

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**МОРОЗ Дмитро Максимович**

УДК 004.032.24

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **РОЗВИТОК СУЧАСНИХ МОДУЛЬНИХ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ**

Спеціальність: 122 – Комп'ютерні науки

Галузь знань: 12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Д.М. Мороз

Науковий керівник: **Швачич Геннадій Григорович**,  
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Мороз Д.М.* Розвиток сучасних модульних багатопроцесорних обчислювальних систем для автоматизованого управління складними технологіями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» (12 – Інформаційні технології). – НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2023.

Роботу присвячено удосконаленню архітектури та підвищенню ефективності модульних багатопроцесорних обчислювальних систем шляхом багатовимірної агрегації каналів мережевих інтерфейсів, адаптованих до розв'язування досліджуваних задач і zarazом упровадженню на їхній основі автоматизованого контролю параметрів сучасних складних технологічних процесів.

Мета дослідження полягає в удосконаленні архітектури модульних багатопроцесорних систем шляхом упровадження багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу, а також за рахунок використання шести віртуальних локальних мереж, що дає змогу не тільки підвищити ефективність розпаралелювання, але й істотно зменшити час обчислень, забезпечивши високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів системи, знизивши завантаження каналів, які проходить між її вузлами, що сприятиме зменшенню тривалості граничного обміну даними між обчислювальними вузлами.

Нині виробнича й наукова практика висуває різного роду проблеми, повне вирішення яких у більшості випадків можливе тільки за рахунок застосування багатопроцесорних обчислювальних систем. Отже, виникає потреба моделювання архітектури названих засобів, застосування яких дозволяє розв'язувати велику кількість прикладних задач. У зв'язку з цим на сьогодні тема конструювання багатопроцесорних комплексів є цікавою, актуальною і такою, що знаходиться на етапі активного розгляду. Зрозуміло до того ж, що за допомогою модульних

високоєфективних систем було знайдено досить вдалий спосіб опрацювання актуальних прикладних задач.

При цьому одна з основних особливостей застосування згаданих систем полягає в збільшенні швидкодії та ефективності обчислень. Саме висока ефективність обчислень дозволяє розв'язувати багатовимірні задачі, а також ті з них, що потребують великої кількості процесорного часу. Швидкодія дає можливість ефективно керувати технологічними процесами або навіть створювати передумови для розробки нових перспективних технологій.

*Об'єкт дослідження* роботи – інформаційні процеси, що відбуваються під час формування, передавання, опрацювання та відображення даних у багатопроцесорних обчислювальних системах.

*Предметом дослідження* є методи та засоби вдосконалення архітектури модульних багатопроцесорних систем за рахунок багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу; методи визначення оцінок ефективності багатопроцесорних систем; моделі для програмування зв'язків між процесорами системи; методи впливу комунікаційних технологій на ефективність багатопроцесорних систем; методи дослідження завантаженості каналів комутації багатопроцесорної системи.

*Методи дослідження:* для розв'язування поставлених у дисертаційній роботі задач в процесі конструювання багатопроцесорної системи та розробки метода багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейса використовувалися основні положення теорії паралельних та високопродуктивних обчислень; для розробки системного програмного забезпечення застосовувалася теорія побудови операційних систем, теорії паралельних обчислень, теорії обчислювальних систем; для конструювання паралельних алгоритмів відповідних задач використовувалися методи лінійної алгебри, методи теорії диференціальних рівнянь, принципи теорії різницевих схем, методи математичного аналізу; процеси математичного моделювання задач математичної фізики спиралися на особливості використання кінцево-різницевих схем розщеплення; основні програмні засоби розроблювалися відповідно до основних принципів теорії модульного та об'єктно-орієнтованого програмування.

У дисертаційній роботі започатковано новий комплексний формалізований підхід до конструювання модульного багатопроцесорного комплексу з багатовимірною агрегацією мережевого інтерфейсу, що дозволило реалізувати автоматизований контроль параметрів складних технологічних систем.

При цьому отримано такі *основні наукові результати*:

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.

Уперше розроблено метод багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу обчислювальної системи на основі шести віртуальних локальних мереж *VLAN*, що дає можливість у порівнянні з іншими багатопроцесорними системами, не тільки підвищити ефективність розпаралелювання, але й істотно зменшити 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.

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

Уперше було оцінено ефективність кластерної системи під час формування багатоканальних режимів її мережевого інтерфейсу. Результати такого оцінювання виражено через параметри обчислювальної системи, що дає можливість раціональним чином здійснювати компоновку її вузлів. До того ж було вдосконалено аналітичні залежності за допомогою яких уточнено оптимальне число її вузлів через параметри багатопроцесорної кластерної системи. Це створило передумови для розв'язування відповідної задачі за мінімально можливий час. Також було виконано розрахунки завантаженості каналів комутації обчислювальної системи з метою перевірки коректності налаштування мережевого устаткування.

Уперше на основі багатопроцесорного обчислювального комплексу створено систему комп'ютерного контролю необхідних температурних режимів термічної обробки (ТО) металевого виробу в режимі реального часу, коли відбувались процеси рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі. Запропонований підхід дозволяє контролювати технологічні параметри ТО металу. При цьому відбувається контроль температури зразка в центрі його перерізу, завдяки чому забезпечується надання металу необхідних властивостей, зокрема всій площині перерізу і по довжині зразка.

За рахунок застосування розробленої багатопроцесорної системи удосконалено технологію ТО металу з використанням внутрішнього теплоносія, що дозволяє суттєво скороти тривалість процесу ТО металу на відміну від інших технологічних процесів сфероїдизації сталі.

*Практичне значення одержаних результатів.* 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 модель багатопроцесорної системи 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 за рахунок багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу на базі необхідного набору стандартних компонентів системи;

– реалізувати процес конструювання багато процесорної системи, призначеної для автоматизованого контролю параметрів сучасних технологічних процесів з одночасним оцінюванням продуктивності та прискорення обчислень;

– за рахунок застосування процесорного модуля з інтерфейсом *TSA* 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 багато процесорної системи;

– істотно скоротити час опрацювання експериментальних даних, а також підвищувати ефективність обчислень, використавши багато процесорну систему з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу;

– суттєво зменшувати число натурних випробувань та скоротити час їх проведення за рахунок провадження розподілених обчислювальних експериментів, отримуючи при цьому потрібну інформацію завдяки використанню розроблених математичних моделей і комплексів програм;

– удосконалити технологічний процес ТО металу, задіявши відповідні математичні моделі й комплекс розроблених програм; згадані моделі обробляються в

багатопроесорній обчислювальній системі, а це дозволяє контролювати температурне поле металу під час його нагрівання, витримки та охолодження і тим самим забезпечує швидку адаптацію виробництва металопродукції до вимог споживача.

Описані результати відображені в матеріалах патенту “Установка для інтенсифікації сфероїдизуючого відпалювання сталі”, яку застосовано у виробничому процесі з метою рекристалізації та сфероїдизації каліброваної сталі, що йде на виготовлення високоміцних кріпильних виробів методом холодного об’ємного штампування (ХОШ).

Досвід імплементації мережевих технологій у багатопроесорні системи було описано в монографії “Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки”, його також впроваджено в навчальний процес підготовки студентів відповідного фаху.

Результати дисертації впроваджено й підтверджено відповідними актами в діяльність наступних організацій:

– *підприємств*: закритого акціонерного товариства “СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН” , товариства з обмеженою відповідальністю “Жордон”, товариства з обмеженою відповідальністю “КМД”;

– *науково-дослідної організації*: державного підприємства “Український інститут проектування металургійних заводів”;

– *вищих навчальних закладів*: Західноукраїнського національного університету, Українського державного університету науки і технологій, закритого акціонерного товариства “Дніпровського університету ім. Альфреда Нобеля”.

Крім того, результати дисертації впроваджено й підтверджено відповідними актами при розробці наукових тем дослідження з наступними номерами державної реєстрації: 0116U006782, 0121U109528, 0120U105547.

*Ключові слова*: архітектура, агрегація, мережевий інтерфейс, багатопроесорні системи, обчислювальні вузли, ефективність обчислень, комутатори, математичне моделювання, параметри, автоматизований контроль, технологічний процес, реструктуризація, відпалювання, ферит, матриця.

## ABSTRACT

*D.M. Moroz.* Development of modern modular multiprocessor computing systems for automated control of complex technologies. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 122 "Computer Sciency" (12 – Information Technology). – NTU "Dniprovskia Polytechnic," Dnipro, 2023.

The work is devoted to improving the architecture and increasing the efficiency of modular multiprocessor computing systems by multidimensional aggregation of network interface channels adapted for the studied class of tasks and introducing parameters' automated control of modern complex technological systems based on them.

Today, the practice raises all kinds of problems, and the complete solution in most cases is only possible due to the application of multiprocessor computing systems. Therefore, there is a problem with modeling the multiprocessor modular computer systems architecture to solve a wide range of applied problems. It is clear, and otherwise, an effective way of working out actual applied problems was found by high-performance modular systems. Thus, the topic of designing cluster multiprocessor systems is currently relevant and interesting and is at the stage of active development.

At the same time, one of the main features of such technology's application is to increase the speed and efficiency of computations. The high efficiency of computations allows for solving multidimensional problems requiring a large amount of processor time. Speed of action allows for effectively managing technological processes or, in general, creating prerequisites for developing new promising technological processes.

*The research object* is information processes in the formation, transmission, processing, and presentation of data in multiprocessor computer systems.

*The research subject* is methods, means, and approaches for improving the architecture of modular multiprocessor computing systems, researching their effectiveness, and automated control of technological process parameters.



*Research methods:* in the course of solving the problems set in the dissertation work, the basic provisions of the theory of computing systems, the theory of parallel computing, the theory of high-performance computing, the theory of building operating systems, the basic provisions of linear algebra, the theory of graphs, the theory of ordinary differential equations and partial differential equations, the theory difference schemes, basic methods of mathematical analysis, and basic principles of the theory of numerical modeling of heat and mass transfer processes.

In the dissertation, a new complex formalized approach to constructing a modular multiprocessor system with multidimensional aggregation of the network interface was introduced, allowing for the automated implementation of parameters' automated control of complex technological systems.

At the same time, the following *main scientific results* were obtained:

For the first time, a multiprocessor computing system with multidimensional aggregation of network interface channels was developed, where, due to a new multi-channel hybrid gateway *NVIDIA Skyway InfiniBand in connection with the TCA, the new generation processor module with NVMe2 interface.\* and hard disk SSD* of local virtual networks, intermediate memory buffers of controlled switches, the reservation mechanism of the system main components creates fundamentally new opportunities for the operation of such a system compared to other computing environments, allowing to increase the system controllability, in particular significantly, to relieve the central processor (by traffic maintenance *InfiniBand*), *reducing the time for operation switching modes of virtual networks, collection, transmission, processing, and storage of calculation results and, as a result, increase the efficiency of the entire multiprocessor system.*

For the first time in multiprocessor systems, multidimensional aggregation of network interface channels based on six *VLAN* virtual local networks is implemented, which allowed, compared to other multiprocessor systems, not only to increase the parallelization efficiency but also to significantly reduce the computation time by providing high-speed access to the memory of *slave* nodes. At the same time, during data exchange among the system nodes, the *CPU* system is unloaded, and the channel loading that passes between the computing

system nodes is reduced, which helps to reduce the time of the limited data exchange among the system's computing nodes.

Compared to other multiprocessor systems, this is for the first time due to a new *NVMe2*.\* standard of SSD drives provides new possibilities of "connectivity" of the main node of the computing system with various computing environments, which leads to a speed increase of data exchange of the computing system's *main* elements and contributes to the system bus unloading.

For the first time, it became possible to change the system's local network topology through the cross panel or WEB interface, adapting its structure to the task solution of the required type.

For the first time, estimates of the cluster system's effectiveness in forming multi-channel modes of its network interface were established. At the same time, such system evaluations are presented by the computing system parameters, which allows for a rational arrangement of its nodes. In addition, analytical dependencies were improved to specify the optimal number of its nodes by the multiprocessor cluster system parameters, when the corresponding problem will be solved in the minimum possible time, and computations aimed at determining the switching channels load of the computer system were performed allowing for verifying the network configuration equipment correctness.

For the first time, based on a multiprocessor computer complex, a system of automated control of the necessary temperature regimes of maintenance of a metal product in real time was created to run the procedure of recrystallization and spheroidal annealing of calibrated steel. The proposed approach allows for automated control of technological parameters of metal maintenance. At the same time, the sample's temperature in its section center is controlled, allowing for the metal to be provided with the necessary properties, both over the entire area of its section and along the length of the sample.

The technology of metal thermal treatment due to the internal coolant has been improved, which significantly reduces the duration of metal thermal treatment for ferrite-pearlite and ferrite-pearlite-bainite structures compared to other technological processes of steel spheroidization.

*The practical significance of the obtained results.* The multiprocessor computing technologies developed in the dissertation aim to research a wide range of applied problems and significantly increase the productivity, efficiency, and accuracy of experimental data processing. Models, methods, and hardware are presented as software and industrial samples. The creation of the following opportunities determines the practical value of the conducted research:

- apply the developed model of a multiprocessor system with multidimensional aggregation of network interface channels as an integrated environment to ensure the distributed design of software and hardware tools for parameters' automated control of modern technological processes;

- to implement the modification process of the developed computer system to guarantee the necessary performance evaluations as a result of the study of a certain class of applied problems due to the multidimensional aggregation of network interface channels and the necessary set of standard system components;

- to implement the process of designing a multiprocessor system for parameters' automated control of modern technological processes with simultaneous assessment of productivity and acceleration of computations;

- due to a processor module with a new generation *TCA* interface and an *SSD* hard disk with the *NVMe* interface to reduce the operating system loading time on the *main* node by 180 %, on the *slave* nodes by 320 %; reduce the time of software reorganization of the network interface by 530 %; to reduce the time for processing, transmitting and storing intermediate and final computations results by 250 %; to reduce the processing time of system statistical data by 240 %;

- due to *VLAN* virtual local networks and multidimensional aggregation of network interface channels, increase the network interface port bandwidth from 200 Mb/s to 800 Mb/s, which increases the speed of data exchange among nodes of a multiprocessor system by four times;

- significantly reduce the processing experimental data time and increase the computation performance by a multiprocessor system with multidimensional aggregation of network interface channels;

– to significantly reduce the number of field tests and the time to conduct them due to the use of distributed computing experiments while obtaining the necessary information by developed mathematical models and program complexes;

– to improve the technological process of metal thermal treatment by appropriate mathematical models and set of programs; the mathematical models' application processed on a multiprocessor computer system allows to control of the temperature field of the metal during its heating, aging, and cooling and thus ensures the rapid adaptation of the metal products production to the consumer requirements.

The materials of the "Installation for intensification of spheroidizing steel annealing" patent are used in the production process for recrystallization and spheroidization of calibrated steel used for manufacturing high-strength fasteners by the cold forging method.

The experience of implementing network technologies for multiprocessor systems was reflected in the monograph "Actual trends in the development of the technical and production potential of the national economy." It was introduced into the educational process of students of the relevant specialty.

The results of the dissertation were implemented with confirmation by relevant acts in the activities of the following organizations:

– *enterprises*: the closed joint-stock company of "CENTRAVIS PRODUCTION UKRAINE", companies limited liability "Jordon", companies limited liability "KMD";

– *research organization*: state enterprise "Ukrainian Institute of Design of Metallurgical Plants";

– *higher educational establishments*: the Western Ukrainian National University, Ukrainian state university science and technologies, closed joint-stock company of the "Dnepr university the name of Alfred Nobel".

In addition, the results of dissertation are inculcated and confirmed by corresponding acts at development of scientific themes of research with the next numbers of state registration : 0116U006782, 0121U109528, 0120U105547.

*Keywords*: architecture, aggregation, network interface, multiprocessor systems, computing nodes, computing efficiency, switches, mathematical modeling, parameters, automated control, technological process, restructuring, annealing, ferrite, matrix.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА НА ТЕМУ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Основні наукові результати дисертації*

1. **Moroz D. M.** Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks. *Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки* : монографія / G. G. Shvachych, D. M. Moroz. – Дніпро: 2021. – С. 111–136. Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/12zFHpMg33GRegRJS5woGi8FSPOVQT5tI/view>
2. Патент №143971 Україна МПК С21D 1/26 (2006.01) Установка для інтенсифікації сфероїдизуючого відпалювання сталі / Іващенко В. П., Швачич Г. Г., Соболенко М.О., Гуль Ю.П., Соболенко О.В., Кокашинська Г.В., **Мороз Д. М.** № u202000940; заявл. 14.02.2020; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 16. Режим досупу: <https://iprop-ua.com/inv/3hallquy/>
3. Shvachych G., Pobochii I., Khokhlova T., Kholod A., **Moroz D.** Multiprocessor Computing based Parallel Structures of Mathematical Models of Tridiagonal Systems. *5th International Conference on Inventive Computation Technologies*. 2020. P. 1031–1035. (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9112512>
4. Shvachych G., Moroz B., Martynenko A., Hulina I., Busygin V., **Moroz D.** Model of Speed Spheroidization of Metals and Alloys Based on Multiprocessor Computing Complexes. *Machine Learning for Predictive Analysis. Networks and Systems*. Springer. 2020. P. 33–41. (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7106-0\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7106-0_4)
5. **Moroz. D.** Research of the influence of a network interface on the efficiency of modular multiprocessor systems. *Fundamental and applied research in the modern world* : Abstracts of VIII International Scientific and Practical Conference. Boston, USA. 2021. P. 162–171. Режим доступу: <https://kmaesm.edu.ua/wp-content/uploads/2021/06/konferencziya-boston-2021-rik.pdf>
6. **Moroz. D.** Research of energy efficiency of processors and network interface of multiprocessor computing systems. *World science problems, prospects and innovations* :

VII International Scientific and Practical Conference. Toronto, Canada. 2021. P. 108–118.

Режим доступу: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/03/WORLD-SCIENCE-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-24-26.03.21.pdf>

7. Shvachych G., Poboehij I., Sazonova M., Bilyi O., **Moroz D.** Intelligent decision support system. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2021. № 2 (52). P. 1–9.

Режим доступу: <https://rsglobal.pl/index.php/wos/article/view/1907/1758>

8. Shvachych G., Vozna N., Ivashchenko O., Bilyi O., **Moroz D.** Method of lines in distributed problems of experimental data processing. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2021. № 2(52). P. 1–7. Режим доступу:

<https://rsglobal.pl/index.php/wos/article/view/1951/1759>

9. **Moroz D.** Numerical-analytical method for distributed modelling of applied tasks. *Science and education : Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference*. Kyoto, Japan. 2021. P. 128–136. Режим доступу: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/SCIENCE-AND-EDUCATION-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-1-3.04.2021.pdf>

10. **Moroz D.** Research of the influence of a network interface on the efficiency of modular multiprocessor systems. *System technologies*. Dnipro. 2021. № 3 (134). P. 56–66 (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп'ютерні науки**). Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/download/747/628/1267>

11. **Мороз Д. М.** Моделирование максимально параллельных структур алгоритмов решения тепловых задач. *Сучасні проблеми металургії*. Дніпро. 2021. № 24. С. 98–109. (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп'ютерні науки**). Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/mpm/article/view/628/668>

12. Shvachych G., Vozna N., Ivashchenko O., Bilyi O., **Moroz D.** Efficient algorithms for parallelizing tridiagonal systems of equations. *System technologies*. Dnipro. 2021. № 5 (136). P. 110–119 (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп'ютерні науки**)

науки).

Режим

доступу:

<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/783/684>

13. Shvachych G., Mamuzić I., Tsvykh V., Khylyko M., Sashchuk H., Timchenko O., Ivaschenko O., **Moroz D.** Some complex intensification features of spheroidizing annealing of low carbon steel. *Metalurgija*. 2022. № 61 (2). P. 344–346 (**видання індексується в Scopus**). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386160>

14. **Moroz. D.** Aggregation arrangement features of network interface channels in multiprocessor computing systems. *System technologies*. Dnipro. 2022. № 2 (139). P. 111–121 (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки**). Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/1040>

15. **Moroz. D.** Performance evaluations research of multiprocessor system in the problem of heat treatment of metal products. *Modern problems of metallurgy*. Dnipro. 2022. № 25. P. 136–149 (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки**). Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/mpm/article/view/1026>

16. **Moroz D. M.** Module high-efficiency multiprocessor system with multidimensional aggregating of channels of network interface. *Radio electronics, informatics, management*. Zaporizhzhia. № 3. 2022. P. 133–143. (**фахове видання категорії А, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки, індексується в Web of Science**). Режим доступу: <http://ric.zntu.edu.ua/article/view/265792/261817>

17. **Moroz D. M.** Network features study of the communication interface of multiprocessor modular systems. *Computer systems and information technologies*. Khmelnyskyi. № 3. 2022. P. 82–90. (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки**). Режим доступу: <http://csitjournal.khmnu.edu.ua/index.php/csit/issue/view/9>

18. Shvachych G., Shcherbyna P., **Moroz D.** Aggregation of computing channels based on the Nvidia Cuda platform for control modes of components of technological systems. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2022. № 2. P. 85 – 92 (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 –**

Комп'ютерні науки). Режим доступу:

<https://journals.politehnica.dp.ua/index.php/it/article/view/95/80>

*Наукові праці апробаційного характеру*

19. **Мороз Д. М.** Особливості використання багатоядерних процесорів у багатопроекторних обчислювальних системах. *Стратегія якості в промисловості і освіті* : Матеріали XVI міжнародної конференції. м. Варна, 2–5 червня 2021 р. Варна, Болгарія. С. 278–281. Режим доступу: <http://nmetau.edu.ua/file/--sbornik-varna-2021-full.pdf>

20. Ivashchenko V., Shvachych G., Udovyk I., **Moroz D.**, Mamuzić I. On the problem of the efficiency of computations of multiprocessor systems when solving applied problems. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

21. Shvachych G., Udovyk I., **Moroz D.**, Mamuzić I. Research of the efficiency of multiprocessor systems taking into account the influence of the network interface. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

22. Shvachych G., **Moroz D.**, Mamuzić I. Maximum parallel algorithms for solving applied problems. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

23. **Moroz D.**, Mamuzić I. Parallel numerical-analytical algorithms with continuous time. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

24. **Moroz D.**, Mamuzić I. Maximally parallel forms of mathematical models with a tridiagonal structure. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international



symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

25. Shvachych G. G., Shcherbyna P. A., **Moroz D. M.** Untersuchung der netzwerkeigenschaften der kommunikationsschnittstelle von multipressor-systemen. *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, моделювання та управління* : Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції. м. Надвірна. 2022. С. 56–65. Режим доступу: [https://drive.google.com/file/d/1ed41htLbZvHrQOJA\\_-oK3pBNgFhke\\_Za/view](https://drive.google.com/file/d/1ed41htLbZvHrQOJA_-oK3pBNgFhke_Za/view)

26. **Мороз Д. М.** Модель паралельних обчислень з безперервним часом. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Дніпро, 16–18 березня 2021 р. Дніпро. С. 305–309. Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/726/604>

27. **Moroz D.** Some problems of designing high-performance multiprocessor systems. *Управління проєктами. Перспективи розвитку проєктного та нейроменеджменту, інформаційних технологій управління, технологій створення та використання об'єктів права інтелектуальної власності* : Збірник наукових праць за матеріалами IV міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. м. Дніпро, 24–25 березня 2022 р. Дніпро. С. 110–115. Режим доступу: [https://nmetau.edu.ua/file/zbirnik\\_\\_materialiv\\_\\_konf\\_udunt\\_2022.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zbirnik__materialiv__konf_udunt_2022.pdf)

28. **Moroz D.** Research of multichannel modes of the network interface of modular computing systems. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. м. Дніпро, 18 травня 2022 р. Дніпро. С. 271–274. Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/1168>

### *Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації*

29. **Moroz. D.** Research the efficiency of a modular multiprocessor computing system. *Youth and science. Practice of innovative search* : Proceedings of II All-Ukrainian Conference of Young Scientists. Dnipro, 17 December 2020. Dnipro. P. 299–303. Режим доступу: <https://nmetau.edu.ua/file/min-2020-elver.pdf>

30. Швачич Г.Г., **Мороз Д.М.** Аналіз розвитку архітектур сучасних багатопроцесорних систем. *Людина і космос* : Збірник тез XXIII міжнародної науково-практичної конференції. м. Дніпро, 14–16 квітня 2021 р. Дніпро. С. 52. Режим доступу: [https://spacehuman.org/\\_files/doc/sbornik2021.pdf](https://spacehuman.org/_files/doc/sbornik2021.pdf)

31. **Moroz. D.** Some aspects of network interface link aggregation in multiprocessor systems. *Молода академія 2022* : Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених. м. Дніпро, 19–20 травня 2022 р. Дніпро. № 2. С. 69. Режим доступу: [https://nmetau.edu.ua/file/tom\\_2\\_merged\\_red.1.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/tom_2_merged_red.1.pdf)

32. **Moroz. D.** Investigation of multiprocessor system efficiency estimates when solving application problems. *Молода академія 2022* : Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених. м. Дніпро, 19–20 травня 2022 р. Дніпро. № 2. С. 70. Режим доступу: [https://nmetau.edu.ua/file/tom\\_2\\_merged\\_red.1.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/tom_2_merged_red.1.pdf)

33. Shvachych G., Shcherbyna P., **Moroz D.** Study of the influence of network characteristics of a multiprocessor system on assessments of its efficiency. *Актуальні питання розвитку інформаційних технологій: тези доповідей IV Всеукраїнської конференції молодих учених (Маріуполь, 24 листопада 2022 р.)/ ДВНЗ «ПДТУ»*. – Дніпро-Маріуполь: ПДТУ, 2022. – 81 С. 64 – 66. Режим доступу: <https://pstu.edu/wp-content/uploads/2023/01/zbirnyk-tez-aprit-2022.pdf>

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	22
<b>ВСТУП .....</b>	<b>24</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ СИСТЕМНИХ АРХІТЕКТУР ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ІНТЕГРОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА АНАЛІЗ ЗАСОБІВ А КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ .....</b>	<b>36</b>
1.1. Аналіз системних архітектур високопродуктивних інтегрованих середовищ на основі модульних багатопроцесорних обчислювальних комплексів .....	36
1.2. Аналіз застосування сучасних мережевих інтерфейсів в багатопроцесорних комплексах та їхній вплив на оцінювання ефективності й швидкодії .....	42
1.3. Аналіз систем комп'ютеризованого контролю параметрів сучасних технологічних процесів .....	47
1.4. Постановка завдань дослідження .....	53
1.5. Висновки до розділу 1 .....	54
<b>РОЗДІЛ 2. МОДУЛЬНА БАГАТОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА З БАГАТОВИМІРНОЮ АГРЕГАЦІЄЮ КАНАЛІВ МЕРЕЖЕВОГО ІНТЕРФЕЙСУ .....</b>	<b>59</b>
2.1. Обґрунтування конструктивного виконання багатопроцесорної системи. . . . .	61
2.2. Розробка конструктивних особливостей модульної багатопроцесорної системи та концепція побудови її комутаційної мережі ...	66
2.3. Метод багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу багатопроцесорного комплексу .....	72
2.3.1. Обґрунтування методу розробки режиму агрегації каналів мережевого інтерфейсу багатопроцесорного комплексу .....	72

2.3.2. Особливості реалізації режиму багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу багатопроцесорного комплексу .....	74
2.3.3. Реалізація режиму агрегації каналів мережевого інтерфейсу багатопроцесорного комплексу на основі платформи <i>CUDA</i> .....	82
2.4. Висновки до розділу 2 .....	86
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДУЛЬНОГО ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ЯК ЗАСОБИ КОМУТАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ .....</b>	<b>92</b>
3.1. Обґрунтування особливостей реалізації операційної системи під час виконання розподілених обчислень .....	92
3.2. Обґрунтування програмування зв'язків між процесорами системи ....	97
3.3. Розробка програмного забезпечення системної агрегації багатоканальних мережевих інтерфейсів модульного комплексу .....	100
3.4. Особливості програмного налаштування та функціонування багатопроцесорної системи .....	107
3.5. Висновки до розділу 3 .....	114
<b>РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДУЛЬНОЇ СИСТЕМИ В РЕЖИМІ БАГАТОВИМІРНОЇ АГРЕГАЦІЇ КАНАЛІВ ЇЇ МЕРЕЖЕВИХ ІНТЕРФЕЙСІВ .....</b>	<b>118</b>
4.1. Особливості впливу комунікаційних технологій на ефективність багатопроцесорних систем .....	118
4.2. Дослідження впливу комунікаційних технологій на ефективність багатопроцесорних систем .....	121
4.3. Вплив смуги пропускання комутатора на ефективність багатопроцесорних систем. ....	128

4.4. Вплив режиму агрегації комунікаційних каналів на ефективність багатопроцесорних систем ... ..	130
4.5. Дослідження ефективності кластерної системи під впливом режиму агрегації каналів мережевих інтерфейсів .....	134
4.6. Дослідження завантаженості каналів комутації багатопроцесорної системи .....	139
4.7. Висновки до розділу 4 .....	141
<b>РОЗДІЛ 5. КОМП'ЮТИРИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ СУЧАСНИХ СКЛАДНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ .....</b>	<b>144</b>
5.1. Установка для комп'ютиризованого контролю параметрів сучасних складних технологічних процесів .....	146
5.2. Теоретичне обґрунтування напрямів комплексної інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталі. . . . .	152
5.3. Математичне забезпечення процесів моделювання термічної обробки металевго виробу .....	156
5.4. Користувацьке програмне забезпечення процесів моделювання термічної обробки металевго виробу .....	161
5.5. Експериментальні дослідження процесу термообробки металу.....	165
5.6. Висновки до розділу 5. . . . .	170
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>174</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>177</b>
Додаток А Список публікацій здобувача з теми дисертації .....	190
Додаток Б Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	197

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

БЖ	блок живлення
БОС	багатопроцесорні обчислювальні системи
ДБП	джерело безперебійного живлення
ММ	математична модель
ОЗТ	обернена задача теплопровідності
ООП	об'єктно-орієнтоване програмування
ОС	операційна система
ПЗ	програмне забезпечення
ПОС	паралельні обчислювальні системи
ППП	пакет прикладних програм
СДР	система диференціальних рівнянь
СЗДР	система звичайних диференціальних рівнянь
СЛАР	система лінійних алгебраїчних рівнянь
ТПО	технології паралельних обчислень
ХОШ	холодне об'ємне штампування
VLAN	Virtual Local Area Network
IB	InfiniBand
Eth	Ethernet
PM	master node
PN	slave node
VPI	Virtual Protocol Interconnect
QoS	quality of service
DDR	Double Data Rate
RDMA	remote direct memory access
ATX	Advanced Technology Extended
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
TCA	Target Channel Adapters
RAID	Redundant Array of Independent Disks

CPU	Central Processing Unit
HDR	High Dynamic Range
GPU	Graphics Processing Unit
SSD	Solid state drive
NVMe	Non-Volatile Memory Express
CUDA	Compute Unified Device Architecture
HCA	Host Channel Adapters
ASCI	Accelerated Strategic Computing Initiative
CPU	Central Processing Unit
DHCP	Dynamic Host Configuration Protokol
DNS	Domain Name System
GI	GigabitEthernet
GPU	Graphics Processing Unit
HCA	Host Channel Adapters
HPC	High-Performance Computing
IB	InfiniBand
IP	Internet Protocol
MIMD	Multiple Instruction stream, Multiple Data stream
MPI	Message Passing Interface
MPICH	Message Passing Interface Chameleon
MPP	Massive Parallel Processing
NFS	Network File System
NTP	Network Time Protocol
NUMA	Non-Uniform Memory Access
PVM	Parallel Virtual Machine

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сьогодні у світі спостерігається стрімке зростання кількості багатопроцесорних обчислювальних систем та їх сумарної продуктивності. Це можна пояснити тим, що такі системи стали загальнодоступними й дешевими апаратними платформами для високопродуктивних обчислень. Одночасно практика висуває різного роду проблеми, повне рішення яких у більшості випадків можливе тільки шляхом застосування багатопроцесорних обчислювальних комплексів. На сьогодні існує багато різних варіантів побудови згаданих обчислювальних систем. Один із перспективних напрямів цієї діяльності – конструювання таких систем на основі "блейд"-технологій. Визначальна особливість побудови подібних комплексів – застосування мережевої технології, вибір якої залежить передусім, від класу розв'язуваних користувачами задач. Отже, виникає проблема створення такої архітектури багатопроцесорних модульних обчислювальних систем, яка дозволяла б розв'язувати велику кількість різних прикладних задач. Отже, тема конструювання кластерних багатопроцесорних систем на сьогодні є актуальною, цікавою, вона перебуває на етапі свого активного розвитку. Ясно і інше, за допомогою високопродуктивних модульних систем було знайдено ефективний спосіб опрацювання актуальних завдань.

