка містить не менше $100 \times 100 \times 100$ вузлів. У кожній точці сітки потрібно обчислити 5–20 функцій, а стан усього ансамблю функцій належить визначити протягом 10^2 – 10^4 моментів часу.

Отже, необхідно отримати порядку 10^9 – 10^{11} результатів проміжних обчислень. До того ж для обчислення та обробки проміжних результатів, як показує практика, потрібно виконати в середньому 10^2 – 10^3 арифметичних операцій. Таким чином, стає очевидним, що проведення тільки одного варіанта числового експерименту в рамках розв'язування зазначеного типу задач зазвичай тягне за собою реалізацію не менше 10^{11} – 10^{14} операцій. А якщо врахувати потребу дослідити певну кількість варіантів, налагодити процес компіляції та роботу операційної системи, то стає очевидним, що швидкодія обчислювальної техніки має вимірюватися мільярдами операцій за секунду.

У той же час, сучасні методи аналізу продуктивності багатопроцесорної системи не дозволяють визначити оптимальне число вузлів для розв'язування прикладних задач. Не набули також належного розвитку дослідження, присвячені аналізу впливу мережевого інтерфейсу на продуктивність системи в цілому. Для оцінювання цього показника ще не визначено основних аналітичних співвідношень через параметри системи. Недостатньо досліджено проблему уповільнення обчислень у багатопроцесорних системах з розподіленою областю обчислень.

Сказане зумовлює важливість проблеми конструювання й застосування багатопроцесорних обчислювальних систем з розподіленою областю обчислень та актуальність теми дисертаційної роботи “Удосконалення структури та підвищення продуктивності багатопроцесорних систем із застосуванням розподіленої області обчислень”.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до планів науково-дослідних робіт кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки НМетАУ: НДР “Розробка наукових основ нових високоефективних енергозберігаючих технологій термічної переробки вуглецевмісних матеріалів і відходів з використанням вихрових процесів”, проект “Ідентифікація процесів тепло- й масообміну прямими та оберненими методами в задачах металургійної теплофізики”, номер державної реєстрації Г107F10004 (автор – відповідальний виконавець); НДР “Розробка технічних основ фізико-технічних процесів обробки бейнітних сталей при економному легуванні”, проект “Математичне моделювання режимів термічної обробки при швидкісному циклічному нагріванні й охолодженні довгомірного виробу”, номер державної реєстрації 0106U002210 (автор – відповідальний виконавець); НДР “Методологія управління підприємствами різних організаційно-правових форм та форм власності” (розділи «Високопродуктивні багатопроцесорні системи», «Модульні багатопроцесорні системи з розподіленою областю обчислень», «Моделювання прикладних задач металургії та візуалізації векторів розв'язків на основі використання багатопроцесорних обчислювальних систем») номер державної реєстрації 0107U001146 (автор – відповідальний виконавець).

Мета й завдання дослідження. Мета дослідження полягає в удосконаленні структури та підвищенні продуктивності багатопроцесорних систем із застосуванням розподіленої області обчислень. Крім того, передбачено підвищення надійності й енергоефективності системи, їх конструювання у вигляді блоків, складених із пристроїв обчислювальної техніки масового виробництва, а через

зростання попиту на лезові конфігурації визначити шляхи подальшого розвитку конструювання зазначеного типу обчислювального комплексу.

Для досягнення даної мети необхідно виконати такі завдання:

Створити концепцію побудови багатопроесорної обчислювальної системи з розподіленою областю обчислень, реальна продуктивність якої була б максимальною для заявленого типу задач. У зв'язку з цим система повинна мати механізми прямого доступу до пам'яті процесорів, підвищену надійність і високу енергоефективність.

Виявити основні закономірності в зміні часу розв'язування задачі залежно від зміни області обчислень багатопроесорної системи. При цьому треба вивести основні аналітичні співвідношення, що відображають залежність часу розв'язування задачі від основних параметрів багатопроесорної системи.

Дослідити варіант використання гіпотетичного комп'ютера з необмеженою пам'яттю та провести його порівняльний аналіз з роботою реальної багатопроесорної системи. Вивести при цьому аналітичні співвідношення, які визначають особливості формування області обчислень для такого комп'ютера. Провести порівняльний аналіз функціонування реальної багатопроесорної системи і гіпотетичного комп'ютера з необмеженою пам'яттю для визначення основних факторів, що впливають на продуктивність розпаралелювання реальної обчислювальної системи.

Виконати дослідження, пов'язані з визначенням коефіцієнта уповільнення обчислень, зумовленого збільшенням області обчислень багатопроесорної системи, розподіленої серед її вузлів, порівняно з варіантом комп'ютера, який має необмежену область обчислень. Вивести аналітичні співвідношення для розрахунку коефіцієнта уповільнення обчислень.

З огляду на вплив мережевого інтерфейсу вивести аналітичні співвідношення для визначення оптимального числа вузлів багатопроесорної системи, що забезпечить розв'язування задачі з мінімальним уповільненням розрахунків.

Створити концепцію паралельних схем числово-аналітичної візуалізації векторів розв'язування заявленого типу задач.

Для проведення обчислювальних експериментів на базі застосування багатопроесорної обчислювальної системи з розширюваною областю обчислень розробити пакет прикладних програм (ППП), завдяки якому реалізується розв'язок коефіцієнтних обернених задач теплопровідності методом математичного моделювання (ППП повинен мати блок візуалізації даних).

Об'єктом дослідження є інформаційні процеси обробки даних у багатопроесорних обчислювальних системах, що має забезпечувати підвищення продуктивності багатопроесорних систем в умовах зміни області обчислень.

Предмет дослідження – удосконалення структури та підвищення продуктивності багатопроесорних систем із застосуванням розподіленої області обчислень спрямовано на встановлення основних режимів роботи мережевого устаткування багатопроесорних систем та вивчення їх впливу на показники продуктивності, на визначення оптимального числа вузлів багатопроесорної системи залежно від режимів її роботи.

Методи дослідження. Для розробки й вивчення обчислювальної багатопроесорної системи використовувалися основні положення теорії обчислювальних систем, теорії паралельних обчислень, теорії високопродуктивних обчислень, теорії побудови операційних систем. У математичному моделюванні прикладних задач металургії застосовувались основні засади теорії числового моделювання процесів тепло- й масообміну, обчислювальної гідромеханіки. Методологія дослідження математичного моделювання багатовимірних нестационарних задач математичної фізики спирається на апроксимаційні властивості поняття про різницевої схеми розщеплення.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі виконано теоретичне узагальнення й відображено нові тенденції розвитку основ створення багатопроесорних обчислювальних систем з розподіленою областю обчислень, побудованих на базі використання сучасних модулів масового виробництва.

Основні наукові результати, отримані особисто автором:

Уперше розроблено структуру багатопроесорної обчислювальної системи з розподіленою областю обчислень, яка за рахунок застосування окремої, здатної налаштуватися під конкретний тип задач обчислювальної мережі для обміну даних, керованих комутаторів, механізмів прямого доступу до пам'яті процесорів дає мінімальне уповільнення обчислень та максимальну продуктивність для заявленого типу задач.

Уперше досліджено варіант використання гіпотетичного комп'ютера з необмеженою пам'яттю та проведено порівняльний його аналіз з роботою реальної багатопроесорної системи, що дозволило окреслити основні фактори, які впливають на продуктивність цієї системи.

Уперше для багатопроесорної системи з розподіленою областю обчислень визначено коефіцієнт уповільнення обчислень, зумовлений збільшенням області обчислення. Це дозволило вивести аналітичні співвідношення для визначення оптимального числа вузлів багатопроесорної системи при розв'язуванні задач заявленого типу.

Удосконалено технологію реорганізації архітектури мережевого інтерфейсу багатопроесорної системи з розподіленою областю обчислень, що дозволило знизити коефіцієнт уповільнення обчислень і підвищити їх продуктивність при розв'язуванні задач конкретного типу.