Необхідність конструювання та розробки багатопроцесорних обчислювальних систем була аргументована в наукових працях багатьох дослідників. Аналізуючи історію цього питання, зазвичай згадують найперший досвід створення згаданих систем під назвою "Беовульф", який було започатковано Т. Стерлінгом і Д. Беккером (США). Подальший розвиток справи конструювання таких систем висвітлено в наукових працях Г. Родрига, Є. Валяха, Д. Івенса, В.П. Гергеля, І.І. Левіна, Є.О. Башкова, В.А. Святного, В.П. Іващенко та ін.

Відомо, що розвиток багатопроцесорних кластерних систем перейшов на більш високий рівень з використанням нових сучасних мережевих технологій. При цьому ефективність необхідного на цьому етапі розпаралелювання обчислень зумовлена багатьма чинниками, серед яких вирішальним є вибір та організація мережевого інтерфейсу. Аналіз режимів його функціонування в багатопроцесорній системі



приводить до виникнення такої проблеми: яким чином за рахунок конструктивних особливостей архітектури обчислювальних мереж багатопроцесорних кластерних систем можна поліпшити їхню ефективність та швидкодію?

Така проблема може бути розв'язана шляхом багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу. При цьому обмін даними між обчислювальними вузлами необхідно винести в окрему мережу, яка працює на каналному (другому) рівні з використанням технології *channel bonding*. Такий підхід буде спрямовано на збільшення швидкості обміну даними між вузлами кластера і зменшення завантаження каналу, який з'єднує вузли кластера.

Крім того, введення додаткових керованих комутаторів, які працюють паралельно, створює можливість через термінал або WEB-інтерфейс змінювати конфігурацію мережі, підвищувати її пропускну спроможність. Така архітектура мережі забезпечить високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів. Зауважу, що використання реконфігурованої мережі сприяє підвищенню ефективності кластерної системи, адаптуючи структуру її мережі до розв'язування кожного конкретного типу прикладних задач.

Очевидно, новий якісний рівень розвитку багатопроцесорних кластерних систем пов'язаний із використанням нових сучасних мережевих технологій. При цьому ефективність розпаралелювання обчислень залежить від багатьох чинників, проте одним з визначальних є вибір та організація мережевого інтерфейсу. З'ясуємо, чому так відбувається. Мережа кластерної обчислювальної системи принципово відрізняється від мережі робочих станцій, хоча для побудови кластера потрібні звичайні мережеві карти й комутатори, які задіяні в організації мережі робочих станцій. Але тут кластерна обчислювальна система має одну принципову особливість. *Мережа кластера, першою чергою, призначена не для зв'язку між комп'ютерами, вона забезпечує зв'язок між обчислювальними процесами.* Отже, чим вищою буде пропускну спроможність обчислювальної мережі кластера, тим швидше будуть виконуватись введені користувачем паралельні завдання. Як бачимо, технічні характеристики обчислювальної мережі набувають первинного значення в багатопроцесорних кластерних системах.

Нині проблема вибору й аналізу мережевих технологій для модульних багатопроцесорних кластерних систем не набула належного розвитку, як і проблема реорганізації структури мережевого інтерфейсу шляхом агрегації його каналів. Крім того, практично відсутні роботи, у яких було б досліджено вплив мережевих технологій на ефективність розпаралелювання в модульних багатопроцесорних кластерних системах. Саме з цієї причини дослідження, відображені в цій роботі, є актуальними і первинними.

Принадно зауважу, що удосконалення наявних та створення принципово нових технологічних процесів ТО металу потребує значних матеріальних затрат на проведення багатьох натурних експериментів, які проводяться в лабораторних, дослідно-промислових умовах, а також на виробничих установках. Цілком очевидно, що тільки застосовуючи багатопроцесорні комплекси можна суттєво скоротити кількість експериментальних досліджень та відповідний час на їх проведення, аби отримати необхідну інформацію для створення й упровадження нових технологічних розробок. Отже, запроваджуючи в практику сучасні багатопроцесорні комп'ютерні технології можна ефективно керувати виробничими процесами. Адже відомо, що сама багатопроцесорна система за допомогою засобів спеціального ПЗ спроможна задавати й контролювати певні температурні режими обробки металозаготівки по всій площині її перерізу під час нагрівання та витримки металу, а за необхідності вона може контролювати тепловий режим обробки сталі в інтервалі заданих температур відпалювання. Така обчислювальна система завдяки спеціальному ПЗ містить певні математичні моделі, що задаються рівняннями теплопровідності. З іншого боку, застосування числово-аналітичного методу забезпечує використання економічних та стійких алгоритмів розв'язування задач згаданого типу. Отже, для опрацювання прикладних задач існують різноманітні аспекти конструювання та дослідження паралельних числових методів. Значний внесок у розвиток такого характеру досліджень зробили Г.Р. Ендрю, С.А. Немнюгін, С.А. Лупін, Х. Трітсі, Х. Камерон, Е. Г. Валях, Р. Міллер, Л. Боксер, О.О. Шмукін, В.П. Іващенко, О.А. Дмитрієва, Л.П. Фельдман та ін. Останнім часом почалась активна розробка економічних методів розв'язування прикладних задач. Найперші з таких розробок відомі як схеми змінних

напрямоків, що були започатковані Д. Пісменом та Дж. Дугласом. Економічні методи опрацювання в багатовимірних задачах відображено в наукових роботах М.М. Яненка, Г.І. Марчука, К.І. Бабенка, О. А. Самарського та ін.

Як бачимо, розробка та використання багатопроесорних комплексів для розв'язування задач гірничо-металургійного комплексу за наявності відповідного математичного та програмного забезпечення являє собою актуальну проблему. Її вирішення дозволяє суттєво скоротити кількість експериментальних досліджень, а також, що важливо, їхню тривалість. Усе зазначене сприяє отриманню необхідної інформації для розробки та впровадження різного роду технологічних нововведень.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами**

Дисертаційна робота виконувалась у рамках таких науково-дослідних робіт:

«Високопродуктивні багатопроесорні системи: особливості конструювання, дослідження оцінок ефективності, застосування до розв'язування прикладних задач» (державний реєстраційний номер 0122U201569), (автор – відповідальний виконавець); «Методологія соціально-економічного, інформаційного та науково-технічного розвитку регіонів, галузей виробництва, підприємств та їх об'єднань» (розділ «Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks») (державний реєстраційний номер 0116U006782), (автор – відповідальний виконавець); «Розробка інноваційної «зеленої» технології глибинної переробки вугілля з метою отримання термоантрациту та штучного графіту високої якості» (державний реєстраційний номер 0121U109528), (автор – відповідальний виконавець); «Підвищення ефективності організації управління перевезеннями у міжнародному сполученні» (державний реєстраційний номер 0120U105547), (автор – відповідальний виконавець).

**Мета і завдання дослідження.** Мета дослідження полягає в удосконаленні архітектури модульних багатопроесорних систем шляхом упровадження багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу, а також за рахунок використання шести віртуальних локальних мереж, що дає змогу не тільки підвищити ефективність розпаралелювання, але й істотно зменшити час обчислень, забезпечивши високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів системи, знизивши

завантаження каналів, які проходить між її вузлами, що сприятиме зменшенню тривалості граничного обміну даними між обчислювальними вузлами.

Визначено основні завдання дослідження відповідно до поставленої мети, а саме:

- виконати аналіз системних архітектур високопродуктивних інтегрованих середовищ на основі багатопроцесорних обчислювальних комплексів;

- розробити концепцію вдосконалення архітектури багатопроцесорних обчислювальних систем за рахунок методу багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу, створивши при цьому принципово нові можливості її функціонування;

- шляхом упровадження багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу та використання шести віртуальних локальних мереж підвищити не тільки ефективність розпаралелювання, але й істотно зменшити час обчислень забезпечивши високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів системи;

- створити нові можливості “конективності” *main*-вузла обчислювальної системи з різними обчислювальними середовищами з метою підвищення швидкості обміну даними між основними елементами обчислювальної системи та сприяти розвантаженню системної шини;

- забезпечити через крос-панель або *WEB*-інтерфейс можливість зміни топології локальних мереж у системі, адаптуючи їхню структуру до розв'язування задач певного типу;

- дослідити показники ефективності кластерної системи під час формування багатоканальних режимів її мережевого інтерфейсу, виразивши їх через параметри обчислювальної системи, що дозволило б раціональним чином здійснювати компонування її вузлів;

- створити на основі багатопроцесорного обчислювального комплексу систему автоматизованого контролю необхідних температурних режимів ТО металевого виробу в реальному часі з метою проведення процедури рекристалізації під час сфероїдизувального відпалювання каліброваної сталі;

– розробити технологію ТО металу шляхом використання внутрішнього теплоносія, що дозволило б суттєво скороти тривалість ТО металу для феритно-перлітних і феритно-перлітно-бейнітних структур.

**Об'єктом дослідження** є інформаційні процеси, що відбуваються під час формування, передавання, опрацювання та відображення даних у багатопроцесорних обчислювальних системах.

**Предметом дослідження** є методи та засоби вдосконалення архітектури модульних багатопроцесорних систем за рахунок багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу; методи визначення оцінок ефективності багатопроцесорних систем; моделі для програмування зв'язків між процесорами системи; методи впливу комунікаційних технологій на ефективність багатопроцесорних систем; методи дослідження завантаженості каналів комутації багатопроцесорної системи.

**Методи дослідження.** Для розв'язування поставлених у дисертаційній роботі задач в процесі конструювання багатопроцесорної системи та розробки метода багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейса використовувалися основні положення теорії паралельних та високопродуктивних обчислень; для розробки системного програмного забезпечення застосовувалася теорія побудови операційних систем, теорії паралельних обчислень, теорії обчислювальних систем; для конструювання паралельних алгоритмів відповідних задач використовувалися методи лінійної алгебри, методи теорії диференціальних рівнянь, принципи теорії різницевих схем, методи математичного аналізу; процеси математичного моделювання задач математичної фізики спиралися на особливості використання кінцево-різницевих схем розщеплення; основні програмні засоби розроблювалися відповідно до основних принципів теорії модульного та об'єктно-орієнтованого програмування.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі започатковано новий комплексний формалізований підхід до конструювання модульної багатопроцесорної системи з багатовимірною агрегацією мережевого інтерфейсу, що дозволяє підвищити продуктивність системи та реалізувати автоматизований контроль параметрів складних технологічних систем.

При цьому отримано такі *основні наукові результати*:

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.

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.

Уперше, запропонована обчислювальна технологія, яка шляхом використання нового стандарту *NVMe2.\** накопичувачів *SSD* створює нові можливості “конективності” *main*-вузла обчислювальної системи з різними обчислювальними середовищами, що зумовлює підвищення швидкості обміну даними між основними елементами обчислювальної системи та сприяє розвантаженню системної шини; 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.

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

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

Уперше на основі багатопроцесорного обчислювального комплексу створено систему комп'ютерного контролю необхідних температурних режимів термічної обробки (ТО) металевих виробів в режимі реального часу, коли відбувались процеси рекристалізації та сфероїдизації відпалювання каліброваної сталі. Запропонований підхід дозволяє контролювати технологічні параметри ТО металу. При цьому відбувається контроль температури зразка в центрі його перерізу, завдяки чому забезпечується надання металу необхідних властивостей, зокрема всій площині перерізу і по довжині зразка.

Удосконалено структурно-алгоритмічне забезпечення комп'ютеризованої технології контролю ТО металу з використанням внутрішнього теплоносія, що дозволяє суттєво скоротити тривалість процесу ТО металу на відміну від інших технологічних процесів обробки сталі.

**Практичне значення одержаних результатів.** 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 модель багатопроцесорної системи з багатовимірною агрегацією каналів мережевого інтерфейсу як інтегроване середовище для забезпечення розподіленого проектування програмних та апаратних засобів, що здатні виконувати комп'ютерний контроль параметрів сучасних технологічних процесів;

– реалізувати процес модифікації розробленої обчислювальної системи для гарантування необхідних оцінок ефективності в результаті розв'язування певного

класу прикладних задач за рахунок багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу на базі необхідного набору стандартних компонентів системи;

– реалізувати процес конструювання багатопроцесорної системи, призначеної для комп'ютерного контролю параметрів сучасних технологічних процесів 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 багатопроцесорної системи;

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

– суттєво зменшувати число натурних випробувань та скоротити час їх проведення за рахунок провадження розподілених обчислювальних експериментів, отримуючи при цьому потрібну інформацію завдяки використанню розроблених математичних моделей і комплексів програм;

– удосконалити технологічний процес ТО металу, задіявши відповідні математичні моделі й комплекс розроблених програм; згадані моделі обробляються в багатопроцесорній обчислювальній системі, а це дозволяє контролювати температурне поле металу під час його нагрівання, витримки та охолодження і тим самим забезпечує швидку адаптацію виробництва металопродукції до вимог споживача.



**Впровадження результатів роботи.** Описані результати відображені в матеріалах патенту “Установка для інтенсифікації сфероїдизуючого відпалювання сталі”, яку застосовано у виробничому процесі з метою рекристалізації та сфероїдизації каліброваної сталі, що йде на виготовлення високоміцних кріпильних виробів мет одом холодного об’ємного штампування (ХОШ).

Досвід імплементації мережевих технологій у багатопроцесорні системи було описано в монографії “Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки”, його також впроваджено в навчальний процес підготовки студентів відповідного фаху.

Результати дисертації впроваджено й підтверджено відповідними актами в діяльність наступних організацій:

– *підприємств*: закритого акціонерного товариства “СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН” , товариства з обмеженою відповідальністю “Жордон”, товариства з обмеженою відповідальністю “КМД”;

– *науково-дослідної організації*: державного підприємства “Український інститут проектування металургійних заводів”;

– *вищих навчальних закладів*: Західноукраїнського національного університету, Українського державного університета науки і технологій, закритого акціонерного товариства “Дніпровського університету ім. Альфреда Нобеля”.

Крім того, результати дисертації впроваджено й підтверджено відповідними актами при розробці наукових тем дослідження з наступними номерами державної реєстрації: 0116U006782, 0121U109528, 0120U105547.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати дисертації отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів підтверджується самостійним дослідженням теоретичних і методологічних аспектів проблеми, яка розглядається. У дисертації не були використані ідеї співавторів публікацій. У роботах, що опубліковані у співавторстві, особисто здобувачем розроблено такі положення й отримано такі результати:

1, 20, 24 – дослідження, розробка й упровадження концепції створення багатовимірного мережевого інтерфейсу та його вплив на показники ефективності

розпаралелювання, 2, 4, 7, 13 – теоретичне обґрунтування та розробка методики проведення експериментальних досліджень, 3, 12, 23 – теоретичне обґрунтування, дослідження й упровадження нового підходу до розв’язування тридіагональних СЛАР, 8 – обґрунтування та дослідження математичних моделей, розробка програмного забезпечення й проведення обчислювальних експериментів, 19 – дослідження, розробка й упровадження концепції визначення основних характеристик ефективності багатопроцесорних обчислювальних систем, 22, 23 – дослідження, розробка та впровадження концепції паралельних обчислень на основі числово-аналітичних схем, 29 – дослідження архітектур модульних багатопроцесорних обчислювальних систем.

### **Апробація результатів дисертації**

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

- 5th International Conference on Inventive Computation Technologies (Nepal, 2020) (*Scopus*);
- Machine Learning for Predictive Analysis. Networks and Systems. Springer (India, 2020) (*Scopus*);
- VIII International Scientific and Practical Conference (Boston, USA, 2021);
- VII International Scientific and Practical Conference. (Toronto, Canada, 2021);
- VII International Scientific and Practical Conference (Kyoto, Japan, 2021);
- Стратегія якості в промисловості й освіті, XVI міжнародна конференція. (Варна, Болгарія, 2021);
- 15th international symposium of Croatian metallurgical society (Zagreb, Croatia, 2022);
- Проблемно-наукова міжгалузева конференція Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, енергетики, моделювання та управління (Надвірна, 2022);

– Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. Міжнародна науково-технічна конференція (Дніпро, 2021);

– Перспективи розвитку проектного та нейроменеджменту, інформаційних технологій управління, технологій створення та використання об'єктів права інтелектуальної власності. IV міжнародна науково-практична інтернет-конференція (Дніпро, 2022);

– Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених (Дніпро, 2022);

– II All-Ukrainian Conference of Young Scientists (Dnipro, 2020);

– Людина і космос. XXIII міжнародна науково-практична конференція (Дніпро, 2021).

**Публікації.** На тему дисертації опубліковано 33 наукові праці, серед яких одна монографія, один патент, 4 праці входять у міжнародні наукометричні бази SCOPUS та Web of Science, 7 наукових статей у журналах і збірниках, 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.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку літературних джерел з 105 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг роботи – 214 сторінки, з яких основний зміст викладено на 170 сторінках машинописного тексту, включаючи 27 рисунків і 10 таблиць. Додатки на 24 сторінках містять акти впровадження результатів роботи та додаткові результати розробок і досліджень.

## РОЗДІЛ 1

# ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ СИСТЕМНИХ АРХІТЕКТУР ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ІНТЕГРОВАНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА АНАЛІЗ ЗАСОБІВ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

### 1.1. Аналіз системних архітектур високопродуктивних інтегрованих середовищ на основі модульних багатопроцесорних комплексів

Сьогодні спостерігається активне зростання кількості багатопроцесорних систем та їхньої сумарної продуктивності. Така обставина аргументується тим, що подібні системи стають загальнодоступними апаратними платформами в процесі виконання високопродуктивних обчислень. Крім того, практика висуває перед ученими-прикладниками різного роду завдання, виконати які здебільшого можливо тільки, використовуючи багатопроцесорні комплекси [1 – 6].

На даний час використовують два основні напрями підвищення продуктивності обчислювальних систем. Перший орієнтовано на використання більш довершеної елементної бази, а другий передбачає виконання паралельних обчислювальних операцій. Перший напрям, як правило, потребує суттєвих капіталовкладень. Аналіз таких систем показав, що розробка новітньої елементної бази для формування високопродуктивних обчислювальних комплексів буває непосильною проблемою навіть для солідних корпорацій.

Зважаючи на вищевикладене, зауважимо, що нині конструювання згаданих систем відбувається шляхом об'єднання окремих процесорів для паралельного обчислення, пов'язаного з однією великою і складною задачею [7 – 10]. З цієї причини часто ототожнюють два поняття: суперкомп'ютер та багатопроцесорну обчислювальну систему. Отже, для конструювання суперкомп'ютерів беруть серійні мікропроцесори, які забезпечені своєю локальною пам'яттю, і з'єднують їх засобами комунікаційного середовища. Описана архітектура має багато переваг, зокрема: в разі

необхідності виникає можливість додавати процесори, тим самим збільшуючи продуктивність усієї системи, причому достатньо просто підбирати певну конфігурацію обчислювального комплексу з огляду на економію фінансових ресурсів, або існування відомої обчислювальної потужності. Взагалі, сама назва подібного роду систем відображає їхню теоретично необмежену масштабованість.

Одним з перспективних визнано спосіб конструювання подібних систем шляхом застосування "блейд"-технологій. При цьому має бути застосовна мережева технологія, вибір якої залежить передусім, від класу виконуваних користувачами завдань. Отже, виникає проблема моделювання архітектури багатопроцесорних модульних обчислювальних систем, здатних розв'язувати різноманітні прикладні задачі.

Отже, тема конструювання кластерних багатопроцесорних систем наразі актуальна, цікава і вона перебуває на етапі своєї активної розробки. Очевидно, що за допомогою високопродуктивних модульних систем було знайдено вдалий спосіб виконання актуальних технологічних завдань.

На сьогодні конструювання багатопроцесорних систем стимулюється можливістю використання стандартних доступних технологій і компонентів [8 – 10]. Завдяки тому, що попит і пропозиція на лезові конфігурації високі, на практиці пропонують саме тип "блейд"-кластерного обчислювального комплексу для виконання завдань з розподіленою областю обчислень [11, 12]. Стає ясным, що високопродуктивні кластери можуть стати в пригоді для багатьох сфер діяльності.

В процесі проектування модульної багатопроцесорної системи особливе значення набуває її конструкція [8 – 10]. Можливості розширення чи модифікації системи передбачають саме на етапі її конструювання [13]. Зауважимо, що найбільш раціональним вибором вважається розміщення конструйованої системи в обчислювальній стійці [14, 15]. Таке облаштування виявилось доцільним, навіть коли йдеться про невеликі обчислювальні системи. Усередині стійки розташовують обчислювальні вузли, апаратуру для зручного з'єднання її компонентів, а також засоби керування мережевим інтерфейсом системи і под. Кожне лезо системи має працювати під керуванням копії стандартної ОС. Склад і потужність кожного вузла

багатопроесорного комплексу може бути різноманітним. У дисертації досліджено однорідну систему. Вузли її взаємодіють між собою шляхом застосування спеціалізованих бібліотек та апаратних засобів комутації.

Разом з тим, у процесі проектування та ефективного застосування багатопроесорної системи значна увага повинна приділятися її комутаційній мережі й топології [16 – 20]. Топологія багатопроесорного комплексу та його показники швидкодії в процесі обчислень – це, безумовно, такого характеру явища, що пов'язані певним чином між собою.

У практиці паралельних обчислень, як правило, розглядають сформульовану таким чином проблему: маючи обчислювальну різницеву сітку розмірностей  $M$ , а також параметр часу  $t$ , відповідних обчислень для задачі за допомогою однопроесорної системи. Цей параметр є визначальним і критичним. Отже, в цьому випадку принциповим є зменшення тривалості обчислень. Реалізація цієї мети ключова в конструюванні новітніх технологічних системах, а також при розв'язуванні задач з різних сфер діяльності: медицина, військова справа та ін.

Серед типових представників систем, здатних вирішувати згадану проблему, можна назвати кластер *Blackford MultiCore* [21]. Ця установка має двадцять обчислювальних вузлів. Її змонтовано у 19-дюймову обчислювальну стійку. Мережева інфраструктура системи містить два комутатори.

Аналіз роботи цієї системи виявив певні її недоліки, а саме:

1. Значне енергоспоживання та висока вартість експлуатації.

Причиною цього виступають високі затрати енергоспоживання для всієї інфраструктури кластерної системи, а це, своєю чергою, веде до збільшення експлуатаційних витрат.

2. Висока складність експлуатації.

Причина такого недоліку пояснюється певними обставинами. По-перше, виникає потреба утримувати штат сертифікованих фахівців, здатних виконувати операції налаштування, експлуатації кластера, а також ремонтувати його обладнання. По-друге, ОС має бути встановлена на кожному з вузлів системи, тому в разі виникнення збоїв чи необхідності введення змін у системне або ПЗ, виникає потреба

у переналаштуванні кожного з них окремо. Перелічені обставини можуть спричинити збільшення часу простоїв самої системи, а також вимагають висококваліфікованого обслуговування.

Нині існують деякі спеціалізовані багатопроцесорні кластерні системи, серед яких найбільш типовий – багатопроцесорна система з програмованою архітектурою [22]. Така система складається з групи макропроцесорів, здатних виконувати великі математичні операції; групи мультиконтролерів розподіленої пам'яті, матричного комутатора, який забезпечує з'єднання між усіма компонентами системи.

У процесі аналізу роботи згаданого модуля було помічено такі його недоліки:

1. Обмежене й спеціальне коло розв'язуваних задач, виконання багатьох умов для досягнення ефективності системи.

Недолік спричинено тим, що в результаті розв'язування кожної із задач виникає необхідність мати відповідну бібліотеку компонентів паралельних програмних засобів. Тільки тоді буде забезпечено високу продуктивність та ефективність модуля. Але, якщо потрібних програмних компонентів немає, то бібліотеку необхідно модифікувати з огляду на вимоги, які до неї пред'являються.

2. Виконання значного обсягу підготовчих робіт до експлуатації системи, що, звісно, потребує часу, збільшуючи загальну тривалість обчислення задач та знижуючи реальну ефективність усього модуля.

Недолік має місце тому, що висока продуктивність та ефективність модуля залежить від наявності й використання бібліотеки компонентів необхідних паралельних програм. При цьому для програмування й налагодження необхідного ПЗ треба виділяти спеціальну ПЕОМ. Відомо, що на створення нового ПЗ та його тестування витрачається набагато більше часу, ніж на експлуатацію самого модуля.

3. Програмне забезпечення системи не має універсальності й здатності до перенесення на інші засоби.

Причиною такої ознаки є те, що ПЗ, створене для цього модуля, неможливо використовувати на інших таких системах, оскільки вони будуть мати зовсім іншу архітектуру.

#### 4. Необхідність використання спеціальної елементної бази.

Цей недолік пояснюється тим, що під час функціонування, експлуатації, а в подальшому і модифікації такого модуля виникає необхідність використовувати спеціальну елементну базу ПЛС, а це не дає можливості вдосконалювати й оновлювати обчислювальний модуль відповідно до потреб швидкого прогресу сучасних інформаційних технологій.

Відомо, що ефективність і продуктивність паралелізації обчислень залежить від різних чинників, серед яких з найважливіших – це швидкість пересилання обчислювальних даних між певними вузлами багатопроцесорного комплексу. Саме ця функція буває найповільнішою складовою алгоритму обчислення задачі, що може суттєво зменшити очікуваний результат від збільшення числа задіяних у модулі процесорів. Саме ця проблема вважається першочерговою для вирішення в моделюванні прикладних задач широкого класу за допомогою засобів багатопроцесорних систем. Її вивчають сьогодні чимало дослідників [23 – 26]. Розглянемо один із варіантів вирішення цієї проблеми.

У практиці паралельних обчислень застосовано багатопроцесорну систему підвищеної готовності [27]. Такий обчислювальний модуль побудовано за лезовою технологією. Він являє собою впритул упаковані процесори лезового типу, що встановлені в стійці. Кожне лезо модуля функціонує під керуванням копії стандартної ОС. Склад і потужність кожного вузла модуля можуть зазнавати змін.

Унаслідок вивчення роботи описаного обчислювального модуля було виявлено такі його недоліки:

##### 1. Обмежене коло розв'язуваних задач.

Причина такого явища полягає в тому, що опрацювання даних за допомогою комутованої мережі модуля відбувається шляхом використання тільки двох режимів. Перший із них моделює топологію типу зірки, а другий – кільця.

##### 2. Висока латентність обчислень.

Пояснення недоліку криється в застосуванні одногігабітної технології для комунікаційної мережі обміну обчислювальними даними, яка має високу латентність під час опрацювання умов сильнопов'язаних задач (час затримки – до 80 мкс). Тоді



стає очевидним, що в процесі передачі коротких пакетів основний час буде витрачатися на синхронізацію та процедуру ініціалізації повідомлень, коли процесори змушені більше простоювати, замість того, щоб виконувати певні обчислення.

Проведений аналіз системних архітектур високопродуктивних інтегрованих середовищ, створених на основі багатопроесорних комплексів дозволяє визначити шляхи підвищення їхньої ефективності й продуктивності. Отже, вдосконалення багатопроесорних систем за рахунок набуття ними характеристик, що відмінні від наявних, відкриває перед користувачами такі можливості:

- по-перше, завдяки реалізації технології *InfiniBand* було забезпечено переваги системи у вигляді низької латентності і підвищеної швидкодії;

- по-друге, стало можливим змінювати через пульт керування чи WEB-інтерфейс конфігурацію локальних мереж системи, адаптуючи їхню структуру до виконання завдань того чи іншого типу;

- по-третє, на основі принципу *RDMA* технології *InfiniBand* відбувається прямий обмін обчислювальними даними поміж оперативною пам'яттю задіяних вузлів багатопроесорного комплексу, що підвищує швидкодію обчислень і забезпечує високошвидкісний шлюз до пам'яті його *slave* -вузлів, при цьому між ними теж іде обмін даними, а це розвантажує систему *CPU* і знижує завантаження каналу, який проходить між цими вузлами обчислювального комплексу;

- по-четверте, застосування багатоканального гібридного шлюзу *NVIDIA Skyway InfiniBand* у зв'язці з процесорним модулем *TCA* з інтерфейсом *NVMe* і жорстким диском *SSD*, має створювати принципово нову функцію можливості "конективності" пропонованої системи до інших обчислювальних середовищ; дозволить істотно підвищувати її керованість; зокрема розвантажити центральний процесор (за рахунок обслуговування певного трафіку *InfiniBand*); зменшувати час на перемикання режимів роботи віртуальних мереж, на збір, передачу й зберігання результатів обчислень і, як з цього випливає, підвищити ефективність усієї багатопроесорної системи;

– по-п'яте, завдяки модульному принципу побудови системи можна спростувати проектування, реалізовувати процеси нарощування або заміни тих обчислювальних вузлів, які стали не придатними для використання, а також зробити зручнішою її експлуатацію.