Набула подальшого розвитку ідея розробки схем підвищеного порядку точності на основі числово-аналітичного підходу до розв'язування заявленого типу задач, яка дозволила порівняно з традиційними схемами підвищити економічність і швидкодію обчислень. Показано, що такий підхід передбачає найбільш високий ступінь векторизації обчислень, їхню максимально паралельну алгоритмічну форму.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена багатопроесорна обчислювальна система з розширюваною областю обчислень дозволяє розв'язувати широке коло прикладних задач. Апаратні засоби, математичні моделі й методи реалізовано у вигляді промислових зразків та програмного продукту. Отримані результати дозволяють:

- застосовувати розроблену багатопроеесорну обчислювальну систему з розподіленою областю обчислень як середовище, що дає можливість виконувати математичне моделювання конкретного типу задач;

- реалізувати процес розширення обчислювальних можливостей багатопроеесорної системи для забезпечення необхідної продуктивності за рахунок використання додаткових модулів;

- на основі аналізу коефіцієнта уповільнення обчислень застосовувати багатопроеесорну систему з розширюваною областю обчислень для розв'язування конкретного типу задач з оптимальним числом процесорних вузлів;

- застосовувати таку обчислювальну систему для дослідження широкого кола математичних моделей за рахунок реорганізації топології її мережі;

- на основі аналізу коефіцієнта уповільнення обчислень застосовувати багатопроеесорну систему з розширюваною областю обчислень для розв'язування задач заявленого типу за допомогою оптимального числа процесорних вузлів;

- завдяки застосуванню засобів *RDMA (Remote Direct Memory Access)*, а також формуванню окремої обчислювальної мережі та реалізації режиму *VLAN* забезпечити процедуру прямого обміну даними між оперативною пам'яттю вузлів багатопроеесорної системи, що дозволило підвищити швидкодію обчислень під час розв'язування сильнозв'язаних задач, забезпечити високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів системи й обмін даними між ними, розвантажити *CPU* при обміні даними та знизити завантаження каналу, який проходить між вузлами системи;

- на основі розроблених пакетів прикладних програм проводити процедуру візуалізації даних теплофізичних експериментів, задіявши при цьому багатопроеесорну обчислювальну систему з розширюваною областю обчислень.

Матеріали патенту “Модуль високоефективної багатопроеесорної системи підвищеної готовності” використовуються для конструювання багатопроеесорних обчислювальних систем у закладах освіти, конструкторських бюро, на підприємствах, що займаються комп'ютерним моделюванням, а матеріали патенту “Установка для термічної обробки довгомірного сталевого виробу” застосовуються в технології рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі.

Нові підходи до роботи з багатопроеесорними обчислювальними системами, відображені в монографіях “Сучасні комунікаційні технології в модульних багатопроеесорних системах: досвід використання, дослідження оцінок ефективності, перспективи застосування”, “Інформаційне забезпечення систем прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах” поширено на підготовку спеціалістів відповідного фаху.

Результати дисертаційної роботи впроваджено з підтвердженням відповідними актами в діяльність:

- підприємства: відкритого акціонерного товариства “Дніпропетровський агрегатний завод” тема Г107F10004 у 2005 р.;

- підприємства: відкритого акціонерного товариства “Дніпропетровський агрегатний завод” тема Г107F1047 у 2009 р.;

- вищого навчального закладу: Національної металургійної академії України;

а) тема дослідження № 0107U001146 (етап 9, акт 1) «Методологія управління підприємствами різних організаційно-правових форм і форм власності» (етап «Високопродуктивні багатопроекторні системи») у 2013 р.;

б) тема дослідження № 0107U001146 (етап 11, акт 2) «Методологія управління підприємствами різних організаційно-правових форм і форм власності» (етап «Модульні багатопроекторні системи з розподіленою областю обчислень») у 2015 р.;

в) тема дослідження № 0107U001146 (етап 12, акт 3) «Методологія управління підприємствами різних організаційно-правових форм і форм власності» (етап «Моделювання прикладних задач металургії та візуалізації векторів розв'язків на основі використання багатопроекторних обчислювальних систем») у 2015 р.

Особистий внесок здобувача. Усі основні положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, розроблено й одержано автором самостійно. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів підтверджується самостійним дослідженням теоретичних і методологічних аспектів завдання, яке розглядається. У дисертації не були використані ідеї співавторів публікацій. У роботах, що опубліковані в співавторстві, особисто здобувачем розроблено такі положення й отримано такі результати: [4, 22] – дослідження й розробка багатопроекторних систем та використання їх у системах автоматизації та прийняття рішень; [47-50, 53, 102] – теоретичне обґрунтування та розробка методики впливу мережевого інтерфейсу на ефективність розпаралелювання; [66-68, 71, 72] – теоретичне обґрунтування та методика оцінки ефективності багатопроекторних систем; [71, 52] – розробка та конструювання багатопроекторної системи; [10, 87, 88] – дослідження, розробка та впровадження концепції паралельних обчислень на основі числово-аналітичних схем; [22, 78] – теоретичне обґрунтування, дослідження та розробка методики підбору компонентів модульної багатопроекторної системи; [98] – дослідження й розробка методики спряження модулів багатопроекторної системи; [12] – теоретичне обґрунтування, дослідження й впровадження нового підходу за методом Монте-Карло; [75] – дослідження особливості використання багатоядерних процесорів у паралельних моделювальних середовищах; [78] – дослідження проблеми підбору компонентів модульної багатопроекторної системи в задачі термічної обробки металовиробу; [79] – дослідження й розробка методики узгодження компонентів модульної багатопроекторної обчислювальної системи; [81] – методика визначення оптимального числа вузлів багатопроекторної обчислювальної системи; [100] – розробка концепції розподіленого моделювання задач теплообміну.

Апробація результатів дисертації. Проблематика, структура, положення та результати дослідження обговорювалися на засіданнях і семінарах кафедри прикладної математики й обчислювальної техніки Національної металургійної академії України. Матеріали дисертації доповідались та обговорювалися на двох міжнародних практичних конференціях, всеукраїнських і всеросійських конференціях, на двох всеукраїнських семінарах, міждержавних конференціях і на сімох міжнародних конференціях, а саме: Бъдещето проблемите на световната наука: материали за 4-а международна практична конференция. – София, 2008. –Т. 21. Съвременни технологии на информации; Образование и наука на 21 от век:

матеріали за 4-а міжнародна практична конференція. – Софія, 2008. – Т. 11. Сьвременни технологии на информации.; Materiály IV Midzнародnej naukowipraktycznej konferencji. – Т. 11. Nowoczesne informacyjne technologie: Przemysl. Nauka i stadia, 2008; Strategy of Quality in Industry and Education: VI Intrenational Conference, June, 1 – 8, 2010, Varna; Bulgaria. – Varna, 2010. – V. 2. Proceedings; Strategy of Quality in Industry and Education: VI Intrenational Conference, June, 1 – 8 2010, Varna; Bulgaria. – Varna, 2005. – V. 2. Proceedings; Strategy of Quality in Industry and Education : VII Intrenational Conference, June, 3 – 10, 2011, Varna; Bulgaria. – Varna, 2008. – V. 2. Proceedings; Научное творчество XXI века: материалы IV Всероссийской научн.-практ. конф. с международным участием; Красноярск, апрель 2011 г. – Красноярск, 2011; Научное творчество XXI века: сб. статей. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2012. – Т. 3; Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: VI міжнародна наук. конф. (2014 р., м. Кам'янець-Подільський): тез. доп.; М-во освіти і науки України, Кам'янець-Подільський нац. ун-т. – Кам'янець-Подільський, 2014; Новітні комп'ютерні технології. – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2013. – Вип. XI.; Моделювання та комп'ютерна графіка: матеріали 5-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Донецьк, 2013 р.) / М-во освіти і науки України; Дон. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2013; Моделювання та комп'ютерна графіка: матеріали 5-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Донецьк, 2013 р.) / М-во освіти і науки України; Дон. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2013; Моделювання та комп'ютерна графіка: матеріали 5-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Донецьк, 2013 р.) / М-во освіти і науки України; Дон. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2013 р.; Информационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы науч.-техн. конф., Днепропетровск, 2013 г.; Информационные технологии в металлургии и машиностроении: междунар. конф.: Днепропетровск, 2014 г.: тез. Докладов. – Днепропетровск, 2014 г.; Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці та освіті: матеріали XIII міжнар. наук. семінару, м. Київ, оз. Світязь, 30 червня – 4 липня 2014 р. – Київ, 2014 р. – С. 42 – 47; Проблеми інформатики та моделювання: 15-та наук.-техн. конф. (Харків-Одеса, 2015 р.): тез. доп. – Харків – Одеса, 2015 р.; Mathematics and Computer Science: Journal of Qafqaz University. Baku, Azerbaijan. – Vol. 3. – Numb. 1, 2015.

Публікації. На тему дисертації опубліковано 36 наукових праць, серед яких три патенти України, чотири монографії, 11 наукових статей у журналах і збірниках, а також 18 публікацій за матеріалами конференцій. Основні результати роботи опубліковано у фахових виданнях, вони охоплюють усі положення, що виносяться на захист.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації – 150 сторінок. Дисертація містить 24 рисунків на 15 сторінках, 6 додатків на 35 сторінках, список використаних джерел з 105 назв на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми й викладено загальну характеристику роботи, визначено об'єкт, предмет, сформульовано проблему, мету

й завдання дослідження; окреслено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, охарактеризовано елементи наукової новизни одержаних результатів, їх практичну значущість, висвітлено особистий внесок автора в спільних наукових публікаціях та наведено дані про апробацію роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи подано огляд та аналіз розробок і досліджень у галузі конструювання багатопроекторних обчислювальних систем. Основні тенденції викладено на прикладі кластерної системи “Беовульф”. Отже, маємо на увазі кластер, побудований з готових промислових компонентів, де може застосовуватися ОС *Linux*, стандартні адаптери й комутатори.