## **1.2. Аналіз застосування сучасних мережевих інтерфейсів в багатопроесорних комплексах та їхній вплив на оцінювання ефективності й швидкодії**

На основі аналізу систем автоматизованого контролю характеристик технологічних процесів було встановлено, що застосування паралельних обчислювальних систем – один із стратегічних напрямів розвитку інформаційної техніки. Така обставина пояснюється безперервним зростанням кількості прикладних задач, для дослідження яких бракує можливостей наявних обчислювальних засобів. Очевидно, що за допомогою високоефективних модульних систем було знайдено вдалий спосіб вирішити це питання, зокрема стосовно актуальних задач широкого класу.

Аналіз підходів до конструювання багатопроесорних систем показав, що останнім часом виробники комп'ютерної техніки можуть пропонувати пристрої, створені за допомогою лезових технологій (блейд-технологій). Отже, конструюючи багатопроесорну систему на базі серверів-лез, отримують потрібний пристрій, оснащений необхідними засобами керування та мережевим інтерфейсом. За таких умов одна із своєрідних рис їх конструювання пов'язана із застосуванням мережевої технології, вибір якої залежить передусім, від класу розв'язуваних користувачами задач. Отже, виникає проблема моделювання архітектури багатопроесорних модульних обчислювальних систем, спрямованих на розв'язок спеціального орієнтованих прикладних задач. Очевидно, новий етап розвитку модульних багатопроесорних комплексів передбачає використання нових інноваційних мережевих технологій. При цьому ефективність необхідного на цьому етапі

розпаралелювання обчислень зумовлена багатьма чинниками, серед яких вирішальним є вибір та організація мережевого інтерфейсу.

Аналізуючи режими функціонування мережевих технологій багатопроцесорних систем, виявлено проблему, сформульовану таким чином: як шляхом зміни конструктивних особливостей архітектури обчислювальних мереж багатопроцесорних систем можна підвищити показники їхньої ефективності й швидкодії?

Така проблема може розв'язуватись шляхом багатовимірної агрегації каналів мережевих інтерфейсів. Безпосередньо процес обміну обчислювальними даними між задіяними вузлами необхідно винести в деяку окрему мережу, що працює на каналному (другому) рівні з використанням технології *channel bonding*. *Описаний спосіб буде сприяти збільшенню швидкості обміну певними даними між задіяними вузлами комплексу та зменшенню завантаження каналу, який з'єднує ці вузли.*

При цьому виникає потреба ввести у систему додаткові керовані комутатори, які працюють паралельно, що дозволить через термінал чи *WEB*-інтерфейс міняти конфігурацію мережі, підвищувати її пропускну спроможність. Використання такої архітектури забезпечить високошвидкісний шлях до пам'яті обчислювальних вузлів системи. До того ж зауважимо, що реалізація реконфігурованої мережі дає можливість підвищити ефективність модульної системи, а також адаптувати її структуру для розв'язування задач заданого типу.

Окремо підкреслю, що під час проектування та ефективного використання багатопроцесорних систем основна увага приділяється не тільки засобам комутаційної мережі, але також її топології [13, 16, 17, 28, 29]. Топологія модульного комплексу та його характеристики швидкодії при розв'язуванні прикладних задач, безумовно, проблеми споріднені.

З огляду на зазначене вище, стає зрозумілим, що новий етап розвитку модульних багатопроцесорних комплексів знаходиться у сфері використання нових інноваційних мережевих технологій. Така обставина аргументується тим, що існують істотні відмінності між мережами кластерної обчислювальної системи та робочих станцій. Так, мережа *обчислювальної системи призначається не для зв'язку між*

певними комп'ютерами, а для реалізації процедури об'єднання обчислювальних процесів. Отже, чим вищою буде пропускна спроможність обчислювальної мережі системи, тим швидше будуть виконані поставлені користувачем паралельні завдання. Таким чином, технічні характеристики обчислювальної мережі набувають першочергового значення, особливо коли йде мова про багатопроцесорні обчислювальні системи.

Дослідження показали, що ефективність процедури паралелізації обчислень істотно залежить від багатьох причин, найважливіша з яких – процес надсилання даних між вузлами багатопроцесорного комплексу, саме він являє собою найповільнішу складову алгоритму виконуваних обчислень, а це може істотно знизити ефективність обчислень від збільшення числа задіяних у кластері процесорів. З огляду на це будемо говорити про один з основних шляхів, який сприяє підвищенню оцінок ефективності багатопроцесорних комплексів, тобто про агрегацію каналів мережевих інтерфейсів в мережі обміну обчислювальними даними між її *slave*-вузлами. Як бачимо, тема підвищення оцінок продуктивності багатопроцесорних комплексів за рахунок реорганізації структури його мережевих інтерфейсів на сьогодні є цікавою, актуальною, а її дослідження перебуває на етапі активного розвитку.

Враховуючи викладені вище міркування, проведемо аналіз перспектив використання сучасних комунікаційних технологій в процесі конструювання багатопроцесорних систем.

*Мережева технологія Fibre Channel (FC)* – це тип комунікаційного середовища для високошвидкісної передачі даних [45]. Швидкий обмін даними, незначна латентність та її можливість розширюваності виділяють цю технологію серед подібних. Застосування мережевої технології *FC* останнім часом переходить у сферу конструювання високопродуктивних комп'ютерних систем.

При цьому зауважу, що існує декілька різних варіантів підключення пристроїв до комунікаційного середовища *Fibre Channel*. Зокрема це з'єднання типу "точка – точка" (*point to point*); кільце з розподіленим доступом (*arbitrated loop*) і комутована пов'язна архітектура (*switched fabric*).

Очевидно, що найбільш проста топологія комунікаційного середовища *Fibre Channel* відноситься до з'єднання елементів системи за схемою "точка–точка". Її реалізація передбачає наявність сервера, адаптера *Fibre Channel* та відповідного пристрою для зберігання даних. Після встановлення певного з'єднання між обчислювальними каналами забезпечується вся заявлена смуга пропускання даного каналу. Виробники при цьому гарантують, що кадри будуть пересилатися саме в тому порядку, в якому вони передавалися. Описаний режим функціонування мережевих інтерфейсів зручний для аудіо- й відеододатків, відеоконференцій.

*Мережева технологія Myrinet.* Її було розроблено компанією *Myricom* [30]. Як зручний тип комунікаційного середовища ця технологія досить поширена серед розробників багатопроцесорних систем. Вона приваблює користувачів співвідношеннями ціна/продуктивність. Також технологія *Myrinet* була визначена економічною та доцільною високошвидкісною мережею з огляду можливості комунікації та комутації в середовищі паралельних обчислень.

У списку топ 500 самих потужних комп'ютерів світу налічувалося до 28 % кластерних систем, побудованих на базі застосування технології *Myrinet*. Проте в процесі розвитку інформаційних технологій комунікації такий показник почав знижуватися. При цьому в застосуванні до малобюджетних модулів мережева технологія *Myrinet* може виявитися більш доцільною у порівнянні з іншими. До того ж, такий мережевий інтерфейс може виявитися пріоритетним, якщо рішення прикладних задач потребує інтенсивної передачі даних у вигляді малих пакетів, що пояснюється його низькою латентністю. Очевидно, що наведені переваги такої технології цілком підходять для створення багатопроцесорних систем.

*Мережева технологія 10Gb Ethernet, або 10GbE* відноситься до найбільш поширених стандартів *Ethernet* [31]. Її пропускна здатність сягає 10 Гбіт/с. Чинні стандарти технології *10 Gigabit Ethernet* використовуються багатьма виробниками в реальних проектах. Серед таких виробників чимало відомих компаній, зокрема *Alcatel, Cisco Systems, Enterasys Networks, Extreme Networks, Force10 Networks, Foundry Networks, Hewlett-Packard (HP)* та ін.

*Мережева технологія InfiniBand* [32] має деякі принципові відмінності від описаних вище. Відзначимо її безперечні переваги, перш за все це низька латентність, здатність резервувати ключові компоненти системи, масштабованість, можливість вибору швидкості обчислень у заданому діапазоні. Все перелічене створює можливості для сконструйованих на базі цієї технології систем розв'язувати широкий клас прикладних задач. Також зауважимо, що технологія *InfiniBand* передбачає засобами керування або через *WEB*-інтерфейс міняти конфігурацію комутативної мережі в залежності від особливостей опрацювання заявленого типу задач.

Надзвичайна важлива відмінність технології *InfiniBand* у порівнянні з відомими зводиться до того, що через її засоби *RDMA* стає можливим виконувати процес прямого обміну даними між оперативною пам'яттю її вузлів, що зумовлює підвищенню швидкодії обчислень, забезпечуючи особливості високошвидкісного доступу до пам'яті відповідних вузлів модуля та обміном певними даними поміж ними, розвантажуючи при цьому *CPU* і тим самим знизуючи завантаження каналів, які з'єднують згадані її вузли.

У решті-решт, використовуючи адаптери типу *ConnectX*, можна забезпечити нові можливості конективності самого обчислювального комплексу з іншими середовищами. При цьому підвищується ефективність усієї багатопроцесорної системи, а завдяки зниженню завантаження центрального процесора створюються умови для успішного обслуговування трафіка технології *InfiniBand*.

Проведений аналіз застосування різних видів сучасних мережевих інтерфейсів багатопроцесорних систем показав, що проблема їхнього вибору під час конструювання зазначених систем залишається не вирішеною, як і проблема реорганізації структур мережевих інтерфейсів шляхом агрегації їхніх каналів. При цьому під час конструювання багатопроцесорних систем враховують такі вимоги: забезпечення високошвидкісного доступу до пам'яті певних її вузлів з метою зниження завантаження каналу, який проходить між цими вузлами; виконати агрегацію каналів мережевих інтерфейсів за допомогою технології *HDR*, яка відрізняється високошвидкісними характеристиками та можливістю її вдосконалення в подальшому; забезпечення прямого доступу до пам'яті процесорів за рахунок

інтеграції в сучасні процесори технології прямого доступу та її підтримки завдяки технології *InfiniBand*; застосування системи *RDMA*, робота якої практично виключає затримки пересилання даних безпосередньо до адаптера *InfiniBand*.

### **1.3. Аналіз систем комп'ютиризованого контролю параметрів сучасних технологічних процесів**

Швидкий прогрес у розвитку технологій і створення архітектури обчислювальних засобів останніми роками, а також нові концепції організації їхнього програмного забезпечення, усе це зумовило розробку нових систем, здатних виконувати велику кількість паралельних перетворень. З іншого боку, об'єднання комп'ютерів у систему багато в чому змінило математичний апарат досліджень. Очевидно, що зазначені умови не могли не вплинути на розвиток систем комп'ютиризованого контролю параметрів сучасних технологічних процесів. При цьому зауважимо, що вдосконалення наявних й створення нових систем контролю потребує значних витрат на проведення великої кількості натурних експериментів. Звісно, що скоротити кількість проведених експериментальних досліджень можна за рахунок моделей в *real-time*, що реалізується залученням багатопроцесорних комплексів. Особливо актуальною на сучасному етапі виявилась проблема вивчення швидкісних режимів ТО металевих виробів і створення нових технологій, режимів й устаткування для теплової обробки металів.

Зазначимо, що такі процеси та системи відносяться до так званих складних систем. Відомо, що складними технічними системами називають системи, поведінки яких складно моделювати через складні залежності між їх частинами або через складних взаємодій між ними та їхнім довкіллям (Bar-Yam, Yaneeer (2002). *General Features of Complex Systems. Encyclopedia of Life Support Systems*. EOLSS UNESCO Publishers, Oxford, UK. Retrieved 16 September 2022). Складні системи мають специфічні властивості, такі як нелінійність, гетерогенність, частково стохастичність і невизначеність. Такі системи застосовують в різних сферах, проте в сучасному розумінні складна технічна система є інформаційно-технічною системою. Для

модельовання інформаційно-технічних систем використовують сучасні модульні системи, які мають блоково-модульну конструкцію і апаратну конфігурацію, необхідну для вирішення конкретних завдань, зазвичай, в режимі *real - time*.

Як відомо, структура й властивості металу зазнають змін під впливом процесів перетворення, які відбуваються в металопрокаті під час його термічної обробки (ТО). Усі відомі технологічні процеси підготовки прокату до подальшої деформації потребують певної оптимізації з метою їх удосконалення, причому створення інноваційних технологічних ліній ТО металу пов'язане із значними витратами на проведення багатьох натурних експериментів та використання лабораторного й дослідно-промислового устаткування, а також випробувань в умовах реального виробництва.

Отже, використання багатопроекторних комплексів для конструювання інноваційних технологічних процесів є актуальним завданням, виконання якого дозволяє суттєво скоротити кількість проведення експериментальних досліджень, а також час, необхідний на їхнє проведення, а це значно спрощує набуття необхідної інформації для створення й промислового впровадження різноманітних технологічних нововведень. Нові технологічні процеси ТО металовиробів (нагрівання та охолодження металу з необхідною швидкістю в конкретних температурно-часових умовах), ресурсозбережні процеси підготовки металу до подальшої деформації – це найважливіші перспективні напрями розвитку гірничо-металургійного комплексу та машинобудування.

Щоб втілити в промислову практику раціональну технологію термічної обробки важкодеформованих марок сталі необхідно виконати багато операцій. Відомо, що для цього метал має пройти необхідну спеціальну підготовку із зміною його структурно-фазового стану, дослідження механізму й кінетики знеміцнення та визначенням інтервалу настання пластичності. Це дуже важливі процеси в багатоциклічній (за схемою холодна деформація – термічна обробка) технології обробки металопрокату.

Перспективний напрям інтенсифікації процесу відпалювання сталевих виробів – електро - контактне або індукційне нагрівання оброблюваного металу.



Електротермічна обробка метала має такі безперечні переваги: надання металу високого комплексу властивостей, що пояснюється значним впливом високої інтенсивності нагрівання сталі на певні механізми та відповідно кінетику структурних її змін, обмежене окалиноутворення й знеуглецювання, уникнення забруднень докільця, скорочення тривалості ТО в десятки разів. При цьому найголовніше, що описані способи електротермічної обробки сталі дозволяють здійснювати термічну обробку в автоматизованих потокових лініях [33 – 35]. Під час реалізації процесу сфероїдизивного відпалювання сталі в роботі промислової потокової лінії, було виявлено, що скорочення загальної тривалості відпалювання сталі зумовлено підвищенням швидкості її нагрівання разом із збільшенням заданих швидкостей охолодження на відповідних стадіях процесу ТО. Отже, практична реалізація сфероїдизивного відпалювання в роботі промислових потокових ліній потребує тепер, насамперед, виконання нових технічних завдань.

Індукційне нагрівання під час роботи ліній ТО металу відоме у виробничій практиці. Така технологія втілена у розроблену установку [36]. Установку призначено для ТО сталі з метою надання їй двофазної структури. Така структура дроту призначалася для виготовлення певного роду високоміцних кріпильних метизів без використання завершального термозміцнення.

Проведений аналіз описаного процесу ТО металу виявив його певні недоліки, а саме:

1. Не передбачено контроль температурного режиму процесів нагрівання, витримання та охолодження металу.

Це зумовлено використанням струмів високої частоти (СВЧ) для нагрівання металу та не передбачає використання засобів вимірювання, контролю та відповідно корегування температурних режимів.

2. Технологічний процес ТО металу не передбачає виконання операцій рекристалізації та сфероїдизивного відпалювання для областей структурних перетворень перліту.

Недолік спричинено використанням для ТО марок сталі, що мають вузький інтервал температур їх відпалювання коли вони можуть набути структури зернистого

перліту. При цьому мікроструктури металу повинні містити зернистий перліт не менше 80 %. Як бачимо, через неможливість контролю температурних процесів обробки металу його структура і відповідно необхідні механічні властивості, напевно, можуть не задовольняти тим вимоги, які висуваються до сталей, що повинні оброблюватися через холодне об'ємне штампування (ХОШ).

3. Безпосередньо процес відпалювання металу передбачає значну тривалість технологічного процесу (як зазначають розробники, від 30 до 90 хвилин), а це не дає можливості синхронізувати перебіг замкненого циклу виготовлення кріпильних виробів із заданими властивостями.

Пояснення недоліку полягає в тому, що технологічний процес відпалювання металу характеризується уповільненим охолодженням. Через те, що в цій потоковій технологічній лінії не передбачено режими вимірювання, контролю та безпосередньо регулювання температур, то сам процес уповільненого охолодження сталі не може забезпечувати необхідні перетворення в структурі гарячекатаної сталі.

Було також з'ясовано, що не дає значного скорочення загальної тривалості процесу відпалювання сталі застосування установки для ТО каліброваної заготовки [37]. Аналіз роботи цієї установки дозволив виявити певні її недоліки, а саме:

1. Не враховано особливості ТО металу, коли необхідно брати до уваги інтервал температур відпалювання з метою набуття ним структури сфероїдизивного перліту.

Це спричинено специфікою процесу сфероїдизації сталі, що проходить у спеціальній термокамері, яка відрізняється значним режимом охолодження сталі й високим споживанням електроенергії.

2. Чимала тривалість самого технологічного процесу відпалювання сталі.

Причина такого стану криється в тому, що сталь набуває необхідної структури під час ТО в інтервалі підкритичних температур, що, своєю чергою потребує тривалої ізотермічної витримки й створення певних умов охолодження (за даними дослідників швидкість охолодження може змінюватися від 0,05 до 0,5° C/c) у спеціальному пристрої (термокамері).

3. Під час ТО металу не забезпечено контроль зміни температурних процесів нагрівання, витримання та охолодження в межах площі перерізу зразка.

Справа в тому, що пірометри за допомогою яких вимірюють названі параметри, здатні фіксувати зміну температури на поверхні зразка і не передбачають контроль температурного режиму в його середині, а це буває причиною недогрівання або перегрівання сталі.

4. Технологічний процес відзначається високою енергомісткістю.

Відомо, що установку для термічної обробки каліброваної сталі, оснащено спеціальним терморегульованим керамічним екраном, потрібна температура в якому підтримується за допомогою спіральних нагрівачів, а також додатковим пристроєм для дотримання необхідного режиму охолодження (термокамерою). Вказані пристрої відзначаються значним режимом енергоспоживанням.

У процесі досліджень було розглянуто досить перспективну технологію роботи з металом за допомогою установки для ТО довгомірного металевого виробу [38]. Результати аналізу її дії виявили такі недоліки:

1. Суттєва тривалість самого технологічного процесу відпалювання сталі (до 120 с).

Причина такого стану криється в тому, що сам процес відпалювання сталі відбувається під впливом зовнішнього теплоносія. При цьому, аби надати матеріалу необхідної структури потрібно виконати декілька етапів ізотермічної витримки тривалістю близько 45 с кожний.

2. Установка не має здатності створювати необхідні температурні режими ТО сталі у процесі сфероїдизації цементиту під впливом зміни значень термодинамічного фактора (ТФ) та кінетичного фактора (КФ) в ході розвитку необхідних структурних перетворень матеріалу, і, цілком очевидно, як наслідок, процесу сфероїдизації металу.

Пояснюється зазначена обставина тим, що складова комплексної інтенсифікації процесу сфероїдизації цементиту повинна враховувати особливості змінення значень ТФ із зростанням температури та тривалістю ізотермічної витримки та реалізується для сфероїдизації цементиту лише за рахунок неізотермічної витримки з підвищенням температури з певною швидкістю нагрівання металу. Такий підхід

компенсує зменшення ТФ збільшенням КФ із процесом зростання температури. В даній установці не передбачено використання неізотермічної витримки.

3. Не існує можливості локального підвищення температури в мікрообластях біля міжфазної межі ферит-цементит, тобто саме там, де швидкість дифузії компонентів має вирішальне значення для необхідних структурних перетворень матеріалу.

Викликано це тим, що фізичні процеси прискорення сфероїдизації цементиту відбуваються тільки за рахунок внутрішнього теплоносія, коли виникає відомий ефект Гевлінга в гетерофізичних структурах. Досягти такого режиму відпалювання сталі в аналізованій установці можливості немає, а тому процес інтенсифікації сфероїдизації сталі стає неможливим.

4. В установці не передбачена можливість контролю швидкоплинних процесів ТО сталі.

Цей недолік спричинено тим, що сам технологічний процес відпалювання перебуває під контролем персонального обчислювального кластера у якому для обміну обчислювальними даними між задіяними процесорами слугує мережева технологія *GE (Gigabit Ethernet)*, а вона не має в розпорядженні системи локального збереження результатів, проміжних обчислень і механізмів для резервування необхідних компонентів.

Принадно зауважу, що запропонована в дисертації модель безумовно сприяє суттєвому скороченню тривалості процесу сфероїдизивного відпалювання сталі шляхом проведення неізотермічної витримки з використанням модульних багатопроцесорних комплексів. При цьому відбувається поліпшення технологічних властивостей сталі, зокрема високої дисперсності й одночасно однорідності структури металу на всій площі перерізу зразків. Було встановлено при цьому, що безпосередньо технологічний процес ТО металу має суттєві переваги у вигляді високої продуктивності, значного зниження енергоспоживання, можливості контролю технологічних параметрів процесу неізотермічної обробки металу. Така обробка сталевих виробів може бути використана під час рекристалізації

каліброваної сталі, з якої зазвичай виготовляють високоміцні кріпильні вироби методом ХОШ без застосування завершальної ТО.

#### **1.4. Постановка завдань дослідження**

На основі аналізу літературних джерел та з огляду на нинішній стан розвитку модульних багатопроцесорних комплексів стає необхідним виконати наступні взаємозалежні завдання:

- проаналізувати системні архітектури високопродуктивних інтегрованих середовищ на основі модульних багатопроцесорних комплексів;

- розробити концепцію вдосконалення архітектур модульних багатопроцесорних комплексів за рахунок багатовимірної агрегації каналів мережевих інтерфейсів, створивши при цьому принципово нові можливості її функціонування;

- шляхом упровадження багатовимірної агрегації каналів мережевих інтерфейсів та використання шести віртуальних локальних мереж підвищити не тільки ефективність розпаралелювання задач, але й суттєво зменшити тривалість обчислень, забезпечуючи високошвидкісний режим доступу до пам'яті задіяних вузлів обчислювального комплексу;

- створити нові можливості “конективності” *main*-вузла обчислювального комплексу з різноманітними обчислювальними середовищами з метою підвищення швидкості процесу обміну обчислювальними даними між основними елементами обчислювальної системи та сприяти розвантаженню системної шини;

- забезпечити через крос-панель чи *WEB*-інтерфейс можливість зміни топології локальних мереж у системі, адаптуючи їхні структури для розв'язування задач заявленого типу;

- дослідити показники ефективності модульної системи під час формування багатоканальних режимів її мережевого інтерфейсу, виразивши їх через параметри обчислювальної системи, що сприяло б раціональним чином здійснювати компонування її вузлів;

– створити на основі багатопроцесорного обчислювального комплексу систему для автоматизованого контролю необхідних температурних режимів ТО металевого виробу в режимі реального часу з метою проведення процедури рекристалізації під час сфероїдизивного відпалювання каліброваної сталі;

– розробити технологію ТО металу шляхом використання внутрішнього теплоносія, що дозволило б суттєво скороти тривалість ТО металу для феритно-перлітних і феритно-перлітно-бейнітних структур.

### 1.5. Висновки до розділу 1

Сучасне стрімке зростання кількості модульних багатопроцесорних комплексів та їхньої сумарної продуктивності пояснюється загальнодоступністю апаратних платформ для виконання різноманітних високопродуктивних обчислень. При цьому вдаль вирішення різного роду проблем, що постають перед фахівцями-практиками, здебільше можливе тільки шляхом застосування модульних багатопроцесорних комплексів. На сьогодні існує багато різних варіантів модульної побудови модульних обчислювальних комплексів. Унаслідок аналізу процесу конструювання багатопроцесорних систем було встановлено перспективність застосування для цієї справи "блейд"-технологій. Більше того, завдяки модульному принципу побудови обчислювальної системи стає простішим процес її проектування, а під час експлуатації можна нарощувати або замінювати несправні *slave*-вузли новими. А сама експлуатація всієї системи стає менш складною.

Зауважу, що виникає потреба моделювати архітектуру багатопроцесорних модульних обчислювальних систем таким чином, аби вони були здатні розв'язувати прикладні задачі широкого спектра. Отже, було доведено, тема конструювання кластерних багатопроцесорних комплексів на сьогодні є цікавою, актуальною і вона знаходиться на етапі активного розгляду та розвитку. Тепер зрозуміло, із застосуванням високопродуктивних модульних систем було знайдено ефективний спосіб опрацювання та виконання актуальних прикладних завдань.

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

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

У конструюванні багатопроцесорної системи було рекомендовано використати процесори *Intel Core I5* (у яких задіяно тип пам'яті *DDR4* з підтримкою *RDMA*, що дозволяє об'єднання портів оперативної пам'яті задіяних вузлів системи до 4 каналів). При цьому забезпечено режим прямого доступу до оперативної пам'яті вузлів комплексу завдяки підтримці технології *InfiniBand*. Усі перелічені засоби сприяють зменшенню завантаженості каналу, який пролягає між вузлами обчислювального

комплексу. Крім того, застосування в системі технології *RDMA* дає можливість уникнути затримки пересилання даних безпосередньо до адаптера *InfiniBand*.

Проведений аналіз конструювання багатопроцесорних систем показав, що новий інноваційний етап їхнього розвитку належить до сфери використання нових мережевих технологій. Такий підхід пояснюється істотними відмінностями між мережами кластерної обчислювальної системи та робочих станцій. Відомо, що мережа обчислювальної системи призначається не для зв'язку між окремими комп'ютерами, а для зв'язку певних обчислювальних процесів. Отже, чим вищою буде пропускна спроможність обчислювальної мережі системи, тим швидше будуть виконані поставлені користувачем паралельні завдання. За таких обставин, технічні характеристики обчислювальної мережі набувають першочергового значення, особливо коли йде мова про багатопроцесорні обчислювальні системи. Зважаючи на ці міркування, було рекомендовано застосувати технологію *InfiniBand*. Отже, обмін обчислювальними даними між задіяними вузлами багатопроцесорного комплексу здійснюється за допомогою стандарту *InfiniBand*. Виявилось, що у порівнянні з певними іншими мережевими технологіями, розроблена система може мати такі принципові відмінності: мережеве завантаження процесорів, підтримка режиму *VLAN*, механізм резервування елементів модуля, спеціально розроблений режим обміну обчислювальними даними між вузлами в мережі комутаторів *InfiniBand*.

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



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

Рекомендована технологія з'єднання каналів мережевих інтерфейсів багатопроцесорної системи дозволяє сполучати її вузли в мережу так, аби кожен з них під'єднувався до комутатора більше, ніж одним каналом. Описана технологія подібна до режиму трекінгу для з'єднання комутаторів, завдяки якому вдається збільшити швидкості передавання обчислювальних даних між двома або декількома комутаторами. Застосування процедури зв'язування каналів *дозволяє досягти рівномірного розподілу навантаження (прийняття / передачі даних) поміж ними у багатопроцесорній системі та підвищити швидкості обміну обчислювальними даними між задіяними вузлами.*

Ще раз важливо звернути увагу на суттєву перевагу режиму агрегації каналів, завдяки якому істотно підвищується швидкість обміну обчислювальними даними, а також поліпшуються показники надійності функціонування кластерної системи. Адже передбачено, що в разі відмови одного адаптера трафік надсилається наступному справному адаптеру без переривання сервісу. Коли ж цей адаптер знову розпочинає працювати, то пересилання певних даних через нього поновлюється.

Було відзначено вплив активності розробки технологій та архітектур обчислювальних засобів та появи нових концепцій в організації їхнього програмного забезпечення на створення нових систем, здатних виконувати велику кількість паралельних перетворень. Очевидно, що така обставина не могла не вплинути на розвиток систем комп'ютеризованого контролю показників функціонування сучасних технологічних процесів. Як стало відомо, удосконалення наявних і створення нових подібних систем потребує значних витрат, пов'язаних із проведенням великої кількості натурних експериментів. Звісно, що скоротити кількість виконаних експериментальних досліджень можна, застосувавши багатопроцесорні обчислювальні системи. Виявилось, що досить актуальним

сьогодні є проблема вивчення швидкісних режимів ТО металевих виробів і створення для цього нових технологій, розробка режимів та устаткування для теплової обробки металів.

Отже, використання багатопроцесорних комплексів з метою розробки новітніх технологічних процесів – досить актуальна проблема, вирішення якої сприяє зменшенню кількості експериментальних досліджень, а також їхньої тривалості, а все це 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. Сам технологічний процес ТО металу при цьому набуває безперечних переваг, серед яких висока продуктивність та істотне зменшення енергоспоживання, а контроль його технологічних параметрів відбувається в режимі неізотермічної обробки металу.

## РОЗДІЛ 2

### МОДУЛЬНА БАГАТОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА З БАГАТОВИМІРНОЮ АГРЕГАЦІЄЮ КАНАЛІВ МЕРЕЖЕВОГО ІНТЕРФЕЙСУ

У сучасних умовах проблема конструювання багатопроцесорних систем набуває особливого значення [7 – 9, 39]. Це викликано тим, що такі системи стали загальнодоступними та недорогими апаратними платформами для високопродуктивних обчислень [10 – 15]. Крім того, практика висуває проблеми, повне рішення яких у більшості випадків можливо лише за рахунок застосування високопродуктивних обчислень [1, 2, 40 – 42]. Отже, тема конструювання багатопроцесорних систем є актуальною, цікавою і знаходиться на етапі активного розвитку.

Цей розділ дисертаційної роботи спрямовано на удосконалення структури та підвищенню ефективності багатопроцесорного комплексу шляхом запровадження методу багатовимірної агрегації каналів мережеских інтерфейсів, адаптованих до розв'язування досліджуваного класу задач. Запропонований метод дозволяє не тільки поліпшити ефективність розпаралелювання обчислень, але й суттєво зменшити витрачений на них час. Такого результату можна досягти, суттєво зменшивши час трафіка між вузлами багатопроцесорного комплексу.