Показано, що потреба у високопродуктивних обчисленнях належить до фундаментальних чинників розвитку стратегічного потенціалу суспільства, вона має важливе науково-технічне й економічне значення. Продуктивність суперобчислювальних систем упродовж останніх 20–30 років зростає на порядок орієнтовно кожні п'ять років. У наші часи коло задач, які вимагають для свого розв'язування наявності потужних обчислювальних ресурсів, помітно розширилось. Це пов'язано з тим, що сталися фундаментальні зміни в самій організації наукових досліджень. Унаслідок широкого впровадження обчислювальної техніки значно активізувався напрям числового моделювання і числового експерименту. При цьому числовий експеримент великою мірою дозволив здешевити процес наукового та технологічного пошуку. З'явилась можливість моделювати в реальному часі процеси гідродинаміки й металургійної теплофізики, розпізнавати образи, розв'язувати оптимізаційні задачі з великим числом параметрів, моделювати клімат, проектувати інтегральні схеми, аналізувати забруднення довкілля, розв'язувати широке коло багатовимірних нестационарних задач, реалізувати завдання генної інженерії і тощо.

Виконаний у даному розділі дисертаційної роботи аналіз напрямів розвитку високопродуктивних установок показує, що реального перелому на шляху оволодіння технологіями паралельних обчислень можна досягти завдяки введенню додаткового (фактично базового) рівня в ієрархії потужностей апаратних засобів багатопроекторних обчислювальних систем *MPP*-архітектури – *персональних обчислювальних кластерів*. Отже, можна зробити висновок, що справжній прорив у розвитку технологій паралельного моделювання можна забезпечити, запровадивши персональні обчислювальні кластери, сконструйовані на основі *MPP*-архітектури. Крім того, помічені недоліки наявних багатопроекторних модульних систем показують, що на сучасному етапі розвитку вони повинні конструюватися для розв'язування задач конкретного типу. Ці питання і висвітлюються в наступних розділах дисертаційної роботи.

Отже, встановлено, що в сучасних умовах для задоволення потреб у високопродуктивних обчисленнях актуальним і перспективним напрямом виступає розробка багатопроекторних систем кластерного типу. Вивчення проблем розвитку згаданих систем на основі аналізу їх архітектури, а також проведений огляд й аналіз розробок та досліджень у галузі їх конструювання дає можливість визначити мету й завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі дисертаційної роботи висвітлюються процеси конструювання модуля багатопроекторної обчислювальної системи з розподіленою

областю обчислень, реальна ефективність і продуктивність якої була б максимальною при розв'язуванні сильнозв'язаних задач. До того ж вона вимагає високого ступеня надійності й енергоефективності. Блоки заявленого пристрою комплектуються за допомогою засобів обчислювальної техніки масового виробництва. На рис. 1 подано структурну схему такої системи.

Так, модуль містить один майстер-вузол ($PM001$) і N обчислювальних *slave*-вузлів ($PN001, PN002, \dots, PN00n$), два керовані комутатори ($SW1, IB1$), реконфігуровану мережу для обміну даними між обчислювальними вузлами, систему локального збереження основних та проміжних обчислень (*TCA Controller Storage System*), механізм резервування ключових компонентів, а також передбачає мережеве завантаження вузлів у мережі *GI* (*Gigabit Ethernet*) за допомогою комутатора $SW1$. У майстер-вузлі та в *slave*-вузлах застосовуються одні й ті самі комплектувальні елементи (материнські плати, процесори, мережеві плати *Gigabit Ethernet*, зовнішні двопортові мережеві плати *InfiniBand ConnectX-3 HCA* (*MCX354A-FCBT*)).

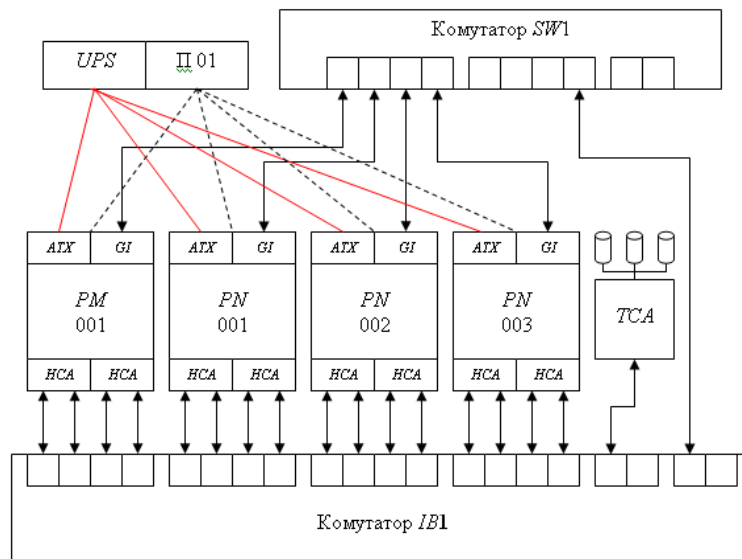


Рис 1. Структурна схема модуля високоефективної багатопроцесорної системи з розширюваною областю обчислень.

Зокрема, майстер-вузол додатково обладнано накопичувачем жорсткого диска (*SSD*) та *DVD*. Комутаційна мережа багатопроцесорної обчислювальної системи підтримує чотири режими її конфігурації. Їх було орієнтовано на реалізацію граничного обміну даними, що відображають особливості задач, які розв'язуються за допомогою такої багатопроцесорної системи.

Налаштування комутатора $IB1$ та його конфігурації виконується майстер-вузлом за допомогою двох портів стандарту *Gigabit Ethernet* ($IB1GI.i1$ – керування, $IB1GI.i2$ – масштабування). Систему локального збереження основних та проміжних обчислень *TCA Controller Storage System* під'єднано до порту 16 керованого комутатора $IB1$.

Як конструктивне рішення було обрано єдиний корпус у вигляді осередка обчислювальної шафи. Це дало можливість, з одного боку, в разі потреби декілька модулів розмістити в єдиному корпусі, а з іншого – забезпечити компактність,

якісне охолодження й легкий доступ до гнізд і елементів плат, які налаштовуються. Обчислювальна система передбачає вертикальне паралельне розташування системних плат, що відповідає ідеї блейд-серверів.

Особливості функціонування модуля багатопроцесорної обчислювальної системи. Після подачі живлення на блок (ATX) майстер-вузла й зовнішнього сигналу *PUSK* з панелі модуля керування П01 розпочинається запуск та ініціалізація роботи майстер-вузла багатопроцесорної системи. Безпосередньо завантаження ОС може здійснюватися з жорсткого диска або з *CD/DVD*-пристрою. Завантаження операційної системи виконується за рахунок спеціально орієнтованого конфігураційного скрипту, який налаштовує роботу *DHCP*-сервера. Крім того, одночасно визначається кількість обчислювальних вузлів системи, а за потреби налаштовується доступ до середовища Інтернет або до внутрішньої мережі. При цьому задаються основні налаштування й параметри. Завдяки послідовній подачі напруги на блоки живлення (ATX) та ініціалізації *slave*-вузлів зменшується необхідна потужність блока *UPS*, запускаються всі обчислювальні *slave*-вузли та завантажуються на них операційні системи. Завантаженням та налаштуванням усіх обчислювальних вузлів кластера завершується робота відповідного скрипту. Після зазначених операцій система готова до виконання паралельних обчислень.

Майстер-вузол (*PM001*) через комутатор *KGI SW1* забезпечує належне спрямування потоку даних, пов'язаних із керуванням та діагностикою системи. У свою чергу, *slave*-вузли відповідно до алгоритму розв'язування задач і перебігу процесів реалізують режим необхідних обчислень. Обмін даними між обчислювальними вузлами та завантаженням умов задач винесено в окрему мережу, яка організована за допомогою керованого комутатора *KIB IB1*. Для досягнення максимальної продуктивності роботи кластерної системи використовуються одночи двопортові адаптери *InfiniBand* та здійснюється процес реконфігурації структури другої мережі відповідно до специфіки розв'язуваних задач конкретного типу. Результати проміжних та остаточних обчислень передаються в майстер-вузол через керований комутатор *InfiniBand KIB*. При цьому керування та передача відповідних даних із *slave*-вузлів відбувається за допомогою мережевих адаптерів *HCA (Host Channel Adapters)*. Безпосередньо зберігання результатів обчислень з метою їх подальшої обробки виконується за допомогою мережевого адаптера *TCA (Target Channel Adapters)*.