Принадно відзначу, що нині існують різні підходи до розробки та конструювання модульних обчислювальних систем. У цій главі дисертаційної роботи приділено увагу "блейд"-серверним моделям багатопроцесорних систем [43, 44]. Так, на основі мережевої технології *InfiniBand* створено "блейд"-серверний варіант конструювання багатопроцесорної системи, згідно з яким декілька однотипних обчислювальних вузлів монтується в одному корпусі. З огляду на зручність експлуатації така будова установки має багато переваг її конструювання, а впровадження не набагато дорожче, якщо порівнювати з іншими моделями багатопроцесорних комп'ютерних комплексів. Проте, враховуючи зростання попиту й пропозиції на "блейд"-конфігурації, було запропоновано такого роду модульну обчислювальну систему. При цьому довелось враховувати особливості їхнього

конструювання, що спрямовані на використання мережевих технологій, вибір яких зумовлено, передусім, класом розв'язуваних задач. Наприклад, під час роботи нових інноваційних технологічних процесів було виявлено проблему сформульовану таким чином: коли беруть різницеву сітку обчислень розмірності  $M$ , а також параметр часу обчислень у задачі, яку розв'язують за допомогою однопроцесорної системи, що визначений величиною  $t$ , то визнають цей параметр критичним. Поряд з цим необхідно істотно зменшити час обчислень, зберігаючи розмірності сітки  $M$ . Як бачимо, питання ефективності й швидкодії обчислень набувають особливої ваги в проектуванні модульних систем. Отже, розглядаємо можливість зменшення часу розрахунків шляхом певного збільшення кількості вузлів модульної системи. У дисертаційній роботі такий напрям досліджень орієнтовано на математичне моделювання швидкісних режимів ТО довгомірних металевих виробів (як було зазначено – час обчислень в даному випадку є критичною величиною) [45, 46, 47]. Треба зауважити, що аналогічну проблему часто доводиться вирішувати, розв'язуючи прикладні задачі в інших сферах діяльності, зокрема, в медицині, військовій техніці та ін. Як бачимо, нині тема конструювання багатопроцесорних систем не втрачає своєї актуальності, а навпаки, успішно розвивається.

Ясно й інше, що за допомогою високопродуктивних модульних систем знайдено ефективний спосіб розв'язування багатьох прикладних задач. Як було зазначено вище, новий етап розробки багатопроцесорних модульних комплексів лежить у сфері використання нових мережевих технологій [13, 15, 26, 48, 49]. Нині питання вибору та аналізу мережевих технологій для багатопроцесорних комплексів не набула належного розвитку, як і питання реорганізації структури мережевих інтерфейсів через агрегацію його каналів. При цьому зауважимо, що ефективність розпаралелювання обчислень визначається багатьма чинниками, але сформульоване вище питання є одним з визначальних у досягненні потрібного ефекту. Це пояснюється наступним чином. *Мережа модульної системи, передусім, призначається не для встановлення зв'язку між деякими комп'ютерами, а для зв'язку обчислювальних процесів.* Отже, чим вищою буде пропускна спроможність комутаційної мережі обчислювального комплексу, тим швидше будуть виконані

паралельні обчислення. При цьому, технічні характеристики обчислювальної мережі набувають першочергового значення.

При цьому, нова рекомендована до використання й описана в даному розділі роботи мережева архітектура багатопроцесорної модульної системи має реалізувати такі функції:

- по-перше, підвищити швидкодію обчислень для розв'язування сильнопов'язаних задач;
- по-друге, забезпечити високошвидкісне звертання до пам'яті вузлів обчислювальної системи, знижуючи завантаження каналу, що проходить між ними;
- по-третє, з метою проведення агрегації каналів мережевих інтерфейсів використовувати технологію *HDR*, наділену високошвидкісними характеристиками і можливістю подальшого її вдосконалення;
- по-четверте, використовуючи технологію *HDR*, агрегацію каналів мережевого інтерфейсу виконувати шляхом об'єднання чотирьох портів комутатора, аби забезпечити подальшу модифікацію запропонованої системи;
- по-п'яте, реалізувати пряме звертання до пам'яті процесорів за рахунок інтеграції в сучасні процесори такої технології та її підтримку *InfiniBand*; а за умови роботи в системі *RDMA* уникнути затримок пересилання даних безпосередньо до адаптера *InfiniBand*;
- по-шосте, за рахунок застосування технології *HDR4x2* збільшити швидкість в процесі обміну даними з 200 До 400 Гбіт/с.

## **2.1. Обґрунтування конструктивного виконання багатопроцесорної системи**

Під час проектування багатопроцесорної системи важливу роль відіграє конструктивне виконання її пристроїв. Цей етап конструювання системи є одним із найвідповідальнішим, оскільки необхідно наперед визначити площі для розміщення нового обладнання, передбачити можливості технічного супроводу й адміністрування її роботи, а також спланувати напрями модифікації та розширення

функцій такої системи в майбутньому; оцінити можливості засобів клімат-контролю, особливості електроспоживання і т. д. Як бачимо, для ефективної експлуатації та обслуговування модульної системи її конструктивне виконання відіграє важливу роль. Так, монтування обчислювальних вузлів, наскільки це можливо, має бути щільним і передбачати необхідні умови для надійного з'єднання відповідних компонентів.

Зауважимо, що необхідно приймати до уваги і ту обставину, що конструктивне виконання багатопроцесорної системи помітно впливає і на її вартість, реалізацію й функціонування. На сьогодні в конструюванні багатопроцесорних комплексів виділяють два основні підходи [50]: перший – мінімалістський під назвою *NIH LOBOS*, другий передбачає використання монтажних стійок. Звісно, що перший варіант конструкції більш економічний. Для його реалізації беруть деяку сукупність блоків та обладнання, які розташовують на спеціально відведених для цього місцях. Тим не менше, можна стверджувати, що все-таки більш вдалим є другий варіант, де передбачено використання монтажних стійок [13 – 15, 51]. Вони досить доречні навіть для облаштування невеликої модульної обчислювальної системи [8, 10, 11, 52, 53]. При цьому підвищення загальної вартості системи не такі суттєві. Вибираючи стійку, необхідно звернути увагу на ряд важливих нюансів. У першу чергу – це відповідність її формату обчислювальним вузлам системи, потім – відповідність розмірів кріплення як рейок, так і самої стійки. Тут також важливе значення має розташування та монтаж кабельних органайзерів, оскільки кожний вузол обчислювальної системи має бути під'єднаний до електроживлення, до комутованої мережі та ін. Лицьова сторона системи повинна мати надійний доступ повітря для охолодження її вузлів. Стійку при цьому повинно розташувати в приміщенні так, щоб був зручний доступ до вузлів системи з усіх її боків.

Не менш важливим для конструювання системи є і вибір формфактора обчислювальних вузлів. Для цього на сьогодні існує декілька традиційних рішень. Зокрема доцільними для використання тут можна назвати лезові технології [49, 51, 53, 54]. При цьому відомо, що розміщення блейд-серверів (лез) у стійках може бути найбільш компактним на відміну від інших способів. При цьому обчислювальні вузли

системи доцільно монтувати в корпусах типу  $2U$  (заввишки 76 мм) або  $1U$  (заввишки 38 мм).

Описаний варіант конструктивного виконання багатопроекторної системи забезпечить успішне проведення регламентних і ремонтних робіт, оскільки в ньому передбачено зручний доступ до будь-яких її комплектувальних елементів. Крім того, тут досить вдало вирішуються питання перспективного розвитку – це зручна заміна будь-яких компонентів системи на нові аналоги: потужніші процесори, збільшений обсяг її пам'яті, нові диски, нові материнські плати і т. д. Тобто може бути забезпечено подальше її вдосконалення.

Беручи до уваги розглянуті обставини, в конструйованому виконанні обчислювальної системи застосували єдиний корпус, який представляє собою деяку ланку обчислювальної стійки. Це виявилось раціональним рішенням, оскільки передбачає в разі необхідності розміщення декількох обчислювальних модулів в єдиному корпусі. Таким чином вдається досягти компактності, ефективного охолодження й легкого доступу до рознімних з'єднань і налагоджувальних елементів плат.

На рис. 2.1 зображено елементи конструкції багатопроекторної системи: а – каркас монтажної стійки модульної системи, б – монтажна стійка модульної системи.



Рис. 2.1. Елементи конструкції модульної системи

На рис. 2.2 зображено монтаж обчислювальної стійки зі встановленим обладнанням в єдиний корпус.

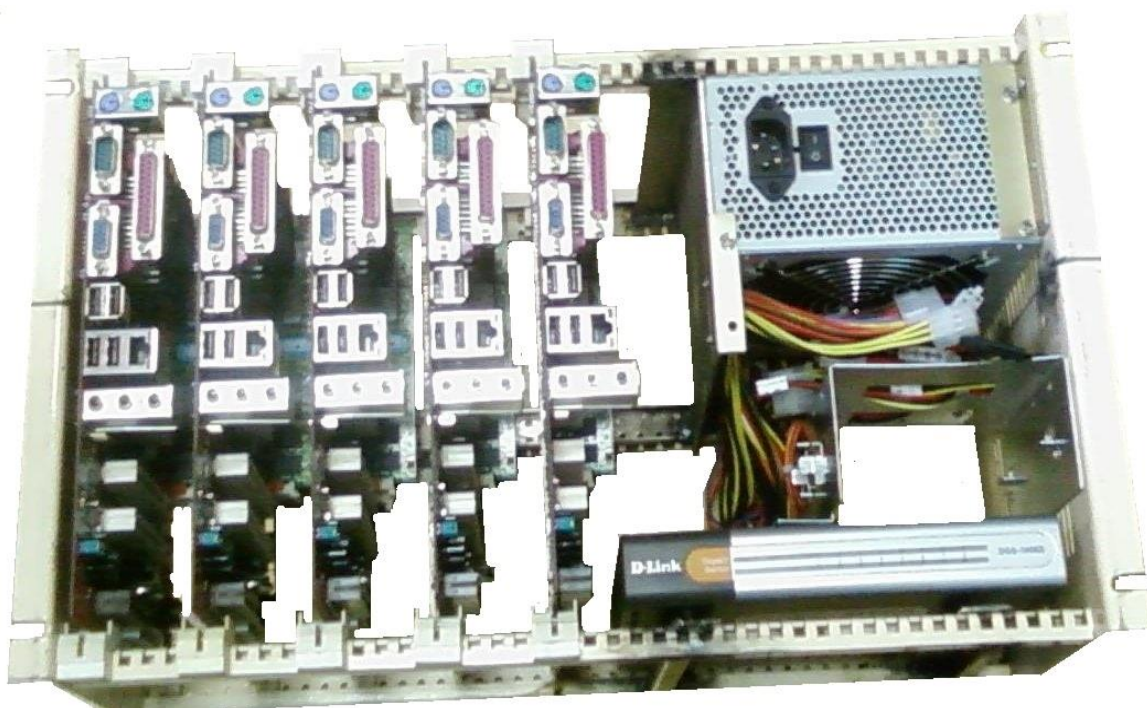


Рис. 2.2. Каркас монтажної стійки обчислювальної системи зі встановленим обладнанням

Як видно з рис. 2.2, системні плати відповідно до обраної конфігурації розміщуються вертикально й паралельно одна одній, що повністю відповідає конструктивній ідеї “блейд-серверів”.

З іншого боку видно, що блейд-технологія передбачає з'єднання в єдину мережу обчислювальних вузлів системи через комутатор, встановлений у тому самому корпусі.

Загальний вигляд процесорного модуля обчислювальної системи зображено на рис. 2.3.



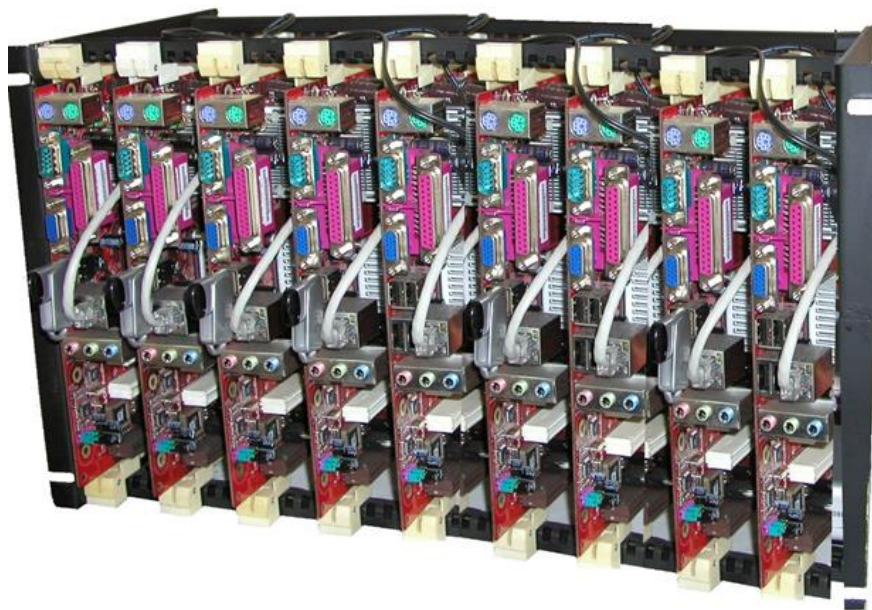


Рис. 2.3. Загальний вигляд процесорного модуля обчислювальної системи

Основа такого обчислювального модуля являє собою щільно упаковані системні блоки, які монтуються на стійці. Вузли обчислювальної системи функціонально об'єднуються в дві групи, а саме:

- ті, що призначені для дослідження прикладних задач, для яких власне і спроектовано обчислювальну систему;
- вузли відповідної інфраструктури, зокрема введення / виведення даних, керування і запам'ятовування.

Потужність обчислювальних вузлів і їхній склад можуть зазнавати змін, що дозволяють утворювати неоднорідні системи. Головні вузли, вузли керування й вузли запам'ятовувальних пристроїв призначені для реалізації особливих функцій обчислювальної системи – завантаження, керування пристроями, зовнішнього введення / виведення даних і т. д.

## 2.2. Розробка конструктивних особливостей модульної багатопроцесорної системи та концепція побудови її комутаційної мережі

Модуль високоефективного багатопроцесорного комплексу включає в себе *master*-вузол (*PM001*) і *slave*-вузли (*PN001*, *PN002*, *PN003*, ..., *PN00N*), які орієнтовано на виконання обчислювальних операцій; два керовані комутатори (*Switch IB1*, *Switch IB2*) у мережах обміну певними даними між її обчислювальними вузлами; гібридний шлюз (*SkyWay IB3*), який здійснює керування системою, її завантаження та діагностику; віртуальні локальні мережі; буфери пам'яті керованих комутаторів; мережі обміну даними в обчислювальних вузлах; механізм для відповідного резервування основних компонентів системи. Завантаження вузлів даними відбувається через призначену для цього систему комутованих локальних мереж. На рис. 2.4 зображено її блок-схему.

Розглянемо конструктивні ознаки модульної системи. У комутаційних мережах для обміну даними між обчислювальними *slave*-вузлами, як передбачено технологією *InfiniBand* [32, 55], використовуються мідні кабелі. Функцію *мережевих адаптерів* виконують мережеві карти, що здатні підтримувати роботу модуля багатопроцесорної системи за стандартом *InfiniBand*. Проектуючи багатопроцесорну систему, перевага надалася адаптеру фірми *Mellanox* [56]. Мережеві карти цієї фірми, за інших рівних умов, цінні тим, що помітно впливають на швидкодію та якість мережеских комунікацій. Зокрема в систему було встановлено мережевий адаптер типу *MHQH29C - XTR*. На рис. 2.5 подано зовнішній вигляд такого адаптера. Зауважимо, що кожне лезо багатопроцесорної системи включає чотири двопортові адаптери цього типу, які, підтримуючи комутацію згідно з віртуальним протоколом *VPI (Virtual Protocol Interconnect)*, забезпечують гнучкість з'єднань в обчислювальних комплексах. За таких умов багатопроцесорна система набуває багато переваг, серед яких висока якість обчислень і зручний доступ до мережі і до ресурсів зберігання даних, гарантована висока пропускна спроможність і низький рівень затримки передачі даних.

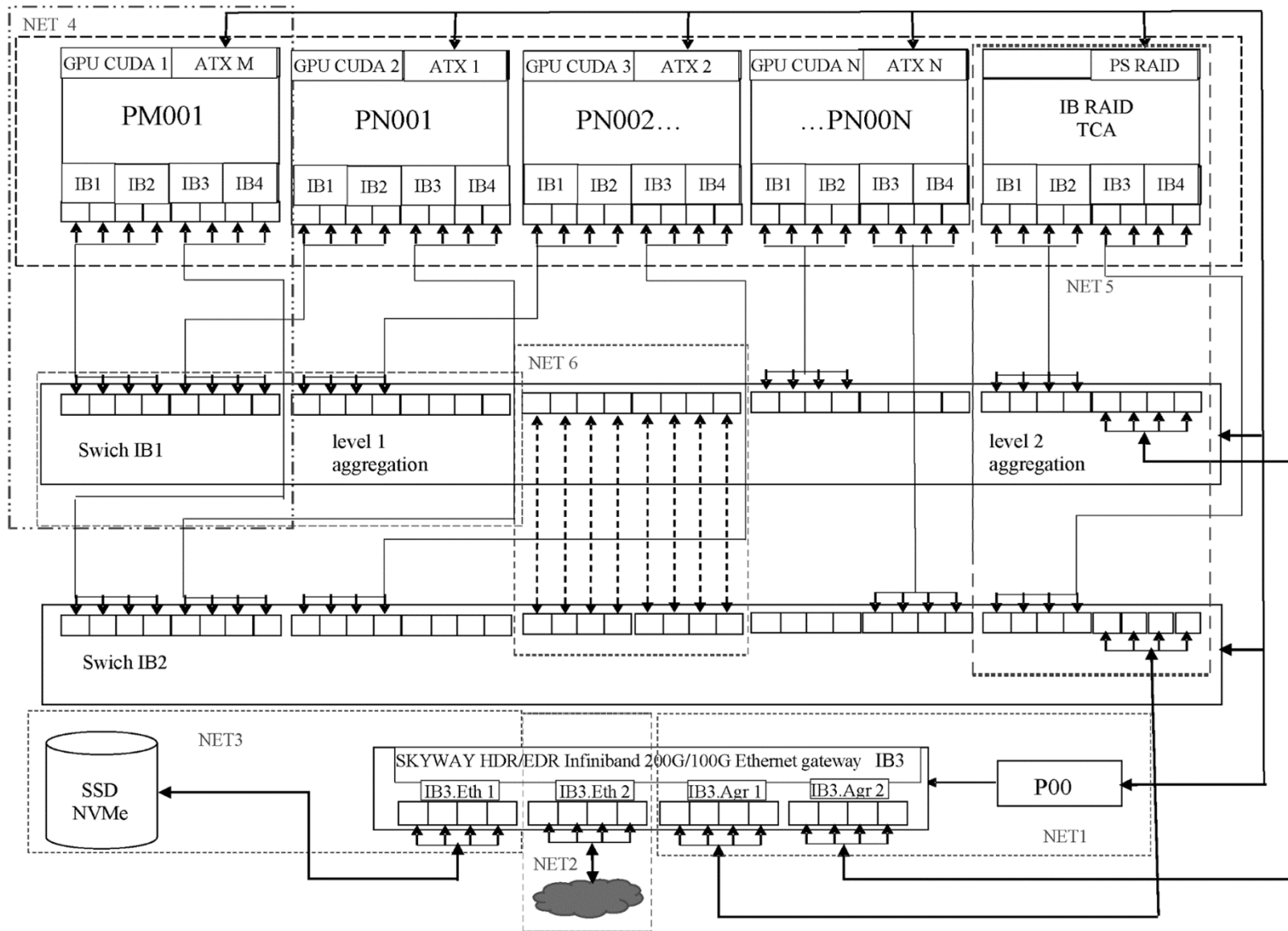


Рис. 2.4. Блок-схема модуля многопроцессорного вычислительного комплекса

Більше того, адаптери типу *MHQH29C – XTR* забезпечують швидкість передачі обчислювальних даних близько 10 Гбіт/с у кожному каналі, можуть містити послідовний інтерфейс керування, а їхня мідна кабельна група забезпечує ту ж продуктивність, що і оптично-волоконні засоби, маючи при цьому набагато нижчу вартість.

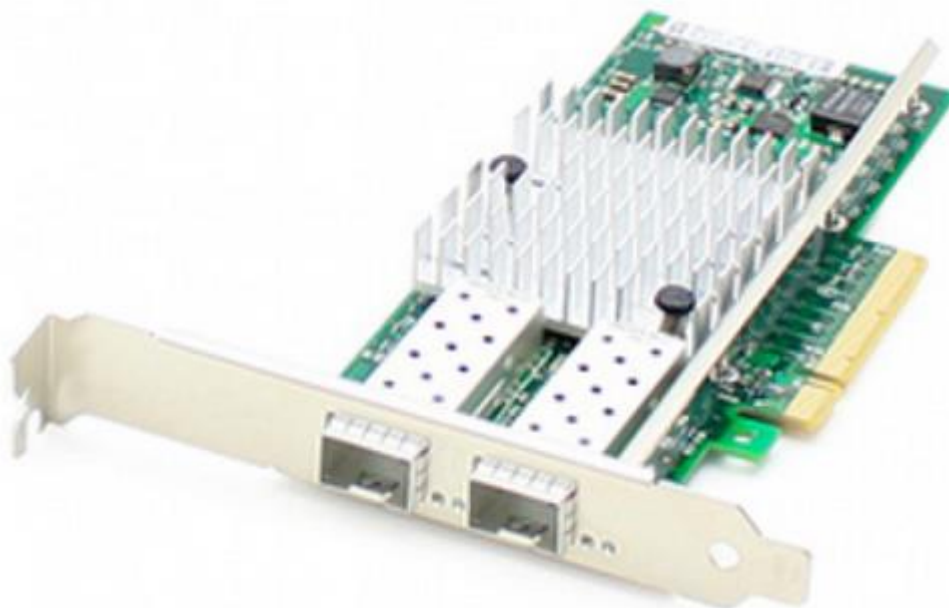


Рис. 2.5. Загальний вигляд мережевого адаптера типу *MHQH29C – XTR*

Керовані комутатори (*Switch IB1, Switch IB2*) є одним з найважливіших елементів мережевих інтерфейсів багатопроцесорної системи, які здійснюють комутацію мережевих каналів. У запропонованій багатопроцесорній системі було задіяно 36-портовий комутатор типу *Grid Director 4036* фірми *Mellanox (Voltaire)*, пропускна спроможність якого становить 40 Гбіт/с. На рис. 2.6 зображено зовнішній вигляд такого комутатора. Цей комутатор добре підходить для роботи ефективних багатопроцесорних систем, що створені на основі мідних з'єднань. Він підтримує стандартний набір мережевих технологій, серед яких віртуальні мережі, пріоретизація трафіка, агреговані канали, фільтрація багатоадресного трафіка, масштабованість близько тисячі вузлів та ін. Крім усього іншого, помітимо, що сімейство комутаторів виробника *Mellanox*, орієнтованих для впровадження

мережевих технологій *InfiniBand*, забезпечує найвищу швидкість і щільність портів, а це дозволяє створювати найбільш рентабельні й масштабовані комутовані мережі, починаючи з невеликих кластерів, і закінчуючи такими, що зосереджують у собі десятки тисяч вузлів і здатних передавати конвергентний трафік, завдяки поєднанню гарантованої пропускної спроможності та якісних засобів розширення *QoS*, що гарантує оптимальну роботу системи.



Рис. 2.6. Комутатор типу *Grid Director 4036*. Загальний вигляд

У конструюванні багатопроцесорного комплексу було застосовано процесор *Intel Core i5* (цей процесор 10 - го покоління, у якому задіяно тип пам'яті *DDR4* з підтримкою *RDMA*, що дозволяє об'єднувати до 4 каналів у портах оперативної пам'яті з частотою близько 4 ГГц і обсягом близько 128 Гбайт ОЗУ). На рис. 2.7. подано зовнішній вигляд такого процесора.



Рис. 2.7. Зовнішній вигляд процесора типу *Intel Core i5*

Обчислювальний комплекс передбачає вертикальний, паралельний один відносно одного, варіант розташування системних плат. Застосований підхід і відповідає принципам конструювання "*blade*"- систем. Після того, як ОС буде завантажена доступ до багатопроцесорної системи відбувається відповідно до стандартних мережевих протоколів (*telnet, ssh, rsh*). При цьому, аби виконувати паралельні обчислення за участю робочого комп'ютера і багатопроцесорної системи, необхідно встановити для цього певний мережевий зв'язок. Такий зв'язок організовується за допомогою топології "точка-точка".

Технічні характеристики обладнання, яке використовується при конструюванні модульної багатопроцесорної системи, подано в табл. 2.1. Обчислювальні експерименти проводились з урахуванням розглянутих вище характеристик [82].

Таблиця 2.1

Технічні характеристики обладнання багатопроцесорної системи

Мережевий кабель	Тип	<i>InfiniBand</i>
	Пропускна здатність	10 Гб/с
	Стандарт	<i>IB QDR/FDR10 (40Gb/s), 4X QSFP</i>
Мережевий адаптер	Тип	<i>MHQH29C-XTR</i>
	Виробник	<i>Mellanox</i>
	Пропускна здатність	10 Гб/с
Комутатор	Тип	<i>Grid Director 4036</i>
	Виробник	<i>Mellanox</i>
	Пропускна здатність	2.88 Тб/с

Після подання сигналу *PUSK*, який формується засобами панелі керування майстер-вузла (*PM001*) вмикається його електричне живлення за допомогою відповідного блока (*ATXm*). У цій багатопроцесорній системі використовуються блоки живлення типу типу *Corsair HX 1200 Вт* (рис. 2.8). Далі починається процес запуску

та ініціалізації майстер-вузла ( $PM001$ ) модульної багатопроцесорної системи. При цьому передбачено два режими завантаження ОС, а саме: за допомогою жорсткого диска чи від певного зовнішнього носія. Згідно з призначенням унікальних динамічних  $IP$ -адрес і відповідних локальних мереж за умовчанням завантаження лез системи відповідає спеціальний конфігураційний скрипт. Він запускається відразу після завантаження ОС. Крім того, цей скрипт забезпечує налаштування  $DHCP$ -сервера в цілому. Саме на цьому етапі роботи призначається кількість  $slave$ -вузлів обчислювальної системи ( $PN001, PN002, PN003, \dots, PN00N$ ), а за необхідності налаштовується доступу до зовнішніх мереж або до середовища Інтернету. Своєю чергою завантаження ОС на  $slave$ -вузлах обчислювальної системи ( $PN001, PN002, PN003, \dots, PN00N$ ) починається після подання до них відповідного живлення з блоків ( $ATX1 - ATXN$ ) (рис. 2.4). Виконавши перелічені операції, конфігураційний скрипт завершує свою роботу, а обчислювальна система буде готова до роботи.



Рис. 2.8. Блок живлення типу *Corsair HX*. Загальний вигляд

Завдяки роботі гібридного шлюзу (*SkyWay IB3*) (рис. 2.9) у системі формується локальна мережа *Net1*, засобами якої майстер-вузол ( $PM001$ ) здійснює процес керування, діагностику й завантаження певних умов обчислювальних задач. При

цьому *slave*-вузли виконують ті, чи інші обчислення відповідно до алгоритму вирішення прикладної задачі.



Рис. 2.9. Гібридний шлюз *SkyWay IB3*. Загальний вигляд

Аби багатопроцесорна обчислювальна система функціонувала з максимальною ефективністю, реконфігурація структури мережних інтерфейсів здійснюється відповідно до специфіки прикладних задач.

### **2.3. Метод багатовимірної агрегації каналів мережних інтерфейсів багатопроцесорного комплексу**

#### **2.3.1. Обґрунтування методу розробки режиму агрегації каналів мережевого інтерфейсу багатопроцесорного комплексу**

Для збільшення пропускної спроможності комутаційної мережі модульної системи застосовується так звана процедура "зв'язування каналів" (технологія *channel bonding*). Згідно з цією технологією декілька мережних адаптерів об'єднується в один швидкісний канал. Такий спосіб формування мережевої архітектури багатопроцесорної системи сприяє підвищенню швидкодії обчислень в алгоритмі дослідження прикладних задач, високошвидкісному доступі до пам'яті обчислювальних вузлів. За таких умов відбувається зниження навантаження на канал, який проходить між цими вузлами обчислювальної системи. До того ж описана процедура дозволяє підвищити ефективність модульного комплексу завдяки адаптації структури його мережевого інтерфейсу для дослідження задач конкретного типу.



Технологія агрегації каналів мережевих інтерфейсів багатопроцесорного комплексу дозволяє об'єднати її обчислювальні вузли таким чином, аби кожен з них під'єднувався до комутатора через декілька каналів. З цією метою вузли багатопроцесорної системи зазвичай оснащують багатопортовими мережевими платами. Технологія *channel bonding* відповідає режиму транкінгу при об'єднанні декількох комутаторів, які використовуються для збільшення швидкості передавання даних між згаданими пристроями. При цьому застосування ОС *Linux* забезпечує рівномірний розподіл навантаження (приймання / передання даних) між відповідними каналами багатопроцесорного комплексу та збільшення швидкості в режимі обміну певними даними між його вузлами.

Принагідно зауважимо, що технологія агрегації мережевих інтерфейсів обчислювальної системи в процесі застосування може породжувати певні проблеми, які відносяться до вибору комутаторів та їх налаштуванням. Розглянемо деякі з них. Перш за все, обраний комутатор має підтримувати процес агрегації каналів мережевих інтерфейсів обчислювальної системи, інакше можуть виникати різного роду помилки при формуванні таблиць маршрутизації пакетів або таблиць *MAC*-адрес. Зазначені комутатори повинні відповідати стандарту *IEEE 802.3ad* та *IEEE 802.1aq*, або підтримувати функції *Link Aggregation*.

З іншого боку, слід зазначити, що обираючи комутатори для реалізації режиму агрегації каналів мережевих інтерфейсів, необхідно враховувати їхню можливість підтримувати режим роботи віртуальних локальних мереж (*VLAN*). Саме це дозволяє уникнути процес "дублювання" *MAC*-адрес багатопортових мережевих плат у внутрішніх таблицях комутаторів.

Зауважимо, що формування багатоканального мережевого інтерфейсу модульних систем може бути організовано іншими способами. Так, в роботі [57] висвітлюється зовсім інший підхід до застосування режиму зв'язування каналів, згідно з яким мережеві канали формуються за допомогою подвійного (потрійного і так далі) набору хабів або світчів. Основна перевага цього підходу зводиться до того, що мережеві сегменти системи не перетинаються, а кожен новий мережевий канал утворює окрему мережу, яка фізично не пов'язана з мережами інших каналів.

Як бачимо, на сьогодні існує декілька способів формування багатоканальних режимів мережевих інтерфейсів багатопроцесорних обчислювальних системах. Але в будь-якому випадку необхідно враховувати деякі особливості, які слід приймати до уваги при конструюванні режимів агрегації каналів мережевих інтерфейсів. Наприклад, цілком очевидно, що всі процесори в комутаційних підмережах повинні об'єднуватися однаковим способом. До того ж сама процедура об'єднання каналів передбачає існування не менше двох фізичних підмереж, хоча їх може бути і значно більше. Для підтримки такого режиму вбудовується в ядро ОС (чи модуль *bonding.o* ядра ОС) технологія підтримки зв'язування каналів мережевих інтерфейсів системи. Зауважу, що при цьому у версіях ядра ОС 2.4.x такий режим являє собою стандартну опцію. Мережеві карти системи налаштовуються теж стандартно, хоча команду *ifconfig* необхідно застосовувати в процесі активації першої мережевої карти. З іншого боку утиліту *ifenslave* необхідно використати для активації мережевих карт решти агрегованих каналів. І насамкінець зауважимо, що типові мережі системи можуть з'єднуватися з агрегованими каналами за допомогою маршрутизатора або моста відповідно до описаної технології.