Технічний результат, який досягається після запровадження даної системи, полягає в тому, що обмін даними між обчислювальними вузлами винесено в окрему мережу з використанням технології *InfiniBand*. Це прискорило швидкість такого обміну даними та суттєво знизило латентність (*завантаження каналів*) мережі, яка з'єднує вузли системи. Застосування комутованого середовища в мережі обміну даними за схемою “точка–точка”, на відміну від попередніх варіантів мереж, де було задіяно шинне з'єднання, дозволило суттєво збільшити швидкість передачі даних між вузлами багатопроцесорної системи та зменшити латентність у середовищі передачі пакетів даних.

Уведення режиму *QDR (Quad Data Rate)* у двопортових мережевих платах *MCX353A-FCBT* відповідає режиму *FDR (Fourteen Data Rate)*, що узгодило

обчислювальні можливості процесора та мережі передачі даних через інтерфейс *PCI Express*.

Використання принципу *RDMA (Remote Direct Memory Access)* дає можливість передавати дані без додаткової буферизації й не вимагає активної роботи ОС, а також бібліотек або додатків. Це сприяє суттєвому зменшенню навантаження на процесори системи під час передачі даних, унаслідок чого звільнюються обчислювальні ресурси процесорів і зменшується латентність у середовищі передачі даних.

Мережеве завантаження системи і введення механізму резервування ключових компонентів, а також використання блоків живлення для кожного леза багатопроцесорної системи дозволяє підвищити надійність функціонування модуля системи в цілому.

Причинно-наслідковий зв'язок між сукупністю істотних ознак такої системи й технічним результатом, який досягається, полягає в тому, що введення підмереж завантаження системи, діагностики й обміну даними розвантажило мережі обчислювальної системи, зробило її більш доступною та продуктивною.

Режим конфігурації й налаштування програмного забезпечення обчислювальних вузлів спрощується за рахунок мережевого завантаження. При цьому в обчислювальних вузлах відсутні мережеві диски, а завантаження, їх налаштування, діагностика та керування ними відбувається через першу мережу комутатора *SW1*. Подібний підхід дозволяє гнучко переналаштовувати конфігурацію програмного забезпечення, оновлювати й адаптувати його під конкретні задачі.

Мережеве завантаження модуля багатопроцесорної системи, резервування його ключових компонентів, а також істотне зменшення кількості складників у системі дає можливість підвищити надійність її функціонування в цілому.

Для забезпечення високої надійності електропостачання для багатопроцесорної системи напруга подається через безперебійний блок живлення (*UPS*), який під'єднаний до модуля керування П01, від нього через силові мережеві інтерфейси (розгалужувачі) струм надходить у блоки живлення головного модуля (*ATXm*) і *slave*-вузли системи (*ATX*). Таким чином, у кожному лезі модуля багатопроцесорної обчислювальної системи наявні однотипні блоки живлення. Даний підхід зменшує стрибки напруги при вмиканні блоків живлення, підвищує надійність системи, реалізує режим їхнього оптимального завантаження та дозволяє зменшити кількість споживаної обчислювальною системою електроенергії в цілому. Описаний інтерфейс електроживлення обчислювальних вузлів модуля багатопроцесорної системи забезпечив спрощення структури цієї операції, і зрештою, зумовив істотне зниження вартості обчислювальної системи, оскільки можна було обійтись одним блоком *UPS* на весь модуль.

Завдяки впровадженню зазначеного режиму енергоспоживання з'явилася можливість відмовитися від спеціалізованих інтегрованих систем кондиціонування, що теж знизило вартість системи в цілому. Разом з тим, застосування однотипних компонентів системи енергоживлення та режиму її резервування дало змогу підвищити надійність функціонування системи.

Обмін даними між обчислювальними вузлами винесено в окрему мережу з використання технології *InfiniBand*, що збільшило швидкодію системи в цілому і

суттєво знизило латентність (завантаження каналів) мережі, яка з'єднує вузли кластера.

Застосування двопортових *HSA*-адаптерів дає можливість змінювати конфігурацію мережі, поліпшивши її пропускну здатність. Реалізація реконфігурованої мережі сприяє підвищенню ефективності кластерної системи, бо передбачає адаптацію структури її мережі до розв'язування кожного конкретного типу задач.

Мережеве завантаження системи і введення механізму резервування ключових компонентів, а також використання блоків живлення для кожного леза багатопроцесорної системи дозволяє підвищити надійність функціонування модуля системи.

На сконфігурованому обчислювальному комплексі було проведено серію експериментальних розрахунків. Продуктивність запропонованого підходу підтверджується успішним розв'язуванням широкого кола задач.

У третьому розділі дисертаційної роботи розглянуто проблеми використання та налаштування системного програмного забезпечення багатопроцесорної системи. На першому етапі розкривається проблема вибору операційної системи. Нею стала ОС типу *Linux*. Наводяться аргументи на користь такого вибору. Разом з тим, розглянуто ті основні принципові особливості *Linux*, що сприяють побудові обчислювальної багатопроцесорної системи. Перш за все, відзначається, що кожна з програм, котра не є частиною ядра, може виконуватися в згаданій операційній системі тільки як *процес*.

Крім того, у цьому розділі дисертаційної роботи розкрито особливості використання програмних засобів комунікації (взаємодії) між вузлами багатопроцесорної системи. Виявилось, що найбільш поширеною в наш час є технологія програмування паралельних комп'ютерів з розділеною пам'яттю *MPI* (*Message Passing Interface*). Показано, що програми, створені на базі *MPI*, легше налагоджуються (звужується простір для появи виникнення стереотипних помилок паралельного програмування) і швидше переносяться на інші платформи. Синтаксис *MPI* полегшує створення додатків в архітектурі *SPMD* (*Single Program Multiple Data*), адже одна програма працює в різних процесорах зі своїми даними. Одна й та сама функція зможе викликатися на вузлі-джерелі й на вузлах-приймачах, а тип виконуваної операції (передача або приймання) у цьому випадку визначається за допомогою програмного параметра. Такий синтаксис викликів робить *SPMD*-програми істотно компактнішими, хоча й складнішими для розуміння.

У цьому розділі дисертаційної роботи також висвітлюються нові можливості віддаленого доступу до пам'яті процесорів системи завдяки застосуванню засобів *RDMA* (*Remote Direct Memory Access*) технології *InfiniBand*. Так, принцип *RDMA*, разом з формуванням окремої обчислювальної мережі в середовищі обміну даними, та реалізація механізмів *VLAN* дозволили передавати дані між вузлами багатопроцесорної системи без додаткової буферизації. Зазначений підхід не передбачає 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 сильнозв'язаних задач, забезпечити високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів системи та обмін даними між цими

вузлами, а також розвантажити процесори *CPU-GPU* при обміні даними та знизити завантаження каналу, який проходить між обчислювальними вузлами.

Крім того, у цьому розділі показано, що паралельні програми, які вимагають значної швидкодії, обробляють зазвичай немалі обсяги даних. Для локального збереження результатів і проміжних обчислень застосовується система *TSA* (*Controller Storage System*). Основна перевага такого підходу полягає в простоті впровадження та суттєвому розвантаженні майстер-вузла. Результати проміжних та остаточних обчислень передаються в систему *TSA* через керований комутатор *Infiniband*.

У четвертому розділі дисертаційної роботи проведено дослідження з метою виявлення показників, які характеризують продуктивність розробленої багатопроцесорної обчислювальної системи. Отже, розглядається можливість розширення області обчислень шляхом збільшення кількості вузлів багатопроцесорної системи. При цьому вважається, що зазначена область рівномірно розподіляється між вузлами обчислювальної системи. З урахуванням викладеного в даному розділі дисертаційної роботи було розроблено загальний підхід до оцінювання показників продуктивності модульної багатопроцесорної системи з розподіленою областю обчислень. Унаслідок проведених досліджень виявлено основні закономірності залежності між часом розв'язування задачі і зміною області обчислень багатопроцесорної системи. Доведено, що для аналізу продуктивності багатопроцесорної системи найважливішим параметром є час рахунку однієї ітерації (T_{it}) стосовно області обчислень. Тоді в умовах застосування багатопроцесорної системи загальний час виконання однієї ітерації буде визначатися на підставі такого співвідношення:

$$T_{it} = \frac{R}{V_c} + \frac{m \cdot N \cdot \sqrt{\frac{N \cdot R}{\pi}}}{V}, \quad (1)$$

де N – число вузлів багатопроцесорної системи; m – коефіцієнт відображення типу зв'язку між вузлами системи ($m = 1$ в умовах одностороннього граничного обміну даними, $m = 2$ – двостороннього); R – доступна оперативна пам'ять кожного вузла кластера, Гбіт; V_c – швидкість рахунку однієї ітерації з використанням даного типу процесора та відповідних числових методів.

Аналіз співвідношення (1) показує, що при збільшенні області обчислень в N разів час розв'язування задачі зростає на величину $N^{3/2}$ з урахуванням деякого коефіцієнта, що залежить від обсягу оперативної пам'яті вузла, пропускної здатності мережі системи та характеру обміну даними між обчислювальними вузлами, тобто

$$T_{it} = T_c^N + N^{3/2} \cdot f(m, RV), \quad (2)$$

де T_c^N – час рахунку однієї ітерації при використанні N обчислювальних вузлів, с.

Виведені співвідношення показали, що для отримання повної картини зміни часу розв'язування задачі залежно від зміни області обчислень багатопроцесорної

системи необхідно погоджувати зазначені параметри. Аналіз таких співвідношень також свідчить про перспективність застосування сучасних комунікаційних технологій і багатоядерних обчислювальних платформ.

Розглянуто варіант роботи гіпотетичного комп'ютера з необмеженою пам'яттю і проведено його порівняльний аналіз з функціонуванням реальної багатопроцесорної системи. При цьому вдалось вивести аналітичні співвідношення, що визначають особливості формування обчислювальної області для такого комп'ютера. Виконаний порівняльний аналіз дозволяє окреслити основні фактори впливу на продуктивність розпаралелювання реальної обчислювальної системи.

Із застосуванням цих співвідношень були проведені обчислювальні експерименти для комп'ютерної платформи, оснащеної процесором *Intel E8400 3 GHz*. Тут у вигляді початкових були прийняті відповідні характеристики класу розв'язуваних задач та самої багатопроцесорної системи.

Результати моделювання подано у вигляді графічних залежностей (рис. 2).

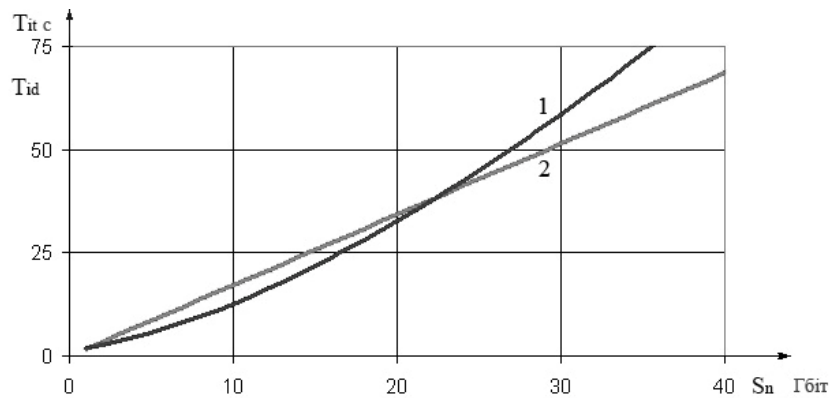


Рис. 2. Криві залежності часу рахунку однієї ітерації від розміру області обчислень багатопроцесорної системи

Як видно з рис. 2, час рахунку однієї ітерації внаслідок збільшення області обчислень багатопроцесорної системи змінюється за нелінійною залежністю (крива 1, T_{it}). При цьому, якщо область обчислень збільшується в N разів, то час розв'язування задачі зростає на величину $N^{3/2}$ з урахуванням деяких коефіцієнтів, що залежать від обсягу оперативної пам'яті вузла кластера, пропускної здатності мережевого інтерфейсу та характеру обміну даними між обчислювальними вузлами. Разом з тим, час розрахунку однієї ітерації за допомогою гіпотетичного комп'ютера з необмеженою пам'яттю, як і очікувалося, збільшується за лінійним законом (лінія 2, T_{id}). При цьому значення кута нахилу даної лінії зумовлене характеристиками обчислювальної платформи, яка використовується в системі. Результати моделювання дозволяють простежити такі загальні тенденції:

Визначення 1. Місце перетину ліній часу розрахунку однієї ітерації, виконаної на гіпотетичному комп'ютері з необмеженою пам'яттю, та з використанням реальної багатопроцесорної системи, називається *точкою ідеальної рівноваги*.

Визначення 2. Точка ідеальної рівноваги, що відповідає деякому параметру області обчислень S_n , являє собою ідеальне значення області обчислень S_{id} .

Крім, того коли $S_n < S_{id}$, то час розрахунку, виконаного багатопроцесорною системою, скорочується порівняно з часом, який був би затрачений на цю операцію гіпотетичним комп'ютером з необмеженою пам'яттю. Це пояснюється збільшенням числа процесорів у багатопроцесорній системі. З іншого боку, коли $S_n > S_{id}$, то з огляду на істотний вплив часу граничного обміну даними на загальний час розв'язування задачі в умовах розширення області обчислення, час розв'язування задачі реальною багатопроцесорною системою істотно збільшуватиметься порівняно з тривалістю виконання тієї самої операції гіпотетичним комп'ютером, котрий має необмежену пам'ять. При цьому стає очевидним, що перспективним режимом використання багатопроцесорної системи є виконання умови, за якою $S_n < S_{id}$.

Проведені дослідження показали актуальність процесу узгодження компонентів мережевого інтерфейсу та обчислювальних можливостей обраних комп'ютерних платформ. Подальшу роботу було спрямовано на визначення коефіцієнта уповільнення обчислень, пов'язаного зі збільшенням області обчислень багатопроцесорної системи порівняно з варіантом застосування комп'ютера, котрий має необмежену область обчислень. Значення згаданого коефіцієнта K можна подати таким чином:

$$K = \frac{I}{N} \left(1 + \frac{T_{ex}}{T_c^N} \right), \quad (3)$$

де T_{ex} – час граничного обміну даними між вузлами системи, с.

Для зручності аналізу одержаних результатів вираз (3) зведемо до такого вигляду:

$$K = \frac{I}{N} (1 + K_1). \quad (4)$$

У співвідношенні (4) величину K_1 визначаємо за таким виразом:

$$K_1 = \frac{T_{ex}}{T_c^N}. \quad (5)$$

Останній параметр можна тлумачити як коефіцієнт активного уповільнення обчислень. Саме ця величина і впливає, головним чином, на значення коефіцієнта уповільнення обчислень в цілому. Врешті-решт, на підставі співвідношень (3)–(5) визначається число вузлів багатопроцесорної системи N_{id} , яке відповідає мінімальному значенню уповільнення обчислень. З огляду на вплив мережевого інтерфейсу, виведено аналітичні співвідношення для визначення оптимального числа вузлів багатопроцесорної системи, котра забезпечить розв'язування задачі протягом мінімально можливого часу. Завдяки дотриманню цих співвідношень досягається мінімальне уповільнення розрахунків.

Отже,

$$N_{id} = 3 \sqrt[3]{\left(\frac{k \cdot d \cdot V_p \cdot \sqrt{\pi \cdot R}}{m \cdot V_c} \right)^2}, \quad (6)$$

де k – число каналів зв'язку в мережі обміну даними між вузлами системи, які працюють одночасно (кількість обчислювальних мереж); d – напівдуплексний ($d = 1$), або дуплексний ($d = 2$) режим роботи обчислювальної мережі системи; m – коефіцієнт відображення типу зв'язку між вузлами системи ($m = 1$ в умовах одностороннього граничного обміну даними, $m = 2$ – двостороннього); V_p – пропускна здатність порту мережевого інтерфейсу, Гбіт/с.

Відповідно до сформульованих співвідношень проведено обчислювальні експерименти із застосуванням комп'ютерної платформи, оснащеної процесором *Intel E8400 3 GHz*. Тут початковими слугували відповідні характеристики класу задач, розв'язуваних за допомогою кластерної системи.

Результати моделювання зображено у вигляді графічних залежностей (рис. 3).