### **2.3.2. Особливості реалізації режиму багатовимірної агрегації каналів мережевих інтерфейсів багатопроцесорного комплексу**

Структурну схему топології мережевих інтерфейсів багатопроцесорного комплексу зображено на рис. 2.10. Як бачимо на схемі, ця система включає шість віртуальних локальних мереж *VLAN: Net1 – Net6*.

Віртуальна локальна мережа *Net1* забезпечує міжканальну агрегацію мережевого інтерфейсу багатопроцесорного комплексу через порти *IB3.Agr1* і *IB3.Agr2*, гібридного шлюзу *SkyWay IB3*. При цьому гібридний шлюз через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього інтерфейсу *IB3.Agr1\_01 – IB3.Agr1\_04* з'єднується з портами *IB2\_33 – IB2\_36* комутатора *IB2* (рис. 2.11). Далі комутатор *IB2* через вхід/вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього інтерфейсу *IB2\_29 – IB3\_33* з'єднується з портами *TCA\_ib3\_01, TCA\_ib3\_02,*

*TCA\_ib4\_01*, *TCA\_ib4\_02* процесорного модуля та з інтерфейсом ТСА. Своєю чергою, гібридний шлюз через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього інтерфейсу *IB3.Agr2\_01 – IB3.Agr2\_04* з'єднується з портами *IB1\_33 – IB1\_36* комутатора *IB1*. Далі комутатор *IB1* через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього інтерфейсу *IB1\_29 – IB1\_33* з'єднується з портами *TCA\_ib1\_01*, *TCA\_ib1\_02*, *TCA\_ib2\_01*, *TCA\_ib2\_02* процесорного модуля та з інтерфейсом ТСА.

Віртуальна локальна мережа *Net2* забезпечує зовнішні та хмарні сполучення, її орієнтовано на завантаження даних керування системою, її конфігурацію, а також хмарну конвертацію різнорідних даних з метою подальшої їх обробки. При цьому гібридний шлюз *SkyWay IB3* через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього інтерфейсу *IB3.Eth2\_01*, *IB3.Eth2\_02* з'єднується з портами *OC\_01*, *OC\_02* зовнішніх з'єднань (outer connections). Далі гібридний шлюз *SkyWay IB3* через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього інтерфейсу *IB3.Eth2\_03*, *IB3.Eth2\_04* з'єднується з портами *CC\_01*, *CC\_02* хмарних з'єднань (cloud connections).

Віртуальна локальна мережа *Net3* як системний засіб реалізує швидкий та енергоефективний спосіб зберігання й обміну інформацією. Системну мережу орієнтовано на швидке завантаження багатопроцесорної системи, її конфігурації. За допомогою цієї мережі реалізується процес налаштування файлів конфігурації ОС, зберігання ядра ОС, елементів безпеки *firewall* та ін. При цьому гібридний шлюз *SkyWay IB3* через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього інтерфейсу *IB3.Eth1\_01*, *IB3.Eth1\_02*, *IB3.Eth1\_03*, *IB3.Eth1\_04* з'єднується з портами *SSD\_01*, *SSD\_02*, *SSD\_03*, *SSD\_04* зовнішнього накопичувача.

Підкреслимо, що віртуальні локальні мережі *Net1 – Net3* сформовані на базі нового гібридного шлюзу *NVIDIA InfiniBand*. Сімейство модульних комутаторів *NVIDIA InfiniBand* забезпечує найвищу продуктивність і щільність порту з розблокуючою високою пропускною спроможністю в одному корпусі.

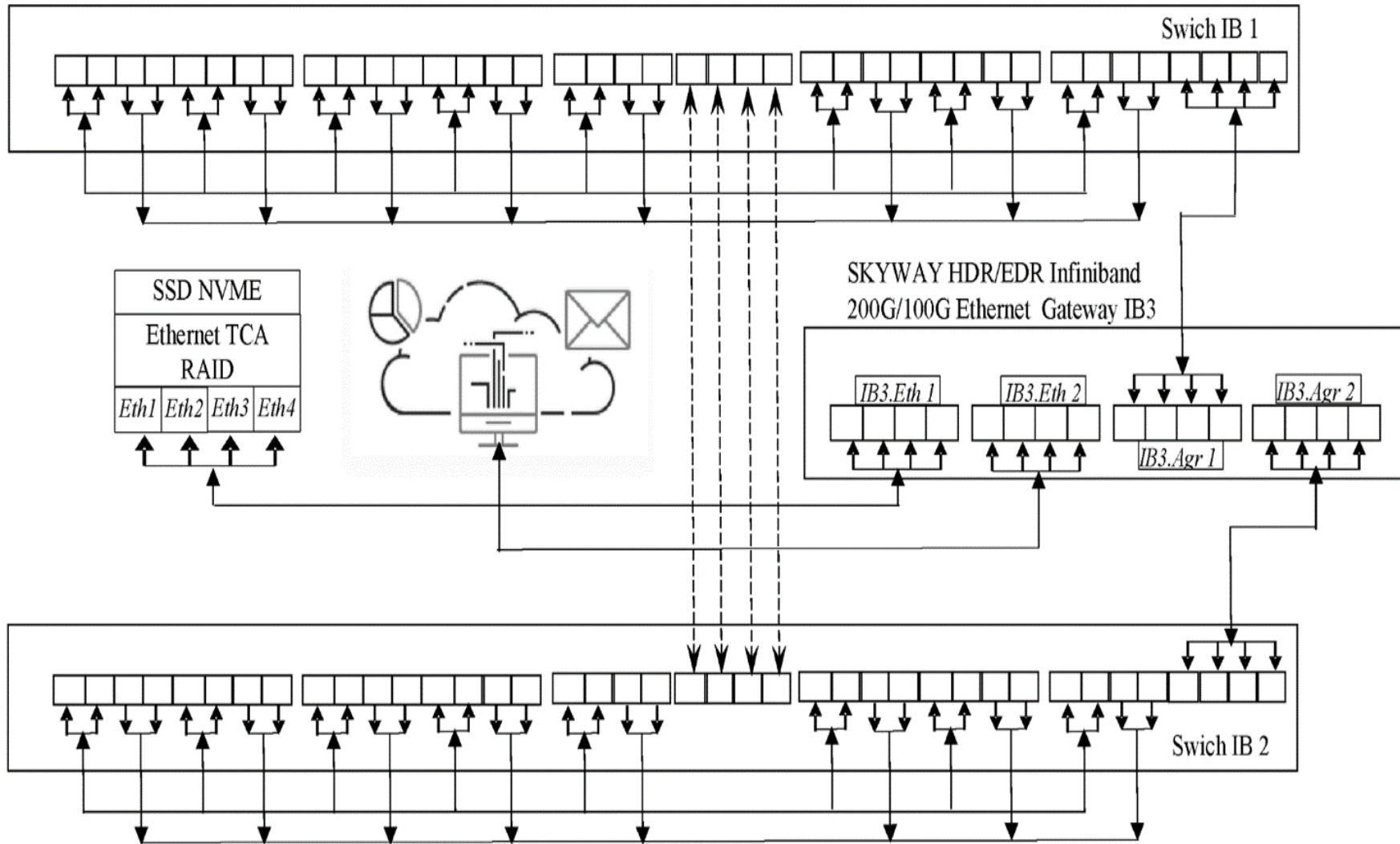


Рис. 2.10. Структурна схема топології мережевих інтерфейсів багатопроцесорної системи



Рис. 2.11. З'єднання інтегрованого двоспрямованого зовнішнього інтерфейсу з комутатором системи

Такі комутатори мають добру перспективу у виконанні високопродуктивних, хмарних обчислень і штучного інтелекту при менших витратах і складності. Вони забезпечують масштабовану ієрархічну агрегацію, можливість самовідновлення мереж, гарантовану якість обслуговування. У запропонованій розробці використано гібридний шлюз *NVIDIA Skyway InfiniBand to Ethernet Gateway*. Основні характеристики такого шлюзу подано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Загальні характеристики гібридного шлюзу *NVIDIA Skyway InfiniBand to Ethernet Gateway*

Загальна пропускна спроможність	1,6 Tb/s
Загальна кількість портів	16
Кількість портів IB	8x <i>InfiniBand</i> 8x <i>HDR</i> 200 Gb/s
Кількість портів Eth	8 портів <i>Ethernet</i> 8x 200/100 Gb/s
Монтаж в стійку	2U

Віртуальна локальна мережа *Net4* – міжканальна мережа, яка реалізує зв'язок агрегованих модулів. За таких умов вона виконує функції агрегації каналів мережевих інтерфейсів. Розглянемо окремо особливості комутації *master*-вузла та обчислювальних вузлів. *Master*-вузол *PM001* формує мережу для керування роботою комутаторів, виконання їхньої *Web* конфігурації та діагностики. При цьому такий вузол багатопроцесорної системи через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього мережевого інтерфейсу *PM001.ib1\_1* та *PM001.ib1\_2* з'єднано з портами *IB1\_01* та *IB1\_02* керованого комутатора *IB1*. Майстер-вузол *PM001* багатопроцесорної системи через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього мережевого інтерфейсу *PM001.ib2\_1* та *PM001.ib2\_2* з'єднано з портами *IB1\_03* та *IB1\_04* керованого комутатора *IB1*. У підмережі керованого комутатора *IB2* відповідні з'єднання реалізовані за наступною схемою. Майстер-вузол *PM001* багатопроцесорного комплексу з'єднано через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього мережевого інтерфейсу *PM001.ib3\_1* та *PM001.ib3\_2* з портами *IB2\_01* та *IB2\_02* керованого комутатора *IB2*. Причому майстер-вузол *PM001* багатопроцесорної системи через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього мережевого інтерфейсу *PM001.ib4\_1* та *PM001.ib4\_2* з'єднано з портами *IB2\_03* та *IB2\_04* керованого комутатора *IB2*.

Розглянемо особливість створення мережевого інтерфейсу в режимі агрегації його каналів для *slave*-вузлів. Як показано на рис. 2.10 у системі обміну даними багатопроцесорного комплексу створено дві обчислювальні підмережі, вони функціонують симетрично шляхом використання двох комутаційних матриць (комутатори *IB1* і *IB2*). Безпосередньо реалізація процесу агрегації каналів мережевих інтерфейсів включає наступну архітектуру комутаційної мережі багатопроцесорного комплексу. Так, *slave*-вузол *PN001* з'єднано через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього мережевого інтерфейсу *PN001.ib1\_1* та *PN001.ib1\_2* з портами *IB1\_05* та *IB1\_06* керованого комутатора *IB1*. Далі *slave*-вузол *PN001* з'єднано через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього мережевого інтерфейсу *PN001.ib2\_1* та *PN001.ib2\_2* з портами *IB1\_07* та *IB1\_08* керованого

комутатора *IB1*. У підмережі керованого комутатора *IB2* відповідні з'єднання реалізовані за наступною схемою. Отже, *slave*-вузол *PN001* з'єднано через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього мережевого інтерфейсу *PN001.ib3\_1* та *PN001.ib3\_2* з портами *IB2\_05* та *IB2\_06* керованого комутатора *IB2*. Далі *slave*-вузол *PN001* з'єднано через вхід / вихід інтегрованого двоспрямованого зовнішнього мережевого інтерфейсу *PN001.ib4\_1* та *PN001.ib4\_2* з портами *IB2\_07* та *IB2\_08* керованого комутатора *IB2*. Як саме виглядає з'єднання інтегрованого двоспрямованого зовнішнього мережевого інтерфейсу із мережевими картами *master*-вузла та обчислювальних *slave*-вузлів, зображено на рис. 2.12.



Рис. 2.12. Зовнішній вигляд з'єднання інтегрованих двоспрямованих мережевих інтерфейсів з адаптерами *master*-вузла та *slave*-вузлів

Віртуальна локальна мережа *Net5* – мережа технології віртуалізації даних, вона зокрема сприяє підвищенню надійності зберігання даних, а також швидкості читання / запису інформації.

Віртуальна локальна мережа *Net6* виконує пошарову агрегацію даних мережевого інтерфейсу.

На рис. 2.13 зображено модуль багатопроцесорного комплексу з комутованим мережевим інтерфейсом, що діє за технологією *channel bonding*.

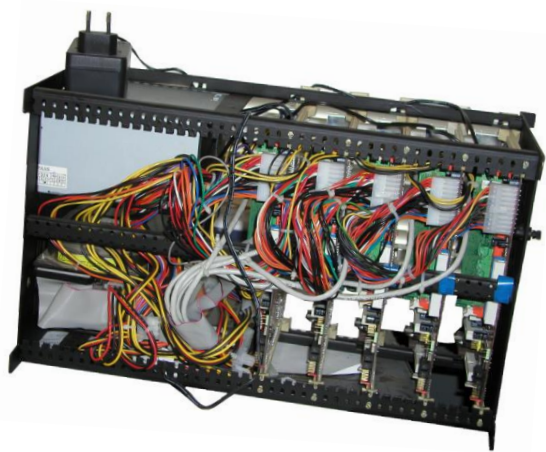


Рис. 2.13. Модуль багатопроцесорного комплексу з комутованим мережевим інтерфейсом відповідний технології *channel bonding*

На рис. 2.14 подано монтажну стійку багатопроцесорного комплексу з вмонтованим у нею обладнанням.



Рис. 2.14. Монтажна стійка багатопроцесорного комплексу з вмонтованим в нею обладнанням. Загальний вигляд



Максимальна ефективність заданої багато процесорної системи досягається шляхом реконфігурації структури мережевих інтерфейсів відповідно до специфіки прикладних задач. Своєю чергою, реконфігурація структури мережевих інтерфейсів передбачає дію шести режимів роботи, зокрема топологія локальної мережі типу “зірка” відповідає першому режиму, другому – “лінійка”, третьому – “повний граф”, четвертому – “кільце”, п’ятому – “решітка” і шостому – “замкнена решітка”. При цьому налаштування режимів топології комутаційної мережі системи здійснюється на апаратно-програмному рівні. Для цього змінюють режими роботи портів мережевих карт, наприклад, від дуплексного переходять до напівдуплексного режиму. Крім того, виконуючи попарно симетричну агрегацію мережевих портів комутаторів *IB1* та *IB2*, змінюють режими роботи приймання та передання даних. З метою реконфігурації мережевих інтерфейсів обчислювальної системи також виконуються відповідні операції з налаштування режиму *Link Agrigation*. Безпосередньо особливості кожного з зазначених режимів роботи реконфігурованої мережі обчислювальної системи висвітлюється в літературних джерелах [19, 58 – 60].

Розглянемо деякі принципові переваги процесу обчислень у запропонованій системі. По-перше, у *slave*-вузлах процес прийняття / передання даних виконується засобами керованих комутаторів *IB* без застосування режиму буферизації. По-друге, проміжні та фінальні результати обчислення надходять у майстер-вузол через комутатор *Infiniband*. Власне сам процес керування та передання даних від *slave*-вузлів реалізується через мережеві адаптери *HCA*.

Нарешті, необхідно відмітити принципову особливість використання технології *InfiniBand*, згідно якої усі результати збору даних з пристроїв введення, їх обробки, передання на пристрої виведення відповідної інформації реалізуються за допомогою процесорного модуля, оснащеного інтерфейсом *TCA*. Крім того, зберігання даних про керування процесами в локальній мережі здійснюється на жорсткому диску *SSD*, що має інтерфейс *NVMe*. Усе перелічене сприяє істотному підвищенню ефективності обчислень.

Розроблений режим роботи мережевих інтерфейсів багатопроцесорної системи теж має певні особливості. Безпосередньо процес обміну даними між обчислювальними вузлами здійснюється в окремих комутаційних мережах, які функціонують відповідно до технології агрегації каналів. Завдяки цьому підвищується швидкість в процесі обміну даними між підпорядкованими вузлами багатопроцесорного комплексу та зменшується навантаження на канал, який їх з'єднує.

### **2.3.3. Реалізація режиму агрегації каналів мережевих інтерфейсів багатопроцесорного комплексу на основі платформи *CUDA***

Проектуючи багатопроцесорну обчислювальну систему, застосовували апаратне забезпечення корпорації *NVIDIA*. Завдяки чому стало можливим використання програмно-апаратної архітектури паралельних обчислень на основі платформи *CUDA*. Така платформа дозволяє використовувати ресурси відеокарт для неграфічних обчислень. На сьогодні ця технологія стає все більш актуальною.

Дію платформи *CUDA* підтримано в усіх відеокартах корпорації *NVIDIA*, починаючи з простих, призначених для окремого користувача, закінчуючи спеціалізованими потужними. Прискорення обчислень за допомогою платформи *CUDA* відбувається за рахунок призначених для користувача застосунків, наприклад, *Adobe Photoshop CS 4*, *Nero Burning* або *MatLab*. Як бачимо, програмування, у якому задіяно ресурси відеокарт, актуальне і перспективне. При цьому досягають великої продуктивності за доступну ціну.

Основними перевагами платформи *CUDA* є її безкоштовність (програмне забезпечення для всіх основних платформ вільно завантажується з ресурсу [developer.nvidia.com](http://developer.nvidia.com)), простота і гнучкість. Технологія *NVIDIA CUDA* – середовище, у якому розробники мають створювати програмне забезпечення для розв'язування складних обчислювальних задач протягом значно меншого часу завдяки багатоядерній обчислювальній потужності графічних процесорів.

Процедура програмування, що застосовується в технології *CUDA*, відрізняється від традиційної тим, що в ній повністю приховано графічний конвеєр від програміста, дозволяючи йому готувати програми в звичніших для нього «термінах». Крім того, у технології *CUDA* передбачено більш зручнішу для програміста модель роботи з пам'яттю. Тут немає необхідності зберігати дані в 128-бітових текстурах, оскільки *CUDA* дозволяє читати дані безпосередньо з пам'яті відеокарти.

У конструюванні багатопроцесорного обчислювального комплексу було задіяно відеокарту корпорації *NVIDIA GeForce GTX 1080*. Її основні характеристики подано в табл 2.3.

Таблиця 2.3

Загальні характеристики відеокарти  
*NVIDIA GeForce GTX 1080*

Кількість ядер	2560
Базова частота	1607 МГц
Відеопам'ять	8 Гб
Пропускна спроможність каналу пам'яті	10 Гбіт/с
Розрядність інтерфейсу	256-бітовий
Продуктивність	277,3 Гфл

Саме завдяки технології *CUDA* були реалізовані алгоритми розрахунку процесу теплопередачі [45]. Аналіз часу виконання паралельних алгоритмів показав, що застосування технології *CUDA* в рази скорочує тривалість обробки даних. Практичне тестування цього способу продемонструвало також, що результативність виконаних при цьому обчислень перевищує на порядок статистику подібних обчислень на центральному процесорі, навіть з використанням технології *OpenMP*. Проте цілком очевидно, що не має сенсу використовувати технологію *CUDA* для роботи з

невеликими обсягами даних, адже в цьому випадку прискорення процесу обчислень практично не спостерігається.

З іншого боку, зауважимо, що відеокарту *NVIDIA GeForce GTX 1080* для даного багатопроцесорного комплексу було підбирано в розрахунку на її сумісність з масштабованим інтерфейсом зв'язку *Scalable Link Interface (SLI)*. У розробці новітніх технологічних процесів [46, 61] такий підхід є надзвичайно актуальним. Застосування фірмової технології *SLI* створює можливість розподілу розрахунку між двома відеокартами. При цьому засоби *Quad SLI* розширюють цю технологію, тобто дозволяють двом двопроцесорним відеокартам задіювати одночасно чотири графічні процесори. Під час роботи запропонованої багатопроцесорної системи відбувалось так зване «зв'язування» двох відеокарт *NVIDIA GeForce GTX 1080*. Це дозволяло досягти не тільки суттєве збільшення продуктивності обчислень, але й значне зменшення латентності, а також істотного розвантажити системну шину.

Інсталиувати технологію *Quad SLI* виявилось доволі просто. Так, вставивши дві згадані відеокарти в рознімні з'єднання і підключивши *SLI*-міст, після запуску системи бачимо, що вони інсталиуються подібно до звичайного відеоадаптера. Далі після встановлення драйверів та ініціалізації *Quad SLI*, його рендеринг буде увімкнено за замовчуванням. При цьому нові, додаткові налаштування не передбачаються. Зауважимо, що на панелі керування багатопроцесорною системою передбачено варіант відключення технології *Quad SLI*, що дозволить двом відеокартам *NVIDIA GeForce GTX 1080* працювати незалежно одна від одної. Ця процедура надзвичайно важлива для реалізації нових інсталяційних процедур з відеокартами згаданого типу.

Відмітимо, що для «зв'язування» двох відеокарт було використано міст *SLI*. При цьому, у корпорації *NVIDIA* застосовують фізичний роз'єм для з'єднання відеокарт між собою, що дозволяє їм взаємодіяти одна з одною, уникнувши смугу пропускання в слотах. Отже, можна задіяти один з двох мостів типу *SLI*: або стандартний (для менш потужних карт), або той, що має високу пропускну спроможність (коли карти більш потужні). Для даної розробки застосовували другу із згаданих карт (*NVIDIA GeForce GTX 1080*). Якщо при цьому використати

стандартний міст, то це не дозволить забезпечити належну продуктивність відеокарт. Характеристики мостів типу *SLI* приведені в табл. 2. 4.

Під час інсталяції *SLI* в систему забезпечується додаткове охолодження корпусу модуля багатопроцесорної системи. Для розробленої системи використовувався корпус з 120 мм вентилятором, розташованим навпроти роз'ємів відеокарт. Розміщення 120 мм вентилятора навпроти цих двох відеокарт дозволяє уникнути їхнього перегрівання. Відеокарти монтуються таким чином, аби гаряче повітря видувалося через отвори на задній панелі корпусу системи. Отже, немає необхідності застосовувати додаткове спеціальне охолодження. В даному випадку достатньо лише забезпечити в приміщенні нормальний повітрообмін.

Таблиця 2.4

Характеристики *SLI* мостів

Міст	Тактова частота	Максимальна пропускна спроможність
Стандартний	400 МГц	1 Гб/с
З високою пропускною спроможністю	650 МГц	2 Гб/с

Що стосується енергоспоживання, то в подібних системах необхідно використовувати високоякісні блоки живлення. У пропонованій конструкції багатопроцесорної системи використовувався блок живлення типу *Corsair HX 1200* Вт, який без проблем забезпечує функціонування технології системи *Quad SLI*. Запропонована багатопроцесорна система не змушувала блок живлення працювати на повну потужність. До того ж, відеокарти, якими оснащено систему, також працюють досить тихо, причому навіть в конфігурації *Quad SLI* , з шумом у них проблем немає.

Крім того, необхідно підкреслити, що графічний процесор, маючи потужну обчислювальну здатність, як і раніше не може повністю замінити діяльність

центрального процесора, безумовна перевага якого полягає в універсальності, зате в його силах істотно розвантажити *CPU*, узявши на себе навантаження, що являють найбільш трудомісткими та складними завданнями.

## 2.4. Висновки до розділу 2

На основі аналізу методів розв'язування сучасних прикладних задач було з'ясовано, що застосування паралельних обчислювальних систем – один із стратегічних напрямів розвитку інформаційної техніки. Це пояснюється постійним зростанням кількості тих прикладних задач, для вирішення яких бракує можливостей нинішніх обчислювальних засобів. Очевидно, що за допомогою високоефективних модульних систем було знайдено вдалий спосіб вирішення багатьох актуальних виробничих проблем. Саме тому в даному розділі роботи було висвітлено проблему конструювання такої високоефективного багатопроцесорного комплексу.

Цей розділ відображає комплексний формалізований підхід до конструювання модульного багатопроцесорного комплексу з багатовимірною агрегацією мережевих інтерфейсів. При цьому аналіз наявних можливостей створення такої системи показав, що останнім часом виробники комп'ютерної техніки пропонують пристрої, у яких запроваджені лезові технології (блейд-технології). Отже, сконструювавши багатопроцесорну систему на базі серверів-лез, отримують готове рішення з необхідними засобами керування та належним мережевим інтерфейсом. Основні переваги такого конструктивного рішення порівняно з іншими: блейд-системи компактніші та зручніші в обслуговуванні, особливості їх конструкції дозволяють зручно формувати необхідну конфігурацію.

Аналіз конструювання багатопроцесорних систем показав, що новий етап розвитку таких систем тісно пов'язаний із сферою розробки новітніх мережевих технологій. Такий підхід пояснюється істотними відмінностями між мережею кластерної обчислювальної системи та мережею робочих станцій. Так, мережа обчислювальної системи призначається не для зв'язку окремих комп'ютерів, вона здійснює зв'язок між певними обчислювальними процесами. Далі, чим вищою буде пропускна спроможність обчислювальної мережі в такій системі, тим швидше

виконуватимуться визначені користувачем паралельні завдання. Отже, технічні характеристики обчислювальної мережі набувають першочергового значення, коли йде мова про конструювання багатопроцесорних комплексів. З огляду на сказане вище, було прийнято рішення застосовувати технологію мережевого інтерфейсу *InfiniBand*. Таким чином, обмін даними між підпорядкованими вузлами модульного комплексу відбувається згідно із стандартом *InfiniBand*. Було помічено, що порівняно з іншими багатопроцесорними засобами, розроблена система має такі принципові відмінності: можливість мережевого завантаження процесорів, підтримка дії режиму *VLAN*, наявність механізму резервування ключових складових модуля, спеціально розроблений режим обміну даними між підпорядкованими вузлами в мережі комутаторів *InfiniBand*.

У конструюванні багатопроцесорної системи особливу увагу приділяли особливостям передавання даних обчислень між сусідніми вузлами, бо це найповільніший етап алгоритму виконуваних обчислень, у процесі якого може істотно знизитись ефект від збільшення кількості задіяних процесорів. За таких умов було визначено один з основних шляхів підвищення ефективності модульних багатопроцесорних комплексів – це агрегація каналів мережевих інтерфейсів в системі обміну даними між їхніми *slave*-вузлами. При цьому зроблено висновок про актуальність теми підвищення ефективності модульних багатопроцесорних комплексів за рахунок реорганізації структури мережевих інтерфейсів. Відомо, що вона викликає інтерес у дослідників, перебуваючи в стані активного розвитку.

Порівняльний аналіз здобутків у цій сфері показав, що нині проблему агрегації каналів у модульних багатопроцесорних системах не розв'язано належним чином. До того ж, існує критично мало робіт, у яких досліджувався б вплив архітектури мережі згаданої системи на ефективність розпаралелювання обчислень.

Було встановлено, що багатовимірну агрегацію каналів мережевих інтерфейсів багатопроцесорного комплексу реалізовано у вигляді шести віртуальних локальних підмереж *VLAN*. Причому мережі міжканальної агрегації інтерфейсу кластера, зовнішніх та хмарних з'єднань, зокрема й системну мережу сформовано на базі нового гібридного шлюзу типу *NVIDIA InfiniBand*. З іншого боку, застосування

модульних комутаторів *NVIDIA InfiniBand* дозволяє підтримувати стандартний набір мережевих технологій, зокрема віртуальних мереж, а також пріоритетність трафіка, агрегованих каналів, фільтрацію багатоадресного трафіку. Сімейство названих комутаторів виявилось перспективним у сфері високопродуктивних, хмарних обчислень і штучного інтелекту завдяки своїй простоті й порівняно невисокій вартості. Крім того, вони відрізняються масштабованою ієрархічною агрегацією, передбачають можливість самовідновлення мереж, гарантовану зручність обслуговування.

Описана в даному розділі роботи технологія зв'язування каналів мережевих інтерфейсів багатопроцесорної модульної системи дає можливість об'єднати вузли системи в мережу так, аби кожен з них під'єднувався до комутатора більше ніж через один канал. Описана технологія подібна до режиму трекінгу у з'єднанні комутаторів, коли вдається збільшити швидкість передавання даних обчислень між двома або декількома цими пристроями. Виконання процедури зв'язування каналів *дозволяє досягти рівномірного розподілу навантаження (прийняття / передання даних) між вузлами у багатопроцесорній системі, а також підвищити швидкості в системі її обміну даними.*

Ще раз важливо звернути увагу на головну перевагу режиму багатовимірної агрегації каналів, завдяки якій вдалось істотно підвищити швидкості обміну даними обчислень між вузлами обчислювального комплексу, а також підвищити показники надійності функціонування модуля в цілому. Так, у разі відмови одного адаптера трафік надсилається наступному справному адаптеру без переривання сервісу. Коли ж адаптер починає знову працювати, то в такому випадку передавання даних через цей пристрій поновлюється.

У багатовимірній агрегації каналів мережевих інтерфейсів перевага надалася адаптеру фірми *NVIDIA*. Так, обрані для цієї мети мережеві адаптери типу *MHQH29C - XTR*, які, підтримуючи комутацію згідно з віртуальним протоколом *VPI (Virtual Protocol Interconnect)*, забезпечують гнучкість з'єднань в обчислювальних комплексах. Завдяки цьому вдалося досягти високої якості обчислень, мати



високошвидкісний доступ до ресурсів зберігання даних, гарантовану високу пропускну спроможність і низький рівень затримки передачі даних.

Проектуючи багатопроцесорну систему особливу увагу приділяли практичним аспектам її функціонування. Так, завдяки застосуванню гібридного шлюзу типу *NVIDIA Skyway InfiniBand to Ethernet Gateway*, процесорного модуля, оснащеного інтерфейсом *TCA* нового покоління, а також платформи *CUDA* вдалося значно збільшити обчислювальні потужності багатопроцесорної системи без втрати часу на реорганізацію режимів роботи мережевих інтерфейсів, коли потрібно вирішувати ті чи інші прикладні завдання.

Необхідні в дослідженнях обчислювальні експерименти проводили під керуванням кластерних операційних систем, скориставшись технологією *VLAN* та набором бібліотек *MPI* в середовищі об'єктно-орієнтованого програмування мовою *C#*.

Отже, відзначимо, що в цьому розділі дисертації було визначено шляхи підвищення ефективності багатопроцесорного кластерного комплексу за рахунок удосконалення архітектури його мережевих інтерфейсів. Запропонований підхід дозволив не тільки підвищувати ефективність процесу розпаралелювання, але також істотно зменшити час обчислень. Таких результатів вдалося досягти шляхом зменшення часу тривалості граничного обміну обчислювальними даними в системі *slave*-вузлів кластерного комплексу. Усі перелічені заходи дозволили удосконалити проектувану систему надавши їй певних властивостей, що різнять її від наявних систем, а саме:

- по-перше, завдяки застосуванню технології *InfiniBand* вдалося досягти низької латентності та високої швидкодії;
- по-друге, з'явилась можливість змінювати через пульт керування або *WEB*-інтерфейс конфігурацію локальних мереж, адаптуючи їхню структуру для дослідження задач того чи іншого типу;
- по-третє, запровадивши принцип *RDMA* в технології *InfiniBand*, здійснювали прямий обмін обчислювальними даними між оперативною пам'яттю певних вузлів багатопроцесорного комплексу, що сприяло підвищенню швидкодії обчислень і

забезпечило високошвидкісне звернення до пам'яті її *slave*-вузлів з обміном даними між ними, а також зменшило навантаження на систему *CPU* під час цього обміну і знизило завантаження каналів, які проходить між вузлами обчислювального комплексу;

– по-четверте, використання адаптерів типу *ConnectX* створило принципово нові можливості "конективності" такої системи з іншими обчислювальними середовищами; зокрема вдалося розвантажити центральний процесор (за рахунок обслуговування трафіка *InfiniBand*) і, як наслідок, підвищило ефективність кластера в цілому;

– по-п'яте, завдяки модульному принципу побудови було спрощено процеси компонування, нарощування або заміни тих обчислювальних вузлів, які вийшли з ладу, при цьому в цілому зробити більш доступною експлуатацію усієї сконструйованої системи.

Відзначимо основні числові характеристики запропонованої багатопроцесорної системи порівнявши їх існуючими [7, 8, 15]. Шляхом застосування процесорного модуля, оснащеного інтерфейсом *TCA* нового покоління, та жорсткого диска *SSD*, що має інтерфейс *NVMe*, вдалося знизити час завантаження ОС у *main*-вузлі на 180 %, у *slave* -вузлах на 320 %; тривалість програмної реорганізації мережевого інтерфейсу знизилась на 530 %; на 250 % знизився час обробки, пересилання та зберігання проміжних і кінцевих результатів розрахунку; на 240 % зменшилась тривалість обробки системних статистичних даних.

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.

Коли порівнювати наявні засоби обчислення з розробленою системою [21, 22], то внаслідок застосування програмно-апаратної архітектури паралельних обчислень корпорації *NVIDIA* на основі платформи *CUDA* вдалося в кожному обчислювальному

вузлі багатопроцесорної системи збільшити обсяг відеопам'яті на 16 Гб, а також підвищити загальну продуктивність вузлів системи на 350 Гфл.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДУЛЬНОГО ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ЯК ЗАСОБИ КОМУТАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ

Цей розділ дисертаційної роботи спрямовано на висвітлення аспектів застосування та налаштування засобів програмного системного забезпечення модульної багатопроцесорної системи. При цьому зауважимо, що кожен її вузол працює під керуванням власної копії стандартної ОС. Склад та потужність вузлів комплексу можуть різнитися в межах одного модуля, проте тут ми розглядаємо кожен такий модуль, як однорідний. Взаємодія між вузлами модульної системи виконується засобами інтерфейсу програмування у вигляді спеціалізованих бібліотек функцій.

Унаслідок того, що багатопроцесорний обчислювальний комплекс побудовано з готових апаратних компонентів, то і його операційна система в основному включає готові програмні продукти загального призначення. Так, на кожному вузлі системи і в його керуючій машині працюють власні локальні ОС. Одночасно ОС модульного комплексу включає спеціалізовані компоненти, зокрема, комунікаційну бібліотеку і базові засоби запуску заданих паралельних програм.

Отже, цей розділ дисертаційної роботи має на меті розкрити особливості реалізації та налаштування програмного системного забезпечення багатопроцесорного обчислювального комплексу, охарактеризувати програмні засоби комунікації (взаємодії) між його вузлами та описати специфіку функціонування вказаних програмних засобів.

#### **3.1. Обґрунтування особливостей реалізації операційної системи для розподілених обчислювальних систем**

У досліджуваній багатопроцесорній системі застосовано ОС *Linux* [61]. Така ОС на сьогодні є найбільш поширеною для роботи з подібними засобами.

Зауважимо, що висвітлюючи аспекти застосування спеціалізованого програмного забезпечення багатопроцесорних систем, необхідно відокремити кожен з них від комплексів програм користувача. При цьому зауважимо, що таке системне програмне забезпечення можна поділити на чотири основні групи, а саме:

- операційні системи;
- засоби комунікації мережевого інтерфейсу;
- засоби для адміністрування системи в цілому;
- спеціальні програмні додатки.

З урахуванням такого поділу і будемо об'єкт аналізу. Перш за все, треба взяти до уваги, що певна програма, що не входить у ядро ОС, буде виконуватися під керуванням такої ОС, як процес. У роботі багатопроцесорної системи процес можна трактувати, як процедуру виконання програми на окремому її процесорі.

Проаналізуємо певні особливості процесів в операційній системі *Linux*. Перш за все зауважимо, що процеси в операційній системі *Linux* виконуються псевдопаралельно. Це зумовлено тим, що ніби виконання кожного з них забезпечує окремий процесор. За таких умов кожен процес має власний адресний простір з тієї причини, що жоден з них не може “затерти пам'ять” другого. Така обставина цілком узгоджується з приведеним неформальним визначенням процесу. З іншого боку зауважимо, що не всякий процес має унікальний, доступний тільки йому адресний простір. У зв'язку з цим процеси поділяються на “повноцінні” (мають власний адресний простір) і “легковагі”, котрі охоплюють спільний адресний простір (подібно до процесорів у багатопроцесорній машині із спільною пам'яттю). Поняття повноцінного процесу в усіх варіантах системи *Linux* більш-менш стандартизоване. Що ж до процесів “легковагих”, тобто тих, що співіснують на спільному адресному просторі якого-небудь повноцінного процесу, то *Linux* не тільки підтримує дії їхніх найбільш поширених варіантів, але також пропонує власні. Особливості таких варіантів у цій роботі не розглядаються з тієї причини, що в проектованій кластерній системі увага приділяється тільки повноцінним процесам.

Отже, коли користувач запускає роботу програми на деякому лезі модульного пристрою під керуванням операційної системи *Linux*, то вона починає виконуватися як процес [62]. Будь-який процес належить певному користувачеві, зареєстрованому в даній системі. Драйвери всіх файлових систем також належать деяким користувачам. Процес деякого користувача може взаємодіяти з файлами інших користувачів лише тією мірою, як це вирішить власник файлів, визначаючи права доступу. Такі права за потреби можуть бути змінені, роблячи їх певною мірою доступними для інших користувачів. У той же час, права доступу до чужих файлів змінювати не можна. Як бачимо, в обчислювальній модульній системі реалізується процедура багатозадачності.

Підкреслимо, що в описаній операційній системі обов'язково присутній так званий *main*-користувач на ім'я *root*, якому належать будь-які права на керування роботою кластера, наприклад, він може змінювати права доступу до всіх файлів або навіть змінювати власника чужого файлу. Ті компоненти ОС, що не є частиною ядра, виконуються саме як процеси, що належать користувачеві *root*. Їх часто називають “демонами”.

Отже, підбиваючи підсумки організації процесів в операційній системі *Linux*, відзначимо, що вона має дві основні фундаментальні властивості:

- справжню багатопроцесорність, бо система здатна виконувати, як мінімум, десятки процесів, розподіляючи між ними фізичний час роботи;
- захищеність ресурсів, тому що базових механізмів такої системи вистачає, аби зберегти її цілісність, незалежно від особливостей перебігу того, чи іншого процесу; це дуже важливо, якщо йдеться про організацію режиму колективного використання її ресурсів.

Зауважимо, що користувацька паралельна програма являє собою набір процесів, що виконуються в різних лезах багатопроцесорної системи і певним чином можуть взаємодіяти між собою. Цей розділ дисертаційної роботи і буде спрямовано на висвітлення основних базових засобів організації такої взаємодії.

Особливість пропонованої багатопроцесорної системи полягає в тому, що майстер вузол *PM001* за допомогою віртуальних мереж *Net1* та *Net2* у зовнішніх і

хмарних з'єднаннях виконує процедуру завантаження даних про керування системою та її конфігурацію. При цьому її *slave*-вузли даних не накопичують. Кожен з них працює під керуванням копії операційної системи, завантаженої через мережевий інтерфейс *BOOTrom*.

Треба мати на увазі, що модульна багатопроцесорна система сконструйована на стандартній апаратній платформі. Це означає, що її ОС буде складатися здебільшого з готових стандартних програмних продуктів. При цьому зауважимо, що як на *master*-вузлі, так і на *slave*-вузлах можуть бути встановлені і власні локальні ОС *Linux*.

При цьому згадана ОС також включає і спеціалізовані комунікаційні бібліотеки. До того ж у ній застосовано базові засоби виконання паралельних програм. Функціонування багатопроцесорної системи забезпечено відповідні мережевим сервісом у вигляді таких серверів:

- *PAGP (Port Aggregation Protocol)*;
- *DNS (Domain Name System)*;
- *NFS (Network file system)*;
- *TFTP (Trivial File Trasfer Protocol)*;
- *NTP (Network Time Protocol)*;
- *DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)*;
- *SSH (Secure Shell)*.

Перелічені засоби підтримують роботу багатопроцесорного комплексу.

Налаштування мереж системи відбувається на етапі інсталяції ОС за допомогою консольних утиліт. При цьому, в каталозі */etc/sysconfig/networking-scripts* розміщено файли налаштування мережевих інтерфейсів. Лістинги таких файлів не наводяться, оскільки вони стандартні й подані в опису ОС.

Через сервер *DNS* іде налаштування комутаційної мережі багатопроцесорної системи, при цьому здійснюється перетворення імен її вузлів у *IP*-адреси.

Протокол передавання файлів у багатопроцесорній системі (*TFTP*) застосовується для завантаження *slave*-вузлів, оскільки вони бездисківі.

Автоматична роздача *IP*-адрес *slave*-вузлів виконується через протокол динамічної конфігурації *DHCP*. При цьому кожен вузол багатопроцесорної системи

з'єднано з *DHCP*-сервером. Саме через цей зв'язок призначаються параметри мережі, адреси шлюзу та *DNS*-серверів.

Зауважимо, що користувацькі програмні засоби зазвичай потребують обробки значних обсягів даних. При цьому необхідно забезпечити високу швидкодію обчислень. Принципова особливість пропонованої багатопроцесорної системи полягає в тому, що всі результати збору даних з пристроїв введення, їх обробка і передавання на пристрої виведення відбувається за допомогою процесорного модуля з інтерфейсом *TCA*. Крім того, збереження вказаних даних, з керуванням по локальній мережі, відбувається на жорсткому диску *SSD* з інтерфейсом *NVMe*. Такий підхід сприяє істотному підвищенню ефективності обчислень, а також розвантаженню при цьому *master*-вузла. Безпосередньо процес керування даними та їхнє переміщення із відповідних *slave*-вузлів виконується за допомогою мережевих адаптерів *HCA*.

Як бачимо, існує необхідність висвітлити питання щодо використання дискової пам'яті в пропонованій багатопроцесорній системі. Так, файли з певними вихідними даними та відповідними результатами розрахунків розміщуються у файлому сервері *NFS*. Такий сервер виконує процедуру передачі файлових систем або певних каталогів з тих чи інших бездискових *slave*-вузлів.

Нарешті, необхідно зауважити, що проектуючи багатопроцесорну систему, ставилася задача сконструювати швидкісні локальні мережі. За таких умов, замість обміну відповідними пакетами даних у комутаційній мережі багатопроцесорної системи необхідно забезпечити звернення відповідних серверів до засобів оперативної пам'яті певних її вузлів. Таким чином, виникає необхідність застосовувати принципи *RDMA*. Інакше кажучи, необхідно реалізувати прямий доступ до пам'яті певних процесорів за рахунок інтеграції в сучасні процесори технології прямого доступу до пам'яті. Застосування в багатопроцесорній системі принципів *RDMA* дає можливість практично уникнути затримок пересилання даних безпосередньо до адаптера системи. У цьому випадку для конструювання багатопроцесорного комплексу було задіяно процесор *Intel Core I5*, який використовує тип пам'яті *DDR4* з підтримкою технології *RDMA*, що дозволяє об'єднувати порти оперативної пам'яті до 4 каналів з частотою до 4 ГГц і обсягом до



128 Гігабайт ОЗУ. Зауважимо, що на основі принципу *RDMA* технології *InfiniBand* здійснюється процес прямого обміну необхідними даними між оперативною пам'яттю певних вузлів модульного комплексу, а це підвищує швидкодію обчислень і забезпечує підвищений доступ до пам'яті її обчислювальних лез. До того ж відбувається обмін даними між цими вузлами, при цьому завантаження системи *CPU* зменшується, так само, як і завантаження каналу, який проходить між згаданими вузлами обчислювальної системи. Зауважимо також, що в даній розробці сформовано програмний *RDMA*-код з підтримкою роботи стандартних технологій *API* (*Application Programming Interface*). Цей інтерфейс взаємодії відповідного програмного забезпечення узгоджується з вимогами технології *Infiniband*.

### 3.2. Обґрунтування програмування зв'язків між процесорами системи

Процес взаємодії між вузлами модульного комплексу відбувається через інтерфейс програмування (спеціалізованих бібліотек). Система зв'язку, своєю чергою, включає такі компоненти: програмний і апаратний. Перший з них включає дві базові методики передавання інформації, а саме:

- через розподілену пам'ять, коли синхронізація доступу гілок до такої пам'яті відбувається за допомогою так званих семафорів;
- у вигляді певних повідомлень.

Перший із наведених методів програмування міжпроцесних зв'язків – базовий для технології *SMP* та однопроцесорних комп'ютерів. Функції, пов'язані з роботою з *Shared memory* (*SHM*), входять безпосередньо у склад кожної багатозадачної ОС. Безпосередньо для одного комп'ютера засоби міжпроцесових комунікацій реалізуються за допомогою команди *SHM*.

Другий із названих методів програмування міжпроцесних зв'язків типовий для мереж різних типів. Тут взаємозв'язок між вузлами кластера відбувається за допомогою інтерфейсу програмування *MPI* (*Message Passing Interface*) [63]. *MPI* являє собою технологію створення паралельних програм,

яка оснований на передачі певних повідомлень між процесами системи (самі ж процеси можуть бути виконані як на деякому одному, так і на інших різних вузлах). Технологія *MPI* є типовим прикладом імперативної (коли діє принцип повного управління програмістом заданою послідовністю виконання обчислень, а також розподілом даних і обміном необхідної інформації між процесами) технології утворення програмного матеріалу для паралельного виконання.

Кожна модель передання даних має певні свої переваги та недоліки. Виконаємо їхній аналіз. Переваги методу *shared memory (SHM)* у порівнянні з технологією *MPI* слід відзначити таким чином. У моделі зі спільною пам'яттю спільно використовувані дані зберігаються тільки в одному примірнику і не створюються локальні копії для кожних гілок додатка. А ті гілки, що працюють з вказаними даними, потребують незначний час для синхронізації доступу до них, і в такому випадку співвідношення між швидкостями комунікацій і обчислень зазначеної моделі (зі спільною пам'яттю) буде вищою, ніж в тій, що передбачає передачу повідомлень. Отже, коло задач, орієнтованих для розпаралелювання, в зазначеній технології *SHM* буде дещо ширше, ніж у моделі *MPI*.

Одночасно певні програмісти відмічають, що з огляду на параметр швидкості передання даних модель *MPI* не гірша від технології *SHM*. Це викликано такими причинами:

– у гарно розпаралелюваному додатку операції для взаємодії між гілками (процес пересилання даних і їхню синхронізацію) буде витратитися небагато часу, усього декілька відсотків від загальної тривалості роботи; таким чином, уповільнення процесу пересилань, наприклад, удвічі ще не означає такого загального зменшення продуктивності обчислень, адже вона знизиться всього на декілька відсотків, що цілком можна вважати припустимим;

– засоби, якими оснащена технологія *MPI* (так звані асинхронні та перманентні комунікації) і передусім в *MPI-2* (віддалений процес доступу до пам'яті), надають швидкість передання даних, порівнянну із швидкістю, передбачену в моделі *SHM*.

Принагідно зауважимо, що на думку деяких програмістів, мають місце також і інакші властивості технології *MPI*, які визначають її більш доцільною у порівнянні з моделлю *SHMA* саме:

- відомо, що всі можливі реалізації технології *SHM* не здатні переноситись за межі *SMP*-машин, або виявляються недостатньо ефективними і поширеними;
- витрати на обчислення і комунікації в *SMP*-машинах знижуються повільніше, чим в *MPP*-системах і мережах;
- спосіб обміну даними через певні повідомлення характеризується дещо більшою наочністю, з цих причин він достатньо зручний для програміста;
- моделі *SHM* у порівнянні з технології *MPI*, як правило, здатні виконувати тільки найбільш базові операції.

Отже, технологія програмування *MPI*, перш за все, сприяє скороченню розриву в швидкості виконання програм, а з іншого боку веде до збільшення тривалості їхнього написання. Аналіз вибору ОС для вузлів обчислювального кластера та розгляд технології програмування *MPI* буде відображено в подальшому матеріалі даного розділу.

Створення комплексу програм для роботи обчислювального кластера можна розділити на два основні фази:

- послідовний алгоритм роботи піддають декомпозиції (процесу розпаралелювання), тобто відповідним чином розбивають на декілька незалежно працюючих гілок; для взаємодії між ними вводять дві додаткові операції: приймання та передання даних;
- розпаралелений алгоритм подають у вигляді коду, у якому операції приймання та передання даних виражаються через застосування термінів деякої конкретної системи, що забезпечує зв'язок між його гілками.

Особливості процесу алгоритмізації деяких додатків детально буде висвітлено у подальших розділах дисертаційної роботи.

### 3.3. Розробка програмного забезпечення системної агрегації багатоканальних мережевих інтерфейсів модульного комплексу

На першому етапі процесу агрегації розглянемо основні особливості реалізації мережевого інтерфейсу багатопроцесорного комплексу в застосуванні до технології *channel bonding*. Для цього виконаємо постановку задачі, згідно якої в багатопроцесорній системі наявні чотири двопортові мережеві адаптери: *IB1*, *IB2*, *IB3* та *IB4* (рис. 2.4). Такі адаптери необхідно об'єднати в один псевдоадаптер *bond0*. Унаслідок цих дій багатопроцесорна система починає розпізнавати усі агреговані мережеві адаптери як один. Це, в свою чергу, означає, що такі адаптери повинні налаштуватися на одну *MAC*-адресу. Віддалені сервери повинні теж сприймати їх як один єдиний пристрій. Зрозуміло, що псевдоадаптер *bond0* теж налаштується на одну *IP*-адресу. За таких умов будь-які програмні засоби повинні звертатися до такого пристрою як до одного звичайного мережевого адаптера, швидкість передавання даних якого вдвічі вища. У протоколах, що задіяні для агрегації мережевого інтерфейсу, необхідно визначатися, які порти буде використано для вихідного трафіка, а які – прийматимуть вхідний трафік.

Отже, розглянемо особливості зв'язування декількох мережевих адаптерів. При цьому основні налаштування будемо виконувати для *master*-вузла системи. Налаштування решти вузлів буде відбуватися аналогічно.

З огляду на особливості поставленої задачі щодо зв'язування каналів, визначимося з вимогами, яким мають відповідати апаратні та програмні ресурси багатопроцесорної системи. По-перше, як мінімум, реалізація технології *channel bonding* передбачає наявність двох фізичних підмереж. По-друге, для зв'язування певних мережевих карт в один канал (створення однієї віртуальної карти) виникає необхідність скомпілювати ядро ОС з умовою підтримки режиму роботи *channel bonding* або завантажити в ОС модуль ядра *bonding.o*. По-третє, конфігурація об'єднаного каналу потребує використання стандартної команди *ifconfig* або додаткової команди *ifenslave*. Зауважимо, що програма *ifenslave* дає можливість

копіювати налаштування одного інтерфейсу, та поширити його дію на решту інтерфейсів багатопроцесорної системи.

Зауважимо, що в пропонованій модульній системі, що розглядається в дисертаційній роботі, діє режим об'єднання двох підмереж в один віртуальний канал. Завершення роботи мережевих інтерфейсів для даної системи відбувається після команди `/etc/rc.d/init.d/network stop`.

Отже, перейдемо безпосередньо до розгляду конфігурації зв'язаного каналу. На першому етапі вносять зміни у файл `/etc/modules.conf`, додавши в нього команду

```
alias bond0 bonding
```

Завдяки цій команді системі повідомляється про необхідність завантаження модуля `bonding.o`, який ідентифікують, подавши команду `bond0`.

Наступна операція являє собою звернення до модуля `modprobe bonding`, аби уникнути перезавантаження системи.

Далі в каталозі `/etc/sysconfig/network-scripts` виконують перейменування файлу, що описує перший інтерфейс `ifcfg-ib1`, у `ifcfg-bond0` наступним чином:

```
cp ifcfg-ib1 ifcfg-bond0
```

Отже, на цьому етапі формується файл `ifcfg-bond0`, зміст якого необхідно звести до такого вигляду:

```
DEVICE=bond0
IPADDR=192.168.1.1
NETMASK=255.255.0.0
NETWORK=192.168.0.0
BROADCAST=192.168.2.255
ONBOOT=yes
BOOTPROTO=none
USERCTL=no
```

Аналіз такого файлу показує, що користувачу необхідно вказати певні, особисті дані: IP-адресу, маску, адресу мережі. В цьому файлі також подають певну інформацію, яка використовується для зв'язування каналів модульної багатопроесорної системи, що розглядається в дисертаційній роботі. Окремо зауважимо особливість внесення змін у згаданий файл. Як видно, у ньому не виділяються окремі рядки, а тільки вносяться відповідні зміни.

Отже, на цьому етапі відзначимо, що у файл опису віртуального мережевого інтерфейсу внесено певні зміни з метою його коригування.

Наступний крок полягає у створенні файлів з описом реальних фізичних інтерфейсів *ib1*, *ib2*, *ib3* та *ib4*. Ці файли відображають їхню належність до зв'язаного каналу.

Тоді файли конфігурації інтерфейсів багатопроесорної системи мають описане нище змістове наповнення:

Файл *ifcfg – ib1*:

```
DEVICE=ib1
IPADDR=192.168.2.1
NETMASK=255.255.0.0
NETWORK=192.168.0.0
BROADCAST=192.168.2.255ONBOOT=yes
BOOTPROTO=none
USERCTL=no
```

Файл *ifcfg – ib2*:

```
DEVICE=ib2
IPADDR=192.168.2.2
NETMASK=255.255.0.0
```

```
NETWORK=192.168.0.0  
BROADCAST=192.168.2.255  
ONBOOT=yes  
BOOTPROTO=none  
USERCTL=no
```

Файл ifcfg – ib3:

```
DEVICE=ib3  
IPADDR=192.168.2.3  
NETMASK=255.255.0.0  
NETWORK=192.168.0.0  
BROADCAST=192.168.2.255  
ONBOOT=yes  
BOOTPROTO=none  
USERCTL=no
```

Файл ifcfg – ib4:

```
DEVICE=ib4  
IPADDR=192.168.2.4  
NETMASK=255.255.0.0  
NETWORK=192.168.0.0  
BROADCAST=192.168.2.255  
ONBOOT=yes  
BOOTPROTO=none  
USERCTL=no
```

Наступний етап роботи над конфігурацією зв'язаного каналу полягає в ініціалізації мережевого інтерфейсу. Для цього застосовують команди

```
/etc/rc.d/init.d/network start
```

Далі відзначимо деяку особливість конфігурації мережевого інтерфейсу. За умови, коли дистрибутив системи не передбачає використання нотифікації *master/slave*, то інтерфейс зв'язаного каналу запускають вручну після виконання таких команд:

```
/sbin/ifconfig bond0 192.168.1.1 up netmask 255.255.0.0
```

```
/sbin/ifenslave bond0 ib0
```

```
/sbin/ifenslave bond0 ib1
```

```
/sbin/ifenslave bond0 ib2
```

```
/sbin/ifenslave bond0 ib3
```

```
/sbin/ifenslave bond0 ib4
```

Аби кожного разу для роботи різних вузлів багатопроцесорної системи не довелось вмонтовувати вручну перелічені команди, рекомендують записати їх у який-небудь *startup*-скрипт (це може бути `/etc/rc.d/rc.local`), або замінити ними відповідальну за ініціалізацію мережевого інтерфейсу частину скрипту `/etc/rc.d/init.d/network`.

Унаслідок проведених операцій було скомпільовано файл, який необхідно скопіювати в теку `/usr/sbin`.

Коли виникає необхідність, щоб усі мережеві драйвери ініціалізували завантаження *bonding*-драйверів, то необхідно додати такий запис

```
probeall bond0 ib1 ib2 ib3 ib4 ibbonding
```



до файлу `/etc/modules.conf`. Така інструкція дає вказівку системі про те, що в разі ініціалізації інтерфейсу `bond0` утиліта `modprobe` на першому етапі завантажує драйвери всіх мережевих інтерфейсів.

На цьому, налаштування функцій технології `channel bonding` завершується. Для перевірки правильності ініціалізації мережевого інтерфейсу можна скористатися командою `ifconfig`. Така команда запускається на виконання без уведення параметрів. При цьому на екрані терміналу з'являються такі повідомлення:

```
[root]# /sbin/ifconfig
```

```
bond0  Link encap: InfiniBand  HWaddr 00: C0 : F0 :1 F :37: B4
        net addr :192.168.1.1 Bcast :192.168.2.255  Mask :255.255.0.0
        UP BROADCAST RUNNING MASTER MULTICAST  MTU :1500  MEtrIc :1
        RX packets :7224794 errors :0 dropped :0 overruns :0 frame :0
        TX packets :3286647 errors :1 dropped :0 overruns :1 frame :0
        collisions :0 txqueuelen :0

ib1    Link encap: InfiniBand  HWaddr 00: C0 : F0 :1 F :37: B4
        inet addr :192.168.2.1  Bcast :192.168.2.255  Mask :255.255.0.0
        UP BROADCAST RUNNING SLAVE MULTICAST  MTU :1500  MEtrIc :1
        RX packets :7224794 errors :0 dropped :0 overruns :0 frame :0
        TX packets :3286647 errors :1 dropped :0 overruns :1 carrier :0
        collisions :0 txqueuelen :100
        Interrupt :10 Base address :0 x1080

Ib2    Link encap: InfiniBand  HWaddr 00: C0 : F0 :1 F :37: B5
        inet addr :192.168.2.2  Bcast :192.168.2.255  Mask :255.255.0.0
        UP BROADCAST RUNNING SLAVE MULTICAST  MTU :1500  MEtrIc :1
        RX packets :7224794 errors :0 dropped :0 overruns :0 frame :0
        TX packets :3286647 errors :1 dropped :0 overruns :1 carrier :0
        collisions :0 txqueuelen :100
```

Interrupt :9 Base address :0 x1400

Ib3 Link encap: InfiniBand HWaddr 00: C0 : F0 :1 F :37: B6  
 inet addr :192.168.2.3 Bcast :192.168.2.255 Mask :255.255.0.0  
 UP BROADCAST RUNNING SLAVE MULTICAST MTU :1500 MEtrIc :1  
 RX packets :7224794 errors :0 dropped :0 overruns :0 frame :0  
 TX packets :3286647 errors :1 dropped :0 overruns :1 carrier :0  
 collisions :0 txqueuelen :100  
 Interrupt :9 Base address :0 x1400

Ib4 Link encap: InfiniBand HWaddr 00: C0 : F0 :1 F :37: B7  
 inet addr :192.168.2.4 Bcast :192.168.2.255 Mask :255.255.0.0  
 UP BROADCAST RUNNING SLAVE MULTICAST MTU :1500 MEtrIc :1  
 RX packets :7224794 errors :0 dropped :0 overruns :0 frame :0  
 TX packets :3286647 errors :1 dropped :0 overruns :1 carrier :0  
 collisions :0 txqueuelen :100  
 Interrupt :9 Base address :0 x1400

lo Link encap: Local Looppback  
 inet addr :127.0.0.1 Mask :255.0.0.0  
 UP LOOPBACK RUNNING MTU :1500 MEtrIc :1  
 RX packets :1110 errors :0 dropped :0 overruns :0 frame :0  
 TX packets :1110 errors :0 dropped :0 overruns :0 frame :0  
 collisions :0 txqueuelen :0

Отже, для зв'язаного каналу процес його конфігурації пройшов успішно. Необхідно при цьому звернути увагу на те, що для всіх мережевих інтерфейсів *IP*- і *MAC*-адреси вийшли однаковими.

Проте необхідно зауважити, що далі потрібно виконати налаштування режиму *Link Aggrigation*, аби узгодити роботу відповідного обладнання мережевого інтерфейсу багатопроцесорного комплексу.

### **3.4. Особливості програмного налаштування та функціонування модульної багатопроцесорної системи**

Розглянемо, яким чином виконують програмне налаштування модульної багатопроцесорної системи та як вона функціонує. Для цього необхідно розкрити певні передумови здійснення. По-перше, модульний комплекс будемо трактувати, як обчислювальну систему, що функціонує в монокористувацькому режимі. По-друге, використовуючи відповідні сервери та протоколи для процедури розрахунків відповідно до користувацького програмного забезпечення виникає потреба визначення методів адміністрування модульного комплексу, обробки файлової системи, завантаження тих чи інших програмних продуктів. До того ж необхідно звертати увагу на питання безпеки функціонування системи в цілому. По-третє, необхідно мати на увазі, що користувацьке й системне програмне забезпечення може породжувати протиріччя з відповідними командами та установками. По-четверте, користувацьке прикладне програмне забезпечення необхідно розглядати як набір процесів, які повинні оброблятися у певних обчислювальних *slave*-вузлах модульного комплексу. Звісно, що такі процеси повинні певним чином взаємодіяти між собою.

Висвітлимо більш детально проблеми взаємодію процесів у різних вузлах кластера. Операційна система *Linux* має у своєму розпорядженні різноманітне програмне забезпечення, аби мати можливість виконання команд від імені іншого користувача та на іншому лезі системи через її комутаційну мережу. Для цього проаналізуємо два протоколи: *RSH (Remote Shell)* – протокол, завдяки якому можна підключатися до пристрою віддалено і виконувати на ньому певні команди й протокол *SSH (Secure Shell)*. Зауважу, що протокол *SSH* трактується як безпечна оболонка і він являє собою спеціальний засіб для передання даних у безпечному

режимі. Завдяки своїм характеристикам він отримав широке розповсюдження для віддаленого управління комп'ютерами і пристроями у мережі.