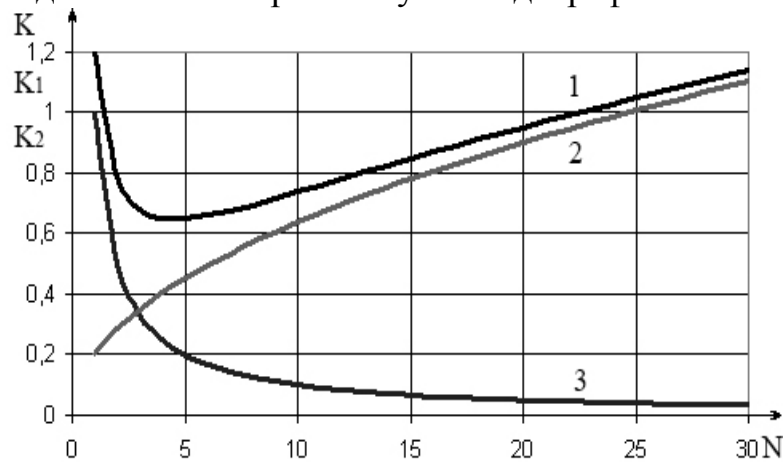


Рис. 3. Криві залежності коефіцієнта уповільнення обчислень від кількості вузлів багатопроцесорної системи/

На рис. 3 лінія 1 показує загальну тенденцію зміни значення коефіцієнта уповільнення обчислень; лінія 2 – вплив часу граничного обміну даними на величину коефіцієнта уповільнення обчислень; лінія 3 – залежність між кількістю вузлів багатопроцесорної системи і величиною коефіцієнта уповільнення обчислень. На фоні наведених залежностей можна відзначити істотний вплив часу граничного обміну даними на величину коефіцієнта уповільнення обчислень. Ця обставина зумовлює необхідність використання процедури узгодження мережевого інтерфейсу з обчислювальними можливостями обраної комп'ютерної платформи.

Крім того, стає очевидним, що за інших рівних умов виникає задача оптимального вибору кількості вузлів багатопроцесорної системи з метою мінімізації коефіцієнта уповільнення обчислень. Скориставшись співвідношенням (6), робимо висновок, що в даному випадку $N_{id} = 3$.

Проведені теоретичні дослідження повністю узгоджуються з результатами числового моделювання основних характеристик продуктивності багатопроцесорної системи.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи виконано числовий розв'язок типової задачі металургійної теплофізики на основі застосування розробленої

багатопроесорної системи. Суттєве прискорення обчислень порівняно з дією кінцево-різницевого підходу пояснюється застосуванням числово-аналітичних розв'язків, які дозволяють проводити обчислення одночасно й паралельно за всіма часовими шарами без використання комбінованої пам'яті. Отже, було доведено, що найбільш перспективним підходом до математичного моделювання класу досліджуваних у дисертаційній роботі задач слід вважати той, що ґрунтується на числово-аналітичних розв'язках.

Для проведення обчислювальних експериментів на основі застосування багатопроесорної обчислювальної системи запропоновано пакет прикладних програм (ППП), котрий реалізує розв'язок коефіцієнтних обернених задач теплопровідності методом математичного моделювання. PPP розроблено з урахуванням вимог об'єктно-орієнтованого програмування. При цьому їх розв'язок зводиться до задач оптимального керування, а пов'язані з ними алгоритми обчислення закладено в пакеті. Зауважимо, що PPP також включає блок візуалізації даних, описаний у цьому розділі дисертаційної роботи.

Отримані на основі розробленої обчислювальної схеми результати візуалізації експериментальних даних відображено на рис. 4. Зауважимо, що стандартні PPP подають подібні залежності у вигляді ламаних ліній. Але в даному випадку (рис. 4) форма кривих, що відображають експериментальні дані, згладжена, і це більш точно відповідає обчислювальному алгоритму. Таким чином, при створенні сервісних програм обробки й видачі результатів на друк у вигляді графіків та ізоліній запропонований підхід дозволяє звести до мінімуму роботу над вхідними та вихідними даними для задач досліджуваного класу.

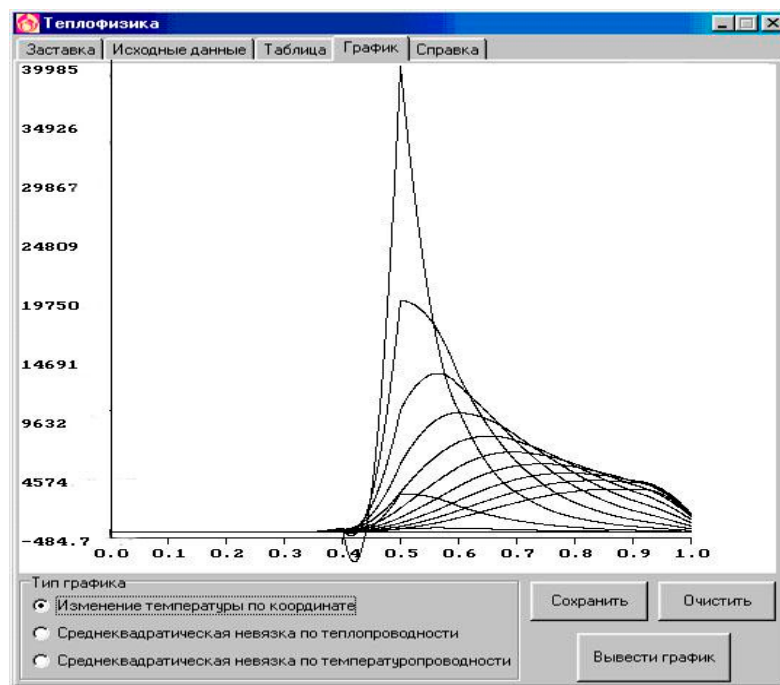


Рис. 4. Обробка результатів розв'язку тестової задачі у вигляді графічних залежностей.

Крім того, необхідно підкреслити, що оскільки базові вузли упорядковуються у вигляді сіткової області, то в даному випадку на кожному часовому шарі обчислювальні операції не зв'язані між собою. Ось чому розрахунки для побудови графіків або ізоліній можуть виконуватися паралельно й одночасно.

Дослідження, що висвітлюються в даному розділі дисертаційної роботи, виконувалися відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки НМетАУ.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі здійснено узагальнення й відображено новий підхід до виконання науково-прикладного завдання розвитку основ розробки багатопроцесорних систем з розподіленою областю обчислень, побудованих на базі використання сучасних комп'ютерних модулів масового промислового виробництва.

Основні наукові й практичні результати дисертації в подальшому викладі такі:

1. Виконано аналіз основних напрямів в еволюції розвитку багатопроцесорних обчислювальних систем. Проаналізовано передумови їх створення на базі сучасних модулів масового виробництва. Здійснено огляд сучасних мережових архітектур у галузі високопродуктивних обчислень, виявлено основні їх переваги та недоліки.

2. Запропоновано нову структуру багатопроцесорної обчислювальної системи з розподіленою областю обчислень, яка порівняно з відомими системами враховує специфіку конкретного типу задач. Це дозволяє знизити коефіцієнт уповільнення обчислень та підвищити продуктивність математичного моделювання прикладних задач. Сформовано передумови для подальшого нарощування обчислювальних потужностей розробленої багатопроцесорної системи.

3. Запропоновано концепцію дослідження продуктивності створеної багатопроцесорної обчислювальної системи з розподіленою областю обчислень. На відміну від традиційних підходів, реалізовано можливість оцінювати продуктивність розробленої багатопроцесорної системи через її параметри, що дозволяє визначити доцільність підбору відповідного устаткування.

4. Сформульовано й досліджено концепцію впливу засобів мережевого інтерфейсу на показники продуктивності багатопроцесорної системи з розподіленою областю обчислень. На противагу традиційним підходам, вдалося проаналізувати основні режими роботи мережевого інтерфейсу в таких системах і виявити їх вплив на уповільнення обчислень. Підхід дозволив окреслити шляхи зниження коефіцієнта уповільнення обчислень у багатопроцесорних системах.

5. Досліджено теоретичні й практичні аспекти перспектив застосування новітніх комунікаційних технологій у багатопроцесорних кластерних системах з розподіленою областю обчислень. Виконано порівняльний аналіз продуктивності обчислюваної системи при застосуванні різного типу мережових технологій, що дозволило організувати її функціонування на основі новітніх досягнень у цій сфері.

6. Досліджено теоретичні й практичні питання процедури узгодженості можливостей запропонованих у роботі процесорів і мережевого інтерфейсу багатопроцесорної системи. З урахуванням значення коефіцієнта уповільнення обчислень виведено аналітичні співвідношення для встановлення оптимального числа її вузлів.

7. Розроблену багатопроцесорну обчислювальну систему з розподіленою областю обчислень було застосовано як середовище, що дозволяє виконувати математичне моделювання прикладних задач певного класу. Для забезпечення необхідної продуктивності цієї системи реалізовано процес розширення її обчислювальних можливостей за рахунок використання додаткових модулів.

8. Запропоновано й запроваджено основні компоненти технології паралельного конструювання алгоритмів на основі числово-аналітичного підходу. Показано, що розроблений метод забезпечує найбільш високий ступінь векторизації обчислень, зумовлює їхню максимально паралельну алгоритмічну форму, дозволяє поліпшити економічність, підвищити продуктивність та швидкодію обчислень.