Виконаємо порівняльний аналіз таких протоколів. Так, протокол *SSH* передбачає шифрування ключів для входу в систему без пароля. Зокрема у вузлі *A* створюють пару ключів: загальнодоступний і закритий. Відкритий ключ передається вузлу *B*, а потім, коли вузол *A* підключається до *B*, то вузол *B* випадковим чином генерує число для шифрування за допомогою відкритого ключа, наданого вузлом *A*. Цей ключ відправляє зашифроване число у вузол *A*, який після використання закритого ключа розшифровується. Розшифроване число передається у вузол *B* і перевіряється на збіг із числом, яке було згенероване на початку процедури. Після чого вузлу *A* буде дозволено увійти в систему. Як показує результат аналізу використання протоколу *SSH* безпечніше, ніж застосування *RSH*. Клієнт *OpenSSH* встановлюється у більшості дистрибутивів системи *Linux* за замовчуванням. Але якщо цього не зроблено, то його можна встановити за допомогою диспетчера пакетів поширення. Аби скористатись командою *ssh*, необхідно відкрити термінал або *PowerShell* та ввести назву цієї команди, а потім ім'я віддаленого хоста. У процесі керування багатопроцесорною системою на віддаленому терміналі *A* з'являється запит до *master-вузла* після подання такої команди:

```
ssh ім'я користувача@адреса сервера
```

```
ssh -v user@192.168.1.1/home/mydir
```

Проте, приймаючи до уваги, що багатопроцесорна система являє собою частково замкнуту систему, то можливо застосовувати в її роботі протокол *RSH*.

Розглянемо загальні принципи такого застосування. Протокол *RSH* є консольним. У зв'язку з цим, в процесі керування багатопроцесорною системою у вузлі *A* (зазвичай це *master-вузол*) вводять таку команду:

```
rsh B Is -alF /home/mydir
```

Після цього на монітор виводиться інформація про виконання команди *Is alf home mydir*, яку було оброблено у вузлі *B*. Отже, наведений приклад ілюструє ту обставину, що команда *Is* буде виконуватися у вузлі *B* як деякий процес. Це

означатиме тиражування певних обчислювальних гілок за алгоритмом паралельної програми, що будуть діяти у певних вузлах багатопроцесорної системи.

Враховуючи наведені міркування, робимо висновок, що виконання протоколу *RSH* потребує уведення певної системи авторизації. Це означає, що повинна зберігатися інформація про відповідні вузли багатопроцесорної системи, про належність певних процесів користувачам, про повноваження, які надані цьому протоколу.

На даному етапі висвітлення процесів взаємодії між вузлами кластера виникає необхідність сформулювати певні принципи реалізації віддаленого доступу до них. По-перше, як показав аналіз протоколу *RSH*, права доступу до вузлів системи задаються в тому з них, до якого буде відкрити цей доступ. По-друге, усілякі права доступу формуються через конфігураційні файли.

З іншого боку, з огляду на стандартну процедуру [60, 64] виконують також налаштування відповідних *slave*-вузлів. Підкреслимо тільки деякі певні особливості такої процедури. Перед її використанням створюють каталог */diskless/snapshot*. У цьому каталозі будуть записані необхідні змінювані файли, тому для *slave*-вузлів він буде виступати як кореневий */diskless/root*. Отже, для налаштування *slave*-вузлів модульного комплексу необхідно за допомогою команди *rsync* виконати копіювання кореневої файлової системи таким чином:

```
rsync -a -e //diskless/root/
```

Розкриті проблеми взаємодії процесів у різних вузлах модульного комплексу дають змогу зрозуміти можливості віддаленого доступу до файлової системи. Заздалегідь підкреслимо, що паралельні програми, які потребують значної швидкодії, обробляють зазвичай значні обсяги даних. Очевидно, що такі дані зберігаються на дисках. При цьому доступ до них має бути забезпечено стосовно всіх вузлів кластера.

При цьому організувати доступ усіх лез системи до єдиного сховища файлів є основним завданням комунікаційного середовища.

Отже, маємо дослідити режими застосування дискової пам'яті в проектованій багатопроесорній системі. У цьому середовищі файли з вихідними даними і результатами обчислень за паралельною програмою знаходяться на єдиному файловому сервері. Відзначимо, що роль такого сервера може виконувати як деяке лезо кластера, так і окремий серверний комп'ютер. Аби організувати доступ до згаданих файлів зі сторони лез, використовують стандартні прийоми мережевого доступу до віддалених файлових систем. Наприклад, виконання таких функцій передбачено в протоколі *NFS*.

Основна перевага такого доступу полягає в простоті його використання. Дійсно, легко конфігурувати можливості протоколу *NFS* так, щоб шляхи до домашніх директорій користувачів на керуючому комп'ютері та на кожному з лез збігалися. Тоді, готуючи програми і дані на керуючому комп'ютері або лезі, користувач не повинен замислюватися над тим, як гілка паралельної програми «добирається» до них на будь-якому з лез, оскільки шляхи до всіх призначених для користувача файлів на всіх лезах збігаються автоматично. Зауважимо, що тут теж працюють схеми авторизації: користувач сам вирішує, яким лезам надати доступ до власних дисків.

Далі, розглянемо ті базові механізми ОС, завдяки яким відбувається обмін повідомленнями між відповідними процесами. Віддалене виконання команд у поєднанні з віддаленим доступом до файлової системи вирішує усі «організаційні» проблеми функціонування модульної системи: наприклад, підготувавши програми і дані на керуючому комп'ютері або на лезі, можна зробити його файлову систему доступною для всіх лез за допомогою протоколу *NFS* і запустити гілки паралельної програми на лезах через команди *rsh* чи *ssh*.

Але при цьому необхідно пояснити, як запущені таким чином процеси будуть відшуковувати необхідні дані, розташовані на інших лезах. З точки зору прикладного програміста тут все стає очевидним. Пошук такої взаємодії відбувається шляхом звернення до функцій деякої комунікаційної бібліотеки (її особливості описано в

даному розділі роботи). І тут будуть вартими уваги ті базові механізми ОС, що дають можливість скористатись цією бібліотекою.

Для цієї мети в пропонованому модульному комплексі застосовуються стандартні протоколи взаємодії між процесами в мережевому варіанті на базі системи *BSD sockets*. Такий набір системних можливостей дозволяє задіяти ті функції, що необхідні для роботи в комунікаційній бібліотеці. У бібліотеці команд, що використовується в системі, передавання даних здійснюється за допомогою протоколу *TCP/IP*.

Зауважимо, що організація обміну повідомленнями поміж процесами паралельної програми зумовлює особливо високі вимоги до ефективності таких операцій. Адже саме ефективність операцій обміну повідомленнями може зумовлювати швидкісний вигравш від паралельного виконання програми порівняно з традиційним (однопроцесним) варіантом. У зв'язку з цим підкреслимо, що правильний вибір апаратного та програмного забезпечення комунікаційної мережі кластерної системи є найбільш складною і відповідальною частиною її розробки.

Безпосередньо основні принципи функціонування модульної багатопроцесорної системи проілюструємо в аспекті використання спеціалізованого програмного забезпечення. Для цього розглянемо її блок-схему, яка подана на рис. 3.1.

У цій системі після подання сигналу *PUSK* (блок 1) з панелі керування майстер-вузла (*PM001*) здійснюється його електричне живлення за допомогою відповідного блока живлення (*ATXm*). Далі починається процес запуску та ініціалізації майстер-вузла (*PM001*) (блок 2) модульного комплексу. Система передбачає два режими завантаження ОС, а саме: з жорсткого диска або від певного зовнішнього носія (блоки 3, 11).

Згідно з призначенням унікальних динамічних *IP*-адрес та відповідних локальних мереж за умовчуванням завантаження лез системи йде через спеціальний конфігураційний скрипт.

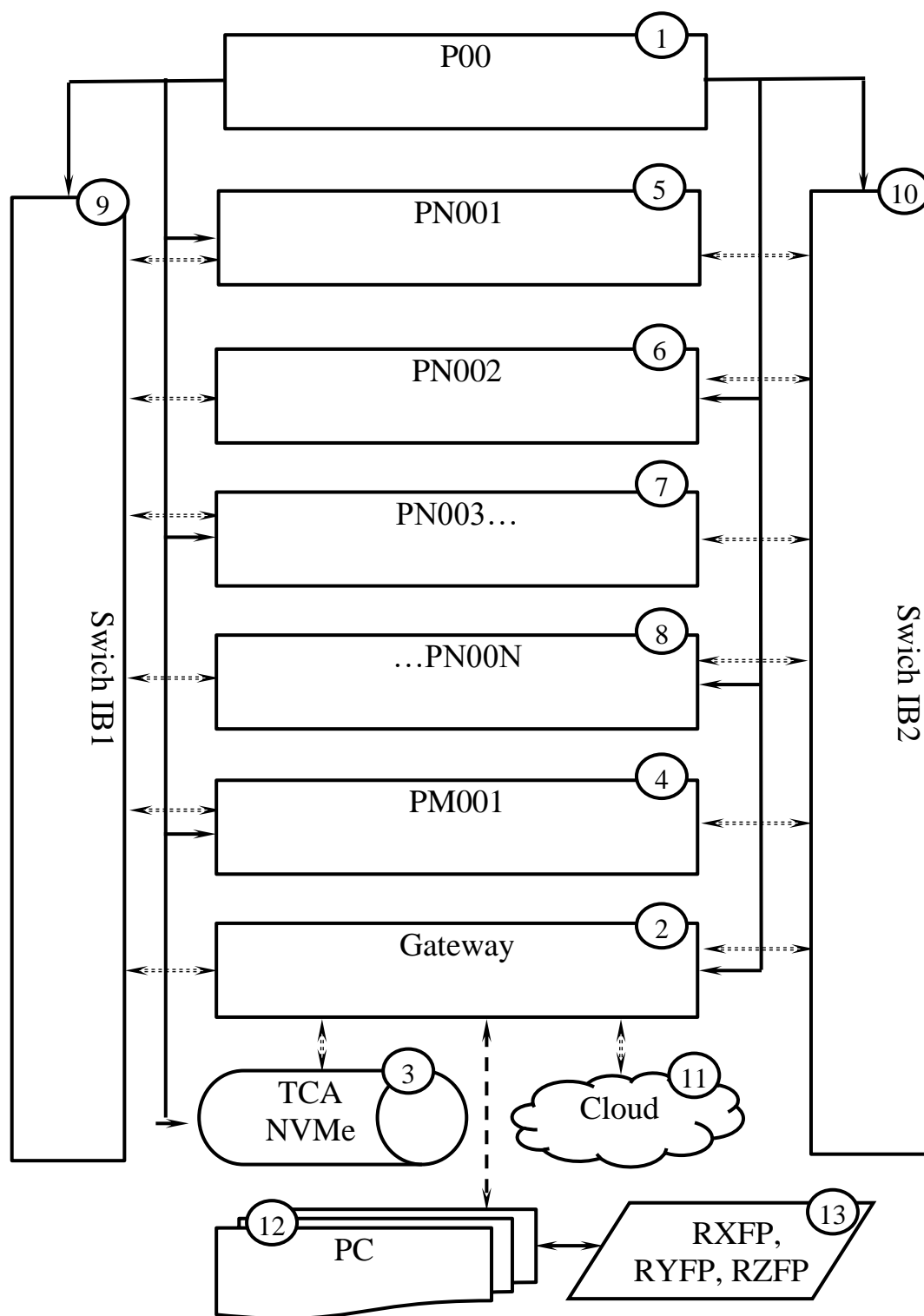


Рис. 3.1. Блок-схема работы модуля багатопроцесорного комплексу



Він запускається відразу після початку роботи операційної системи. Крім того, цей скрипт виконує налаштування *DHCP*-сервера в цілому. Саме на цьому етапі роботи системи призначається кількість *slave*-вузлів в обчислювальній системі (*PN001*, *PN002*, *PN003*, ..., *PN00N*) (блоки 5 – 8), а за необхідності виконується налаштування доступу до зовнішніх мереж або до середовища Інтернету. Своєю чергою завантаження ОС у згаданих *slave*-вузлах (*PN001*, *PN002*, *PN003*, ..., *PN00N*) (блоки 5 – 8) відбувається шляхом подачі до них відповідного електроживлення з блоків (*ATX1* – *ATXN*). Після виконання перелічених операцій конфігураційний скрипт завершує свою роботу, а обчислювальна система буде готова до здійснення своїх функцій.

Завдяки роботі гібридного шлюзу (*SkyWay IB3*) (блок 2) формується локальна мережа *Net1*, засобами якої майстер-вузол (*PM001*) (блок 4) здійснює процес керування, діагностику й уведення певних умов обчислювальних задач. Далі, *slave*-вузли (блоки 5 – 8) проводять певні обчислення відповідно до алгоритму розв'язування тієї чи іншої прикладної задачі.

Аби багатопроцесорна обчислювальна система працювала з максимальною ефективністю, реконфігурація структури її мережевого інтерфейсу повинна бути пристосована відповідно до специфіки прикладних задач.

Далі розглянемо певні особливості роботи у системі *master*-вузла та *slave*-вузлів. Майстер-вузол (*PM001*) (блок 4) через гібридний шлюз (*SkyWay IB3*) (блок 2) забезпечує спрямування потоку даних, що пов'язані з керуванням та діагностикою системи. При цьому *slave*-вузли (блоки 5 – 8) відповідно до алгоритму користувацьких задач і перебігу обчислювальних процесів виконують необхідні обчислення. Обмін даними між обчислювальними вузлами та із завантаженням умов користувацьких задач винесено в окремі комунікаційні мережі, створені за допомогою керованих комутаторів *Swith IB1* (блок 9) та *Swith IB2* (блок 10). Для досягнення максимальної продуктивності роботи системи використовуються двопортові адаптери *Infiniband*, а також виконується процес реконфігурації структури мережевого інтерфейсу (на рис. 2.19 показано пунктирними лініями) відповідно до специфіки прикладних задач. Результати проміжних і кінцевих обчислень

отримуються за допомогою модуля *TCA* з інтерфейсом *NVMe* та *SSD* і передаються через гібридний шлюз (*SkyWay IB3*) (блок 2) у блок 15 і потім у блок 16 для їх остаточного формування. Своєю чергою керування та переспрямування відповідних розрахункових даних від *slave*-вузлів виконується за допомогою мережевих адаптерів *MHQN29C-XTR*.

### 3.5. Висновки до розділу 3

В даному розділі дисертаційної роботи охарактеризовано розробка, використання й налаштування системного програмного забезпечення модульної багатопроесорної системи. Для її функціонування застосовують ОС *Linux*. Таку ОС на сьогодні вважають умовно безкоштовною, при цьому вона зосереджує в собі весь набір необхідних інструментів для модульних комплексів. З іншого боку зауважимо, що середовище *MS Windows*, яке на сьогодні є найбільш поширеною, могло б стати альтернативою згаданій ОС. Проте така ОС орієнтована саме на безпосереднє спілкування користувача з машиною. При цьому, аналізуючи системні механізми, які застосовуються переважно в роботі модульних комплексів, можна дійти висновку, якраз втручання користувача в роботу вузла багатопроесорної системи недоречне.

Відзначається, що деякі програми, що не входять у ядро ОС, буде виконуватися під її керуванням, як процес. У роботі модульної установки процес можна трактувати як процедуру виконання програми за допомогою окремого процесора багатопроесорного комплексу.

Було визначено особливість даної багатопроесорної системи, у якій майстер-вузол *PM001* за допомогою віртуальних мереж *Net1* та *Net2* зовнішніх і хмарних з'єднань виконує процедуру завантаження даних про керування її роботою та про встановленню конфігурації. В той же час *slave*-вузли системи на накопичують дані. Тоді стає зрозумілим, що кожне лезо модульної установки функціонує під керуванням стандартної операційної системи. Потужність кожного вузла, так само як і їхній набір у модулі можуть бути різними. Але в дисертаційній роботі було спроектовано однорідний кластер, взаємодія між вузлами якого відбувається за

допомогою використання засобів спеціалізованих бібліотек з потрібними функціями. Програмним інструментарієм для паралельних обчислень було обрано стандарт *MPI* з відкритою базовою реалізацією типу *mpich-1*.

Зауважимо, що користувацькі програмні засоби зазвичай мають обробляти значні обсяги даних. При цьому необхідно забезпечити високу швидкість обчислень. Принципова особливість запропонованої багатопроцесорної системи полягає в тому, що всі дані, зібрані з пристроїв уведення, їх обробка і переміщення на пристрої виведення у вигляді відповідної інформації виконує процесорний модуль з інтерфейсом *TCA*. До того ж, збереження цих даних та керування ними в локальній мережі відбувається на жорсткому диску *SSD* з інтерфейсом *NVMe*. Звісно, що це сприяє істотному підвищенню ефективності обчислень та зменшенню навантаження на *master*-вузол. Безпосередньо процес керування та передавання даних із відповідних *slave*-вузлів здійснюється засобами мережевих адаптерів типу *HCA*.

При цьому виникла необхідність дослідити використання в багатопроцесорній системі дискової пам'яті. Було встановлено, що файли з певними вихідними даними та відповідними результатами розрахунків розміщуються в файловому сервері *NFS*. Такий сервер виконує процедуру передачі файлових систем або певних каталогів відповідно з бездискових *slave*-вузлів.

Нарешті, необхідно відзначити, що в процесі конструювання модульної системи мали на меті створити швидкісні локальні мережі. Тоді стало можливим, замість обміну відповідних пакетів засобами комутаційної мережі кластера відповідні сервери мають звертатися до оперативної пам'яті певних її вузлів. Цим було підтверджено необхідність застосовувати принципи стандарту *RDMA*. У даному розділі роботи розроблено спосіб, який висвітлює прямий доступ до пам'яті певних процесорів за рахунок їхньої інтеграції в сучасні процесори, що реалізують таку технологію. І тут стає в пригоді дія принципів *RDMA*, що дає можливість практично уникнути затримок пересилання даних безпосередньо до адаптера системи. Тоді для конструювання багатопроцесорного комплексу було обрано процесор *Intel Core I5*, що має використовувати тип пам'яті *DDR4* і підтримує принципи роботи *RDMA*, а це дозволяє об'єднання портів оперативної пам'яті до 4 каналів з частотою кожного з

них до 4 ГГц і обсягом пам'яті до 128 Гб ОЗУ. Було встановлено, що керуючись принципом *RDMA* технології *InfiniBand*, вдалось здійснити операцію прямого обміну даними між оперативною пам'яттю наявних вузлів багатопроцесорного комплексу, а це підвищує швидкодію обчислень і забезпечує швидкісний доступ до пам'яті обчислювальних вузлів комплексу, а також відбувається обмін даними між ними, розвантажуючи систему *CPU* і знижуючи завантаження каналу, який проходить між вузлами обчислювальної системи.

Додатково саме в цей розділ дисертаційної роботи спрямовано на висвітлення питання системної агрегації багатоканального мережевого інтерфейсу модульного комплексу. Зокрема розглянуто особливості його реалізації за допомогою технології *channel bonding*. Встановлено, що в багатопроцесорній системі наявні чотири двопортові мережеві адаптери: *IB1*, *IB2*, *IB3* та *IB4*. При цьому описано детальну методіку об'єднання цих адаптерів в один псевдоадаптер *bond0*. За таких умов було зроблено висновок, що багатопроцесорна система розпізнає такі агреговані мережеві адаптери як один об'єкт. Стало відомо, що такі адаптери мають налаштувати свою роботу на одну *MAC*-адресу. А віддалені сервери почали теж сприймати їх як один єдиний пристрій. Тоді вияснилось, що псевдоадаптер *bond0* налаштується на одну певну *IP*-адресу. В описаних умовах будь-які програмні засоби звертаються до такого пристрою як до одного звичайного мережевого адаптера, швидкість передачі даних якого вдвічі вища.

Крім усього іншого, цей розділ дисертаційної роботи зосереджує в собі характеристику програмного налаштування та функціонування модульної багатопроцесорної системи. При цьому детально висвітлюється взаємодія процесів у різних її вузлах. Було відзначено, що операційна система *Linux* має у своєму складі різноманітне програмне забезпечення аби створювати можливість виконання команди від імені іншого користувача та на іншому лезі установки через її комутаційну мережу. У зв'язку з цим було проаналізовано дію двох протоколів: *RSH* (*Remote Shell*) – той, що дозволяє підключатися віддалено до пристрою і виконувати на ньому певні команди та протокол *SSH* (*Secure Shell*). Виконано порівняльний аналіз таких протоколів. Беручи до уваги, що багатопроцесорна система являє собою

замкнуту систему, то було визнано доцільність запровадження протоколу *RSH*. Розкрито загальні принципи його дії в запропонованій багатопроцесорній системі.

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

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДУЛЬНОЇ СИСТЕМИ В РЕЖИМІ БАГАТОВИМІРНОЇ АГРЕГАЦІЇ КАНАЛІВ ЇЇ МЕРЕЖЕВИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

Одночасно з розробкою багатопроцесорних систем виникає проблема оцінити їхню швидкодю, продуктивність, ефективність функціонування і надалі порівняти схожі обчислювальні системи, враховуючи ці параметри [65 – 69]. Відомо, ефективність паралелізації обчислень залежить від декількох чинників, з яких один з найважливіших – це особливості пересилання даних між вузлами обчислювального комплексу [70, 71, 72]. Вказаний чинник ефективності паралелізації є самою повільною частиною обчислювального алгоритму, тому це може звести внівець процес збільшення числа задіяних у роботі процесорів. Наведені проблеми є визначальні для процедури моделювання широкого класу задач за допомогою модульних багатопроцесорних комплексів.

Зауважу, що нині не отримали відповідного розвитку дослідження (або взагалі вони відсутні), присвячені дослідженню впливу агрегованих мережеских інтерфейсів модульних систем на показники їхньої ефективності. Отже, важливим чинником ефективності функціонування згаданих систем є питання вибору, конструювання та організації їхніх мережеских інтерфейсів. З цих позицій і будемо оцінювати ефективність названих засобів, які досліджується в дисертації.

#### **4.1. Особливості впливу комунікаційних технологій на ефективність багатопроцесорних систем**

Із самого початку процесу досліджень було поставлено завдання зменшити час обчислень за рахунок збільшення числа вузлів у кластерній системі [8 – 13, 39, 73]. При цьому допустимо, що обчислення розподіляються рівномірно між усіма вузлами пропонованої системи. Окремо помітимо, що в модульних комплексах упродовж

кожної ітерації між процесорами йде обмін даними на стиках обчислювальних областей, використовуючи актуальні значення змінних. Саме тому потрібно розглядати особливості пересилання даних між вузлами модульної установки. В даному випадку зазвичай порівнюються варіанти одностороннього й двостороннього режимів передачі даних між процесорами модуля. Очевидно, що двосторонній режим зумовлює уповільнення обчислень у системі через збільшення часу обміну відповідними даними поміж її вузлами.

З огляду на описані обставини, необхідно вказати важливість дослідження показників ефективності обчислювальної системи коли вона працює в дуплексному режимі. Тепер очевидно, що, з одного боку, дослідженню ефективності кластерних систем приділяється досить серйозна увага. Але в той самий час такі дослідження стосуються зазвичай найрізноманітніших режимів функціонування багатопроцесорних систем. Проте можна вважати, що на сьогодні проблема впливу певного мережевого інтерфейсу кластерної системи на її ефективність розкрита не повністю. Зокрема, не набув належного розвитку напрям досліджень, пов'язаний з удосконаленням організації мережевого інтерфейсу задля підвищення швидкодії процесу обміну даними між вузлами обчислювального комплексу. Відображені в цьому розділі дисертації результати досліджень свідчать про роботу над усуненням цієї прогалини шляхом проведення аналізу ефективності кластерних систем.

Нині існує багато різноманітних варіантів побудови модульних обчислювальних систем. Проте їхня основна конструктивна відмінність від подібних стосується мережевої технології, вибір якої зумовлено, передусім, специфікою розв'язуваних задач. Обчислювальна мережа кластерної системи – це модульне та адаптоване комутаційне середовище, яке налаштовують відповідно до найрізноманітніших вимог. Саме завдяки модульній будові тут можливе додавання нових компонентів або переміщення наявних, до того ж адаптивність комплексу спрощує внесення в нього змін та удосконалень.

Приймаючи до уваги викладене, заздалегідь зауважимо, що обчислювальна мережа кластерної системи має дві основні характеристики – пропускну спроможність і латентність. Перший показник відображає швидкість передавання

даних між двома вузлами мережі одразу після того, як між ними зв'язок буде встановлено. Латентність – це середній час між викликом функції передання даних та самою передачею. Такий час витрачається на адресацію, спрацьовування проміжних мережевих пристроїв, а також на інші мережеві ситуації, що супроводжують процес передачі даних.

Взагалі помітимо, що пропускна спроможність і латентність – це ті характеристики кластера, що можуть викликати обмежене коло задач, здатних ефективно оброблятися за його допомогою. Так, якщо завдання вимагає інтенсивного обміну даними у пакетах невеликого обсягу, то кластер, мережеве устаткування якого має велику латентність, буде значну частину часу витратити на встановлення мережевих з'єднань, а не на передачу даних між його вузлами. А значить, вузли в такій кластерній системі простоюватимуть, і за таких умов не можна домогтися значного збільшення ефективності розпаралелювання обчислень.

Проте в разі пересилання пакетів великого обсягу вплив періоду латентності на ефективність кластера може знижуватися за рахунок того, що передання займає значно більше часу, ніж встановлення самого з'єднання. Як бачимо, невдала реалізація мережевого інтерфейсу іноді може суттєво зменшити ефект від збільшення кількості задіяних у системі процесорів.

Як уже зазначено, новий якісний етап у проектуванні й застосуванні кластерних комплексів пов'язаний із використання сучасних нових мережевих технологій [20, 25, 26, 28, 74, 75, 76].

Зважаючи на зазначене вище, було визначено необхідність дослідження перспектив застосування нових комунікаційних технологій у роботі багатопроцесорних систем. І тут основну увагу було приділено впливу засобів мережевого інтерфейсу на показники ефективності кластерної системи, зокрема питанням погодження функціонування мережевого інтерфейсу і обчислювальних вузлів в багатопроцесорній системі.



## 4.2. Дослідження впливу комунікаційних технологій на ефективність багатопроцесорних систем

На першому етапі названих досліджень будемо розглядати особливості формування мережевого інтерфейсу кластерної системи та основні режими її роботи [49], а потім вже, на другому етапі, проведемо аналіз взаємодії роботи процесорів кластерної системи з його інтерфейсом.

Отже, аби оцінити перебіг процесів, що протікають у кластерній системі під час руху відповідних потоків тієї чи іншої інформації, необхідно порівнювати пропускну спроможність мережі кластера і комутатора [26, 72]. Така процедура потрібна для оптимального підбору комплектувальних елементів мережевого інтерфейсу до запропонованої багатопроцесорної системи. В зв'язку з цим для зручності досліджень уведемо параметр загальної пропускну спроможності інтерфейсу модульної системи за специфікацією виробника  $V_i$ , визначеною такою формулою:

$$V_i = V_p \cdot N. \quad (4.1)$$

Тут  $N$  – кількість вузлів кластера,  $V_p$  – протокольна пропускну спроможність інтерфейсу модульної системи, Гбіт/с. У досліджуваній багатопроцесорній системі пропускну спроможність інтерфейсу становить 200 Гбіт/с.

Після введення цього параметра зможемо порівняти загальну пропускну спроможність інтерфейсу модульного комплексу  $V_i$  з пропускну спроможністю комутатора  $V_k$ . Проектуючи багатопроцесорну систему скористались апаратним забезпеченням корпорації *NVIDIA*. У даній багатопроцесорній системі використовується її комутатор *NVIDIA QUANTUM-2*. Кожен з восьми задіяних у цій системі портів може одночасно з іншими в дуплексному режимі передавати і приймати дані з сумарною швидкістю 400 Гбіт/с. У такому разі пропускну спроможність шини, задана в пакетах в секунду, та заявлені для технології *InfiniBand*

(1600 Гбіт/с), стає реальною, коли пересилають великі пакети. Вважатимемо, що гранична область значень досліджуваного параметра має саме такі характеристики.

Для подальшого аналізу мережевого інтерфейсу кластерної системи введемо коефіцієнт її пропускної спроможності інтерфейсу  $k_s$ , визначений таким чином :

$$k_s = \frac{V_i}{V_k}. \quad (4.2)$$

З урахуванням співвідношення (4.1) отримаємо такий результат:

$$k_s = \frac{V_p \cdot N}{V_k}. \quad (4.3)$$

У літературі [28] описані дослідження, справедливі для так званого "ідеального" кластера, коли  $k_s = 1$ , тобто уся необхідна інформація для пересилання даних у кластерній системі через комутатор розподіляється між необхідними її вузлами без затримок. Таке припущення виявилось корисним для дослідження процесів, що протікають в кластерних системах. Воно дає можливість виконати аналіз основних режимів функціонування кластерної системи та відповідним чином їх оцінити. Звісно, що створення "ідеального" кластера практично неможливе. В зв'язку з цим, раніше виявлені особливості його функціонування необхідно уточнити з огляду на нові обставини. Для розвитку такого підходу введемо в розгляд поняття коефіцієнта пропускної спроможності комутатора  $k_k$ , визначивши його за такою формулою:

$$k_k = \frac{V_k}{V_p \cdot N}. \quad (4.4)$$

Аби більш детально дослідити функціонування багатопроесорного комплексу, розглянемо деякі особливості роботи її комутатора. Так, якщо  $N$  вузлів обчислювальної системи намагаються встановити з'єднання з одним вузлом відповідно до протоколу *InfiniBand* [58, 77], то комутаційна шина комутатора може забезпечити для кожного вузла в системі тільки смугу пропускання даних  $c_k$ , яку можна визначити на основі такого співвідношенням:

$$c_k = \frac{V_k}{N}. \quad (4.5)$$

На основі викладених вище міркувань виконаємо процедуру моделювання значень уведених коефіцієнтів залежно від кількості вузлів кластерної системи. Початкові дані для вивчення інтервалу зміни значень коефіцієнтів мережевого інтерфейсу запропонованої багатопроцесорної системи наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Вихідні дані для розрахунку мережевих характеристик кластерної системи

$V_p$	200 Гбіт/с
$V_k$	1600 Гбіт/с

Отримані результати моделювання зведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Результати моделювання мережевих характеристик  
кластерної системи

Число. вузлів, $N$	$k_s$	$k_k$	$c_k$
2	0,25	4,00	800,00
3	0,38	2,67	533,33
4	0,50	2,00	400,00
5	0,63	1,60	320,00
6	0,75	1,33	266,67
7	0,88	1,14	228,57
8	1,00	1,00	200,00
9	1,13	0,89	177,78
10	1,25	0,80	160,00
11	1,38	0,73	145,45
12	1,50	0,67	133,33
13	1,63	0,62	123,08
14	1,75	0,57	114,29
15	1,88	0,53	106,67

Результати моделювання подано також у вигляді відповідних графічних залежностей, які подано на рис. 4.1. Для зручності аналізу графіки зміни значень коефіцієнтів побудовано в одній системі координат.