9. Розроблено комплекс прикладних програм для розв'язування задач металургійного виробництва. Запропоновано основні принципи візуалізації даних та керування ними, спираючись на які, можна створити адекватну картину досліджуваного явища. Висока продуктивність обчислень досягнута шляхом застосування створеної багатопроцесорної системи з розширеною областю обчислень.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ НА ТЕМУ ДИСЕРТАЦІЇ

Патенти України

1. Пат. 61944 Україна, МПК C21D 1/26, G06F 15/16 (2011.01). Модуль високоефективної багатопроцесорної системи підвищеної готовності / Іващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О.; патентовласники: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № у 2010 09341; заявл. 26.07.2010 ; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.

2. Пат. 57663 Україна, МПК G06F 15/16 (2006.01). Установа для термічної обробки довгомірного сталевого виробу / Іващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О.; патентовласники: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № у 201014225 ; заявл. 29.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.

3. Пат. 105438 Україна, МПК G06F 15/16 (2006.01). Модуль високоефективної багатопроцесорної системи з розширюваною областю обчислень / Іващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О.; патентовласники: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № у 2015 07019; заявл. 14.07.2015; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6.

Монографії

4. Современные коммуникационные технологии в модульных многопроцессорных системах: опыт использования, исследование оценок эффективности, перспективы применения: монография / В.П. Иващенко, Е.А. Башков, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач; М-во науки и образования Украины, Нац. мет. акад. Украины. – Д. : НМетАУ, 2012. – 140 с.

5. Інформаційне забезпечення систем прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач, П.А. Щербина. – Донецьк : ЛАНДОН-XXI, 2013. – 592 с.

6. Інтеграція економічних та технічних процесів: сучасний стан та перспективи розвитку / Г.Г. Швачич, О.Г. Холод, М.О. Ткач та ін. – Х.: Діса – Плюс, 2015.– 480 с.

7. Інтеграція економічних та технічних процесів: сучасний стан та перспективи розвитку / Г.Г. Швачич, О.Г. Холод, О.В. Соколенко, М.О. Ткач та ін. – Д. : Герда, 2015. – 500 с.

Статті в наукових фахових та міжнародних виданнях

8. Исследование влияния сетевого интерфейса на эффективность модульной многопроцессорной системы / Е.А. Башков, В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач // Наукові праці Донецького національного технічного університету (Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка). – Вип. 14 (188). – Донецьк, 2011. – С. 89–99.

9. Перспективы применения современных коммуникационных технологий и исследование их влияния на эффективность многопроцессорных кластерных систем / Е.А. Башков, В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач // Наукові праці Донецького національного технічного університету (Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка). – Вип. 14 (188). – Донецьк, 2011. – С. 100–111.

10. Alishov A.N. Multiprocessor modeling technologies for the applied Monte Carlo tasks / A.N. Alishov, G.G. Shvachych, M.A. Tkach // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science: Baku, Azerbaijan. – 2013. – Vol. 1, Numb. 1. – P. 3–10.

11. Ivaschenko V.P., Latest technologies based on use of high-efficient multiprocessing computer systems. / Ivaschenko V.P., Alishov N.I., Tkach M.A. // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. Baku, Azerbaijan. – 2013. – Vol. 1, Numb. 1. – P. 44–51.

12. Алішов Н.І.-о. Визначення оптимального числа вузлів багато процесорної обчислювальної системи для розв'язування одного класу задач / Н.І.-о. Алішов, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач // Актуальні проблеми економіки. – 2013. – № 11(149). – С. 155–162.

13. Shvachych G.G. Model – based Parallel construction of a numerical–analytical scheme / G.G. Shvachych, V.S. Konovalenkov, M.A. Tkach // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Science. – Budapest, 2013. – Vol. 8. – P. 76–78.

14. Ivaschenko V.P. Prospects of network interface infiniband in multiprocessor computer system for solving tasks of calculations' area spreading / V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, M.A. Tkach // System technologies. – 2014. – № 2(91). – Dnipropetrovs'k, – P. 32–43.

15. Иващенко В.П. Перспективы применения сетевого интерфейса InfiniBand в многопроцессорных вычислительных системах при решении задач с расширяемой областью вычисления / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач // Системні технології. Регіональний зб. наук. праць. – Д., 2014. – № 2 (91). – С. 3–9.

16. Ivaschenko V.P. Specifics of constructing of maximally parallel algorithmic forms of the solving of the appliend tasks / V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, M.A. Tkach // Системні технології. Регіональний зб. наук. праць. – Д., 2014. – № 2(91). – С. 3–9.

17. Tkach M.A. Realization of aggregating of the channels for network interface in the multiprocessor computer systems when solving problems with the expandable area calculations /M.A. Tkach // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. – Baku, Azerbaijan. – 2015. – Vol. 3. – Numb. 1. – P. 91–96.

18. Система автоматизованого контролю температурних режимів термічної обробки сталевого виробу / В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич, О.В. Соболенко, М.О. Ткач // *Металлургическая и горнорудная промышленность: научно-техн. производств. журнал.* – 2015. – 1 (292). – С. 142–146.

Публікації апробаційного характеру

19. Швачич Г.Г. О проблеме исследования эффективности модульной кластерной системы [Электронный ресурс] / Г.Г. Швачич, Ю.І. Сбитнев, М.А. Ткач. – Режим доступа: <http://cluster.linux-ekb.info/cuda1.php>. – Заглавие с экрана.

20. Shvachych G.G. About problems of designing of the high-efficiency integrated environment on the basis of computing clusters / G.G. Shvachych, M.A. Tkach, P.A. Shcherbyna // *Nauka i inowacja – 2008: Materiály IV Midznarodnej naukowí-praktyznej konferencji.* – Тум 11. *Nowoczesne informacyine technologie.* – Przemysl, 2008. – S. 41–46.

21. Іващенко В.П. Дослідження впливу мережевого інтерфейсу на ефективність багатопроцесорної кластерної системи / В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач // *Strategy of Quality in Industry and Education : VII Intrenational Conference, June, 3–10, 2011, Varna; Bulgaria.* – Varna, 2008. – V. 2. *Proceedings.* – P. 289–294.

22. Швачич Г.Г. Дослідження оцінки ефективності багатопроцесорної кластерної системи / Г.Г. Швачич, Ю.І. Сбитнев, М.О. Ткач // *Strategy of Quality in Industry and Education: VI Intrenational Conference, June, 1–8, 2010, Varna; Bulgaria.* – Varna, 2005. – V. 2. *Proceedings.* – P. 518–521.

23. Швачич Г.Г. О проблеме сопряжения модульных многопроцессорных кластерных систем / Г.Г. Швачич, М.А. Ткач // *Научное творчество XXI века: сб. статей.* – Красноярск : Научно-инновационный центр, 2012. – Т. 3. – С. 52–63.

24. Сбитнев Ю.І. Дослідження оцінки ефективності багатопроцесорної кластерної системи / Ю.І. Сбитнев, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач // *Strategy of Quality in Industry and Education: VI Intrenational Conference, June, 1 – 8, 2010, Varna; Bulgaria.* – Varna, 2010. – V. 2. *Proceedings.* – P. 288–296.

25. Швачич Г.Г. Исследования эффективности модульной кластерной системы / Г.Г. Швачич, Ю.І. Сбитнев, М.А. Ткач // *Научное творчество XXI века: материалы IV Всероссийской научн.-практ. конф. с международным участием; Красноярск, апрель 2011 г.* – Красноярск, 2011. – С. 103–105.

26. Іващенко В.П. О проблеме численно-аналитической визуализации вычислений / В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач // *Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: VI міжнародна наук. конф. (2014 р., м. Кам'янець-Подільський): тез. доп.; М-во освіти і науки України, Кам'янець-Подільський нац. ун-т.* – Кам'янець-Подільський, 2014. – С. 65–68.

27. Іващенко В.П. Особливості використання багатоядерних процесорів у багатопроцесорних обчислювальних системах. / В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич,

М.О. Ткач; М-во освіти і науки України, Кривор. нац. ун-т // Новітні комп'ютерні технології. – Кривий Ріг, 2013. – Вип. XI. – С. 132–135.

28. Башков Е.О. Використання багатопроцесорних моделюючих середовищ у задачі автоматизації контролю параметрів технологічних процесів / Е.О. Башков, В.П. Іващенко, М.О. Ткач // Моделювання та комп'ютерна графіка: матеріали 5-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Донецьк, 2013) / М-во освіти і науки України, Дон. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2013. – С. 27–31.

29. Исследование эффективности решения одного класса задач при помощи многопроцессорных вычислительных систем / Е.О. Башков, В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач / Моделювання та комп'ютерна графіка: матеріали 5-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Донецьк, 2013) / М-во освіти і науки України, Дон. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2013. – С. 27–31.

30. Деякі особливості використання багатоядерних процесорів у паралельних моделюючих середовищах / Е.О. Башков, В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач. // Моделювання та комп'ютерна графіка: матеріали 5-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Донецьк, 2013) / М-во освіти і науки України, Дон. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2013. – С. 170–174.

31. Іващенко В.П. Про проблему узгодження компонентів модульної багатопроцесорної обчислювальної системи в задачі створення нових технологічних процесів / В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач // Информационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы науч.-техн. конф. (Дніпропетровск, 2013). – Д., 2013. – С. 18–19.

32. Иващенко В.П. Некоторые аспекты применения сетевой технологии *InfiniBand* в многопроцессорных моделирующих средах / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач // Информационные технологии в металлургии и машиностроении: междунар. конф. (Днепрпетровск, 2014) тез. докл. – Д., 2014. – С. 95–96.

33. Швачич Г.Г. Моделювання режимів термічної обробки металу на основі використання багатопроцесорних обчислювальних систем / Г.Г. Швачич, П.А. Щербина, М.А. Ткач // Проблеми інформатики та моделювання: 15-та наук.-техн. конф. (Харків – Одеса, 2015): тез. доп. – Харків – Одеса, 2015. – С. 112.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

34. Швачич Г.Г. Суперкомпьютеры и высокопроизводительные вычисления / Г.Г. Швачич, М.А. Ткач, П.А. Щербина // Бъдещето проблемите на световната наука: материали за 4-а международна практична конференция. – София, 2008. –Т. 21. Съвремении технологии на информации. – С. 22–27.

35. Svachych G.G. Features of development of the high-perfomance computer system / G.G. Shvachych, M.A. Tkach, P.A. Shcherbyna // Образование и наука на 21 от век: материали за 4-а международна практична конференция. – София, 2008. – Т. 11. Съвремении технологии на информации. – С. 59–62.

36. Алішов Н.І.-о. Дослідження ефективності багатопроцесорної обчислювальної системи зі змінною областю обчислень / Н.І.-о. Алішов, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач // Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці та освіті: матер. XIII міжнар. наук. семінару (Київ, оз. Світязь, 30 червня–4 липня 2014). – К., 2014. – С. 42–47.

АНОТАЦІЇ

Ткач М.О. Удосконалення структури та підвищення продуктивності багатопроцесорних систем із застосуванням розподіленої області обчислень. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Красноармійськ, 2015.

Дисертаційну роботу присвячено виконанню актуального науково-технічного завдання розвитку теоретичних і практичних основ створення високопродуктивних багатопроцесорних обчислювальних систем з розподіленою областю обчислень, побудованих на базі використання сучасних функціональних модулів масового промислового випуску, які забезпечують розв'язування задач, котре потребує значної кількості процесорного часу.

Запропоновано концепцію побудови високопродуктивної багатопроцесорної блейд-кластерної системи з розподіленою областю обчислень на основі застосування сучасних комп'ютерних функціональних модулів масового промислового випуску. Розроблено метод дослідження показників продуктивності створеної багатопроцесорної обчислювальної системи з розподіленою областю обчислень. Реалізовано можливість оцінювати продуктивність такої системи через її параметри, що дозволяє встановити для неї доцільність підбору устаткування.

Розроблено й досліджено концепцію впливу засобів мережевого інтерфейсу на показники продуктивності багатопроцесорної системи з розподіленою областю обчислень. Проаналізовано основні режими роботи мережевого інтерфейсу в таких системах і виявлено їх вплив на уповільнення обчислень. Такий підхід дозволив окреслити шляхи зниження коефіцієнта уповільнення обчислень у багатопроцесорних системах.

Досліджено теоретичні й практичні аспекти перспектив застосування новітніх комунікаційних технологій у багатопроцесорних кластерних системах з розподіленою областю обчислень. Виконано порівняльний аналіз оцінок продуктивності багатопроцесорної кластерної системи при застосуванні різного типу мережевих технологій, що дозволило організувати її функціонування на основі новітніх досягнень у цій сфері.

Розроблено й запроваджено основні компоненти технології паралельного конструювання алгоритмів на основі числово-аналітичного підходу. Показано, що запропонований метод передбачає найбільш високий ступінь векторизації обчислень, зумовлює їх максимально паралельну алгоритмічну форму, дозволяє підвищити економічність, продуктивність і швидкодію обчислень.

Створено комплекс прикладних програм для розв'язування задач металургійного виробництва. Запропоновано основні принципи візуалізації даних та керування ними, спираючись на які, можна побудувати адекватну картину досліджуваного явища.

Ключові слова: паралельні обчислювальні системи, блейд-системи, персональний обчислювальний кластер, топологія, ефективність, уповільнення

обчислень, багатовимірні задачі, комутатори, мережеві адаптери, система збереження даних, системи диференціальних рівнянь.

Ткач М.А. Усовершенствование структуры и повышение производительности многопроцессорных систем с применением распределенной области вычислений. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Красноармейск, 2015.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи развития теоретических и практических основ создания высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем с распределенной областью вычислений, построенных на базе использования современных функциональных модулей массового промышленного выпуска, которые обеспечивают решение задач, требующее большого количества процессорного времени.

Предложена концепция построения высокопроизводительной многопроцессорной блейд-кластерной системы с распределенной областью вычислений на основе использования современных компьютерных функциональных модулей массового промышленного выпуска.

Разработан метод исследования показателей производительности разработанной многопроцессорной вычислительной системы с распределенной областью вычислений. Реализована возможность определить производительность многопроцессорной кластерной системы через ее параметры, что позволяет оценить целесообразность подбора для нее оборудования. Предложена и исследована концепция влияния средств сетевого интерфейса на показатели производительности многопроцессорной системы с распределенной областью вычислений. Проанализированы основные режимы работы сетевого интерфейса в таких системах и определено их влияние на замедление вычислений. Такой подход позволил наметить пути снижения коэффициента замедления вычислений в многопроцессорных системах.

Исследованы теоретические и практические аспекты перспектив применения современных коммуникационных технологий в многопроцессорных кластерных системах с распределенной областью вычислений. Выполнен сравнительный анализ оценок продуктивности многопроцессорной кластерной системы с применением различного типа сетевых технологий, что позволило организовать ее функционирование на основе новейших достижений в этой области.

Предложены и внедрены основные компоненты технологии параллельного конструирования алгоритмов на основе численно-аналитического подхода. Показано, что предложенный подход предполагает наиболее высокую степень векторизации вычислений, предопределяет их максимально параллельную алгоритмическую форму, позволяет повысить экономичность, производительность и быстродействие вычислений.

Разработан комплекс прикладных программ для решения задач металлургического производства. Предложены основные принципы визуализации

данных и управления ими, опираясь на которые, можно получить адекватную картину исследуемого явления.

Ключевые слова: параллельные вычислительные системы, блейд-системы, персональный вычислительный кластер, топология, эффективность, замедление вычислений, многомерные задачи, коммутаторы, сетевые адаптеры, система хранения данных, системы дифференциальных уравнений.

Tkach M. A. Development and research of efficiency of multiprocessor systems with an expanding area of computing. – Manuscript.

Dissertation on the competition of graduate degree of candidate of engineering sciences on speciality, specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – SU "Donetsk National Technical University", Krasnoarmiysk, 2015.

The dissertation is devoted to solving actual scientific and technical problem of development of theoretical and practical bases of creation of high-performance multiprocessor computing systems with distributed computing field based on use of modern functional modules of mass industrial production, which ensure the solution of problems requiring large amount of CPU time.

The concept of research productivity indicators for a high-performance multiprocessor system with distributed calculation field has been proposed. The ability to evaluate the effectiveness of a multiprocessor cluster system through its parameters, which allows to assess the appropriateness of the selection of hardware of the developed system, has been implemented. The concept of influence of the network interfaces on the performance characteristics of multiprocessor systems with a distributed field of computing has been proposed and investigated. The basic operation modes of the network interface in such systems were analyzed and their impact on the slowdown of the computation was determined. This approach allowed to identify ways to reduce the deceleration rate calculations in multiprocessor systems.

Theoretical and practical aspects of the prospects for using modern communication technologies in multi-processor cluster systems with distributed computing area have been investigated. A comparative analysis of the performance of a multiprocessor cluster system evaluations using various types of network technologies was fulfilled.

The main components of the parallel design technology algorithms based on numerical and analytical approach have been proposed and implemented. It is shown that the proposed approach assumes the highest degree of calculations' vectorization, determines the maximum parallel algorithmic form and allows to increase the efficiency, productivity and computing performance.

A complex of applied programs for solving problems of metallurgical production has been developed. The main principles of data visualization and management were proposed, and basing on them, one can obtain an adequate picture of the phenomenon under investigation.

Keywords: a parallel computing system, blade system, a personal computing cluster, topology, efficiency, slow computing, multi-dimensional, switches, network adapters, data storage system, the system of differential equations.