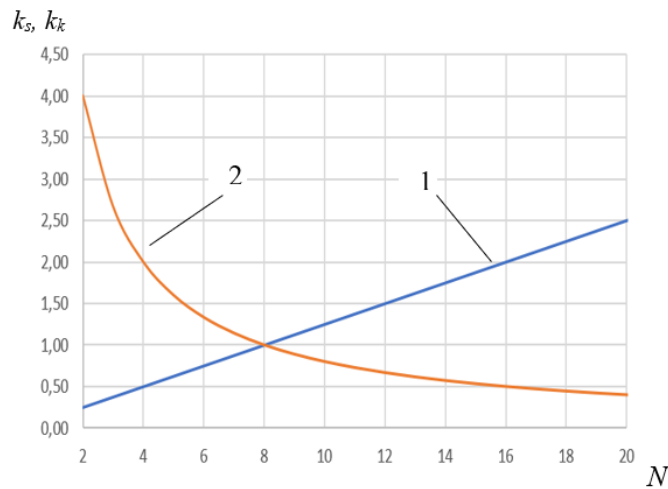


Рис. 4.1. Графіки залежності значень основних мережевих коефіцієнтів багатопроцесорної системи від кількості її вузлів

Проведемо попередній аналіз отриманих результатів. Очевидно, що зі збільшенням кількості вузлів у модульній системі зростатиме пропускна спроможність мережі  $V_i$ . Тоді зміна значень коефіцієнта пропускної спроможності інтерфейсу системи  $k_s$  (4.3) здійснюватиметься за лінійним законом (рис. 4.1, лінія 1). Коли ж зростає обсяг даних, що пересилаються між вузлами модульної системи, то це приведе до того, що комутатор буде перевантажено і значення коефіцієнта його пропускної спроможності  $k_k$  (4.4) зменшуватимуться за нелінійним законом (рис. 4.1, лінія 2).

Отже, попередньо проведений аналіз моделювання значень основних мережевих коефіцієнтів багатопроцесорної системи створив передумови для узагальнення отриманих результатів. Тоді для повної аналітичної картини досліджень уведемо деякі визначення, керуючись якими виконаємо детальніший аналіз основних мережевих характеристик системи.

**Визначення 1.** *Точка мережевої рівноваги* – це коли значення коефіцієнтів пропускної спроможності інтерфейсу модульних систем і комутатора будуть рівні між собою.

**Визначення 2.** *Рівноважне число вузлів багатопроцесорних систем* – це та їхня кількість, що відповідає точці мережевої рівноваги.

**Визначення 3.** *Ідеальна багатопроцесорна модульна система* – це та, у якій мережеві характеристики рівні між собою, тобто  $k_s = k_k$ .

**Визначення 4.** *Реальна багатопроцесорна модульна система* – це та, у якій існує нерівність між мережевими характеристиками, тобто  $k_s \neq k_k$ .

**Визначення 5.** *Режим браку ресурсів мережевого інтерфейсу модульних систем* – це такий випадок функціонування мережі кластера, коли виконується така нерівність його мережевих характеристик:  $k_s < k_k$ .

**Визначення 6.** *Режим надлишку ресурсів мережевого інтерфейсу модульних систем* – це такий випадок функціонування мережі кластера, коли виконується така нерівність його мережевих характеристик:  $k_s > k_k$ .

Отже, беручи до уваги сформульовані залежності, можна уточнити особливості функціонування мережевого інтерфейсу модульного комплексу і на цій підставі виконати детальний аналіз основних розрахункових співвідношень, які наведено в табл. 4.2.

У рамках аналізу функціонування мережевого інтерфейсу запропонованого засобу встановимо необхідні показники роботи комутатора. При цьому зауважимо, що продуктивність цього пристрою істотно залежить від типів комутації. Той комутатор, що задіяно в нашій системі, має в розпорядженні чотири типи комутації, а саме :

- наскрізна комутація (*cut – through*);
- комутація з буферизацією (*store – and – forward switching*);
- безфрагментна комутація (*fragment – free switching*);
- адаптивна комутація (*intelligent*).

При наскрізній комутації у буфер вхідного порту комутатора надходить тільки декілька перших байтів з пакету, які необхідні для прочитування адреси призначення, після встановлення якої, паралельно з прийманням решти байтів кадру, відбувається комутація потрібного маршруту, і пакет даних передається до вихідного порту, якщо він в цей час не задіяний у інших пристроях кластера. Інакше увесь пакет даних поступає в буфер вхідного порту. Наскрізна комутація забезпечує найвищу швидкість руху даних, що дає значний вииграш у продуктивності, а це важливо в процесі опрацювання для інформації прикладних задач [78 – 83].

Дія комутації з буферизацією передбачає, що пакет даних надходить у буфер вхідного порту комутатора, де порівнюючи дані з їхньою контрольною сумою, перевіряється на наявність помилок. Якщо помилок не виявлено, то пакет передається на вихідний порт. Цей спосіб комутації даних гарантує їхню фільтрацію від помилкових пакетів, проте процедура буферизації викликає зниження пропускної здатності комутатора, якщо порівнювати з наскрізною комутацією.

Безфрагментна комутація – це коли в буфер вхідного порту надходять дані не всього пакета, а тільки перших 64 байтів. Коли пакет має мінімальний обсяг даних, то це відповідає повній буферизації, а ті обсяги розмір яких перевищує 64 байти, проходять наскрізну комутацію. Отже, безфрагментна буферизація означає, що перевірки підлягають тільки кадри мінімального обсягу.

Якщо комутація адаптивна, то комутатор сам обирає для кожного порту оптимальний режим роботи.

Заздалегідь зауважимо, що для отримання високих показників ефективності й прискорення обчислень у багатопроцесорній системі, необхідно аби вона функціонувала під дією одного з описаних типів комутації в *режимі браку ресурсів мережевого інтерфейсу*. Таке твердження цілком очевидне, оскільки сумарна швидкість руху даних, що надсилаються і приймаються всіма вузлами цього кластера, не повинна перевищувати пропускної спроможності комутатора.

Основна особливість *режиму надлишку ресурсів мережевого інтерфейсу* відзначається тим, що комутатор може стикатися з перевантаженнями, коли сума трафіків, які в нього входять, перевищує суму тих, що виходять. У такому разі буде

змінено умови комутації даних. Тут дія комутатора переходить у режим комутації з буферизацією, що призводить до втрати його пропускної спроможності. До того ж критичне збільшення обсягу даних у буфері порту спричиняє його переповнення і, як наслідок, втрату інформації. В описаних обставинах комутатор не зможе забезпечувати максимально стабільне та надійне формування комутованих потоків даних в обчислювальній системі. Тоді основні характеристики модульної системи (у т. ч. і швидкодія) істотно погіршуватимуться, а те, для чого вона власне працює – формування багатопроесорності обчислень, втрачає свій сенс.

Усі міркування стосовно режимів роботи комутатора багатопроесорної системи зумовлюють необхідність виведення аналітичного співвідношення, з якого можна визначити рівноважне число вузлів кластерної системи. Спочатку з цією метою уведемо припущення про рівність коефіцієнтів, тобто  $k_s = k_k$ , тоді в аналітичному вигляді:

$$\frac{V_p \cdot N}{V_k} = \frac{V_k}{V_p \cdot N}. \quad (4.6)$$

Після деяких перетворень співвідношення (4.6) отримуємо квадратне рівняння, необхідне значення кореня якого буде подано на основі такого виразу:

$$N = \frac{V_k}{V_p}. \quad (4.7)$$

Аналіз виразу (4.7) показує, що рівноважне число вузлів кластерної системи залежить не тільки від протокольної пропускної спроможності мережі кластера, але й від пропускної спроможності комутатора. Отже, стосовно пропонованої обчислювальної системи, якщо брати до уваги заявлені можливості мережевого її інтерфейсу (дані з табл. 4.1), скориставшись співвідношенням (4.7), визначимо рівноважне число вузлів. Маємо такий результат обчислення:  $N = 4$ . Виконаємо аналіз отриманого значення. Очевидно, що в рамках наявних характеристик мережевого інтерфейсу "ідеальною" кластерна система буде тоді, коли число її вузлів  $N = 4$ .

Зауважимо, що це повністю узгоджується з технічними можливостями обраного для системи комутатора. На цьому етапі досліджень можна відзначити, що згідно з описаним режимом функціонування обчислювальної мережі комутатор підібраний вдало.

Крім того, виконані результати розрахунку рівноважного числа вузлів у модульній системі переконливо спростовують твердження про те, що "чим більше вузлів має кластер, тим швидше він працює". Так, коли  $N > 4$ , то система переходить у режим надлишку мережевого інтерфейсу, а така обставина характерна для малоефективних багатопроцесорних систем, мережевий інтерфейс яких може складатись із примітивних комутаторів або і взагалі побудованих невдало.

#### **4.3. Вплив смуги пропускання комутатора на ефективність багатопроцесорних систем**

Розглянемо, яким чином смуга пропускання комутатора впливає на ефективність багатопроцесорного комплексу. З цією метою перейдемо до більш детального аналізу результатів моделювання основних мережевих характеристик системи з урахуванням описаних вище обставин. Очевидно, що в рамках наявних параметрів її мережевого інтерфейсу "ідеальною" багатопроцесорна система буде тоді, коли її число вузлів  $N = 4$  (відповідно до виразу 4.7, табл. 4.2). Зауважимо також, що у табл. 4.2 подано результати розрахунку смуги пропускання комутатора  $c_k$  відповідно наявному режиму функціонування мережевого інтерфейсу. У випадку, коли  $N = 4$ , то значення смуги пропускання на кожен вихідний порт кластерної системи буде становити 200 Гбіт/с, а це повністю узгоджується не тільки з дуплексним режимом обміну даними в модулі, а й з можливостями самої комутаційної шини системи. За таких умов мережевий інтерфейс кластера функціонуватиме в режимі браку ресурсів мережевого інтерфейсу із максимально допустимим завантаженням каналів руху даних у комутаторі. Як бачимо, технічні можливості обраного комутатора будуть повністю відповідати з можливостями комутаційної мережі.



З огляду на розглянуті вище обставини, було встановлено передумови для загального аналізу роботи мережевого інтерфейсу пропонованої багатопроцесорної системи. Аби аналіз був повним, уведемо поняття коефіцієнта пропускної спроможності модульної системи  $k_p$ , що набуває таких значень :

$$k_p = \begin{cases} 1 & \text{для режиму браку ресурсів мережевого інтерфейсу,} \\ k_k & \text{для режиму надлишку ресурсів мережевого інтерфейсу.} \end{cases} \quad (4.8)$$

На рис. 4.2 приведено графічну інтерпретацію зміни значень коефіцієнта пропускної спроможності модульної системи залежно від кількості її вузлів.

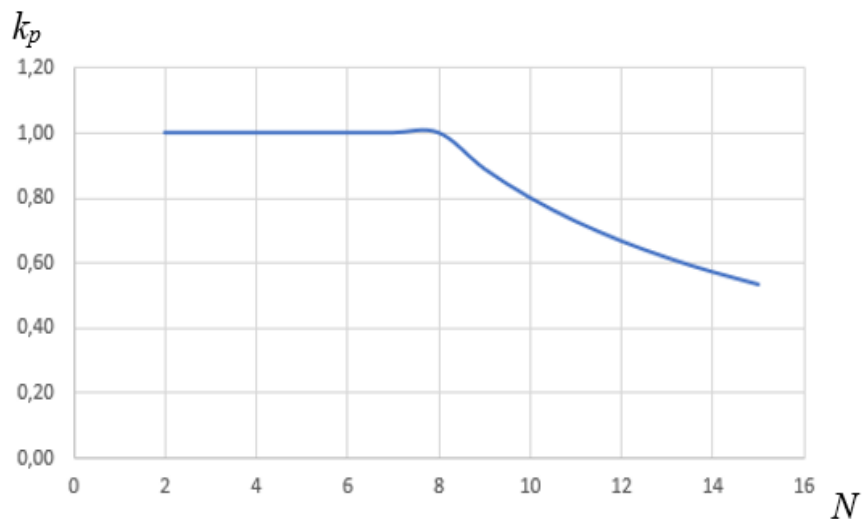


Рис. 4.2. Графік залежності коефіцієнта пропускної спроможності багатопроцесорної системи від числа її вузлів

Аналіз цієї залежності показує, що в режимі браку ресурсів мережевого інтерфейсу значення коефіцієнта пропускної спроможності кластера буде зумовлено характеристиками мережевого інтерфейсу. В даному випадку через особливості згаданого режиму комутатора встановлюють, що такий коефіцієнт дорівнює одиниці, оскільки комутаційна матриця працюватиме за типом наскрізної комутації (*cut – through*) і інформація буде рухатись з найбільшою швидкістю без використання процедури буферизації пакетів даних, що передаються. У режимі надлишку ресурсів мережевого інтерфейсу такий параметр визначатиметься характеристиками

комутатора, коли сума трафіків, що входять у нього, перевищує суму тих, що виходять. Тут комутатор починає діяти за типом комутації з буферизацією, що призводить до зменшення його пропускної спроможності. Описаний стан відображено спадною лінією на рис. 4.2.

#### **4.4. Вплив режиму агрегації комунікаційних каналів на ефективність багатопроцесорних систем**

Проведений аналіз виявлених режимів роботи мережевих інтерфейсів пропонованої багатопроцесорної системи виявив необхідність вирішити таку проблему: яким чином можна покращити показники мережевого інтерфейсу модульних установок? Іншими словами: *як за рахунок конструктивних особливостей архітектури обчислювальних мереж модульних систем можна поліпшити параметри їхньої ефективності та швидкодії?*

Поставлену проблему можна вирішити наступним чином. Основна особливість досліджуваної багатопроцесорної системи відзначається тією обставиною, що обмін відповідними даними між обчислювальними вузлами винесено в окрему комутаційну мережу, що працює на каналному (другому) рівні з використанням технології *channel bonding* [84 – 86]. Такий підхід спрямовано на збільшення швидкості обміну даними між вузлами комплексу, а також зменшити завантаження каналу, що їх з'єднує. Проте в разі застосування нової технології *Socket Direct* буде збільшено й пропускну спроможність інтерфейсу запропонованої багатопроцесорної системи.

В той же час, режим агрегації каналів мережевого інтерфейсу системи шляхом уведення в неї додаткових керованих комутаторів, які працюють паралельно, дозволив через термінал або *WEB*-інтерфейс змінювати конфігурацію мережі, підвищувати її пропускну спроможність [19, 49, 58, 84]. Саме такі удосконалення архітектури мережі забезпечили високошвидкісний доступ даних до пам'яті вузлів розробленої системи. Взагалі зауважимо, що робота реконфігурованої мережі

дозволяє підвищити ефективність багатопроцесорного комплексу, адаптуючи структуру його мережі до розв'язування заданого типу задач користувача.

Отже, запропонована мережева архітектура модульного комплексу має кілька суттєвих переваг, по-перше, буде підвищувати швидкість обчислень при розв'язуванні сильнозв'язаних задач і, по-друге, забезпечувати високошвидкісний доступ даних до пам'яті відповідних вузлів системи, зменшуючи завантаження каналів, які з'єднують ці вузли. У зв'язку з цим подальші зусилля досліджень будуть спрямовані на отримання числових характеристик мережевого інтерфейсу кластерного комплексу в умовах застосування технології *channel bonding* і агрегації каналів його мережевого інтерфейсу.

Для цієї мети з огляду на запровадження технології *channel bonding* і процесу агрегації засобів мережевого інтерфейсу необхідно уточнити значення параметрів, знайдених із співвідношень (4.3) і (4.4), які характеризують основні мережеві характеристики кластерної системи. Так, коефіцієнт пропускної спроможності мережевого інтерфейсу модульного комплексу будемо визначати таким чином:

$$k_s = \frac{V_p \cdot N \cdot k}{V_k \cdot k_m}. \quad (4.9)$$

Тут  $k$  – кількість симетричних обчислювальних підмереж, які працюють одночасно, як передбачено технологією *channel bonding*,  $k_m$  – кількість комутаційних матриць у мережі її обміну даними.

Вираз для визначення коефіцієнта пропускної спроможності комутатора  $k_k$  уточнимо аналогічно:

$$k_k = \frac{V_k \cdot k_m}{V_p \cdot N \cdot k}. \quad (4.10)$$

Крім того, аби простежити узгодження обраної комутаційної шини з можливостями комутатора, необхідно уточнити значення коефіцієнта смуги пропускання комутатора  $c_k$ . З огляду на виконання режиму агрегації каналів мережевих інтерфейсів величину  $c_k$  знаходять з такого співвідношення:

$$c_k = \frac{V_k \cdot k_m}{N}. \quad (4.11)$$

У дослідженні описаного режиму роботи мережевих інтерфейсів модульного комплексу, скористаємося даними, що перелічені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Початкові дані для розрахунку мережевих характеристик обчислювального комплексу на основі використання режиму агрегації каналів мережевого інтерфейсу

$V_p$	200 Гбіт/с
$V_k$	1600 Гбіт/с
$k$	4
$k_m$	2

Отримані результати моделювання роботи кластера зведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Результати моделювання мережевих коефіцієнтів багатопроцесорної системи в умовах виконання режиму агрегації каналів її мережевого інтерфейсу

Кільк. вузлів, $N$	$k_s$	$k_k$	$c_k$
2	0,50	2,00	1600,00
3	0,75	1,33	1066,67
4	1,00	1,00	800,00
5	1,25	0,80	640,00
6	1,50	0,67	533,33
7	1,75	0,57	457,14
8	2,00	0,50	400,00
9	2,25	0,44	355,56
10	2,50	0,40	320,00
11	2,75	0,36	290,91
12	3,00	0,33	266,67
13	3,25	0,31	246,15
14	3,50	0,29	228,57
15	3,75	0,27	213,33

Результати моделювання роботи кластера подано також у вигляді графічних залежностей (рис. 4.3).

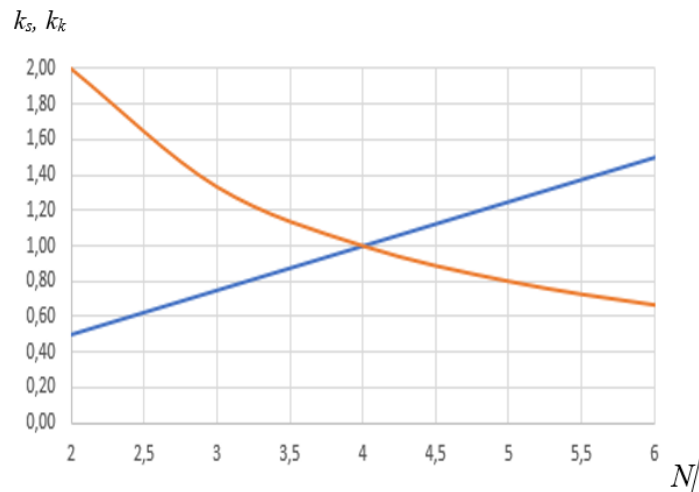


Рис. 4.3. Графіки залежності значень основних мережевих коефіцієнтів багатопроцесорної системи від кількості її вузлів під час роботи в режимі агрегації каналів її мережевого інтерфейсу

Далі виведемо аналітичне співвідношення для визначення рівноважного числа вузлів кластерного комплексу під час роботи в режимі агрегації каналів його мережевого інтерфейсу. Для цієї мети введемо припущення про рівність значень мережевих коефіцієнтів  $k_s = k_k$  (4.9), (4.10), тоді в аналітичному вигляді:

$$\frac{V_p \cdot N \cdot k}{V_k \cdot k_m} = \frac{V_k \cdot k_m}{V_p \cdot N \cdot k}. \quad (4.12)$$

Після деяких перетворень співвідношення (4.12) отримуємо квадратне рівняння, необхідне значення кореня в якому буде знайдено з такого виразу:

$$N = \frac{V_k \cdot k_m}{V_p \cdot k}. \quad (4.13)$$

Аналіз співвідношення (4.13) показує, що в режимі агрегації каналів мережевого інтерфейсу рівноважне число вузлів кластерної системи залежить не тільки від протокольних величин пропускної спроможності мережі кластера і комутатора, але й від кількості симетричних обчислювальних підмереж, які працюють одночасно за рахунок реалізації технології *channel bonding* та  $k_m$  – кількості комутаційних матриць у мережі обміну даних. При цьому рівноважне число вузлів кластерної системи  $N = 4$ .

Отже, з'явилися передумови для загального аналізу отриманих результатів. Очевидно, що описаний режим роботи, де запроваджено зміну архітектури інтерфейсу даної багатопроцесорної системи, не тільки розширить смугу пропускання комутаційної шини, але й істотно дозволить зменшити число вузлів у цій системі, забезпечивши її функціонування в оптимальному варіанті мережевого інтерфейсу. Така обставина буде означати, що сформований режим роботи мережевого інтерфейсу кластера надаватиме більше можливостей для виконання необхідних розрахунків, істотно покращуючи характеристики його ефективності і швидкодії.

#### **4.5. Дослідження ефективності кластерної системи під впливом режиму агрегації каналів мережевих інтерфейсів**

Основна особливість роботи мережевого інтерфейсу кластерної системи в режимі агрегації її каналів полягає в тому, що обмін відповідними даними між її вузлами винесено в окрему мережу, яка працює на каналному (другому) рівні з використанням механізмів технології *channel bonding*. Це забезпечило підвищення швидкості обміну даними та зменшило завантаження каналу, який з'єднує вузли кластера. Таке застосування механізму *channel bonding* до функціонування кластерної обчислювальної системи дає можливість підвищити її ефективність. Подальші

дослідження будуть стосуватись вивчення показників ефективності розпаралелювання обчислень шляхом уведення в дію додаткових обчислювальних мереж.

Початкові дані для вивчення згаданого режиму наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Початкові дані модульної системи в умовах багатоканального режиму функціонування її обчислювальної мережі

$V_p$	200 Гбіт/с
$V_k$	1600 Гбіт/с
$R$	1024 Гбит
$m$	2
$d$	2
$k$	4

Значення величини  $m$  дорівнює одиниці, коли має місце односторонній режим граничного обміну даними, чи двом, якщо режим двосторонній; параметр  $d$  має такі значення: якщо режим функціонування мережі системи напівдуплексний, відповідає одиниці ( $d = 1$ ), а коди дуплексний – двійці ( $d = 2$ ).

При цьому візьмемо до уваги, що оскільки швидкість передавання інформації через порт вузла кластерної системи дорівнює протокольній пропускній спроможності мережі, то загальний показник пропускної спроможності мережі кластера можна визначати з такого співвідношення:

$$V = k \cdot d \cdot V_p \cdot k_k . \quad (4.13)$$

Аналіз виразу (4.13) показує, що він буде справедливим в умовах режиму браку роботи мережевого інтерфейсу. Тоді загальний показник пропускної спроможності мережі кластера залежатиме від швидкості пересилання даних через порт вузла багатопроцесорної мережі, від кількості підмереж та від режиму передавання даних в

обчислювальній мережі. У той же час виявилось, що така швидкість не залежить від кількості вузлів у системі. Цей на перший погляд парадоксальний висновок можна пояснити саме роботою системи в режимі браку функцій мережевого інтерфейсу. Така обставина буде означати, що коли кластер має рівноважне число вузлів, швидкість комутації даних в його мережі буде зумовлено, в основному, швидкістю порту кожного вузла багатопроцесорної системи.

Далі визначимо час граничного обміну даними в кластерній системі в умовах дії режиму функціонування мережевого інтерфейсу відповідно такій залежності :

$$T_{ex1} = \frac{E}{V} \quad (4.14)$$

Тут  $E$  – обсяг даних в інтервалі граничного обміну (Гбіт).

Подамо співвідношення (4.14) через параметри кластерної системи, а саме :

$$T_{ex} = \frac{m \cdot (N - 1) \cdot \sqrt{R}}{k \cdot d \cdot V_p} . \quad (4.15)$$

Далі, в рамках проведення експерименту з використанням цієї кластерної багатопроцесорної системи оцінимо, яка в ній має бути кількість вузлів, аби задачу розв'язувати найефективніше. При цьому зауважимо, що час виконання однієї ітерації обчислювального процесу складається з двох доданків – того, що йде безпосереднього на роботу процесорів  $T_{calc} = \frac{T_{it}}{N}$  та часу обміну даними між певними обчислювальними вузлами комплексу  $T_{ex}$ , тобто

$$T_{it} = T_{calc} + T_{ex} . \quad (4.16)$$

При цьому в літературних джерелах [60, 77] було встановлено, що швидкість обчислень зростатиме приблизно до моменту, коли

$$T_{calc} \approx T_{ex} . \quad (4.17)$$



Отже, на підставі співвідношення (4.17) можна визначити кількість вузлів кластерної обчислювальної системи, коли буде забезпечено найліпшу ефективність розрахунків. Помітимо, що цей етап досліджень має на меті зменшення загального часу обчислень шляхом їхнього розпаралелювання. Очевидно, що при цьому загальний розмір задіяної різницевої сітки не залежить від числа обчислювальних вузлів кластерного комплексу. З огляду на зміст співвідношення (4.17), отримують аналітичний вираз для визначення оптимальної кількості вузлів у кластерній системі, а саме:

$$\frac{T_{it}}{N} \approx \frac{m \cdot (N-1) \cdot \sqrt{R}}{k \cdot d \cdot V_p}. \quad (4.18)$$

Скориставшись співвідношенням (4.18), можна вивести рівняння для визначення оптимальної кількості вузлів кластерної системи відносно  $N$ , при якому загальний час обчислень, потрібний для розв'язування задачі, буде мінімальним. Тоді рівняння (4.18) зводимо до квадратичного вигляду, тобто:

$$N^2 - N - \frac{T_{it} \cdot k \cdot d \cdot V_p}{m \cdot \sqrt{R}} = 0. \quad (4.19)$$

Розв'язком такого рівняння будуть два корені, при цьому значення одного з них додатній, а іншого – від'ємний. Виходячи з поставлених фізичних умов задачі, приймається додатній корінь, значення якого рівне чотирьом, тобто  $N = 4$ . Отже, з огляду на відмічені міркування, у рамках даного дослідження оптимальна кількість вузлів кластерної системи, при якому досягатиметься максимальна ефективність розпаралелювання, відповідатиме  $N = 4$ .

Враховуючи зміст отриманих співвідношень, було проведено моделювання певних характеристик ефективності пропонованої системи. Отримані результати обчислень оформлено відповідними графічними залежностями (рис. 4.4. та 4.5).

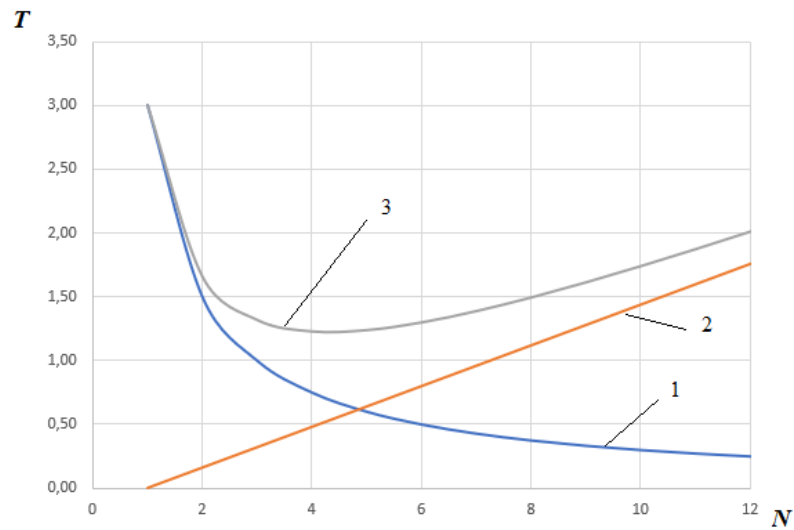


Рис. 4.4. Графічні залежності часу виконання однієї ітерації від кількості вузлів обчислювальної системи

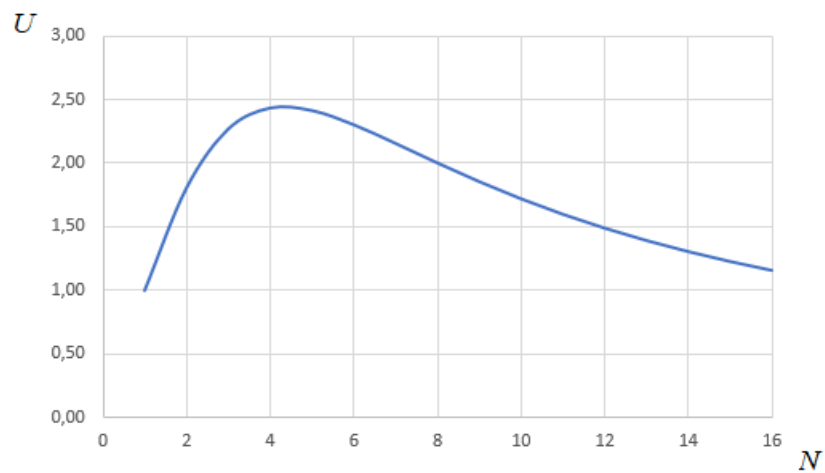


Рис. 4.5. Крива залежності прискорення обчислень від кількості вузлів обчислювальної системи

Проведений аналіз отриманих результатів моделювання показав наступне. Як видно з рис. 4.4, час для обчислень однієї ітерації у випадку збільшення числа вузлів обчислювальної системи зменшується за гіперболічною залежністю (крива 1). Разом

з тим, параметр часу граничного обміну даними в тих самих умовах зростає за лінійним законом (лінія 2). Загальну картину зміни часу обчислень однієї ітерації в багатопроесорній системі ілюструє залежність, відображена кривою 3. Аналіз такої кривої показує, що час розрахунку на першому етапі зменшується за умови збільшення числа вузлів кластера. Подібний результат, здавалося, і був передбачений. Проте зменшення такого часу відбувається до певної межі. Якщо, наприклад, кількість вузлів перевищує чотири (рис. 4.1), то за таких обставин загальний час обчислень починає зростати. Відбувається це на тлі збільшення обсягу даних, які пересилаються між вузлами обчислювального комплексу.

Отже, теоретичні положення повністю відповідають результатам числового моделювання певних характеристик ефективності кластерної багатопроесорної системи. Порівняльний аналіз результатів обчислень після введення в дію симетричних обчислювальних підмереж, які працюють одночасно, реалізуючи технологію *channel bonding*, показав, що за рахунок зростання швидкості обміну даними між вузлами обчислювального комплексу вдалося понизити завантаження каналів, які з'єднують ці вузли. Усі описані вище заходи сприяли істотному поліпшенню показників ефективності кластера.

#### **4.6. Дослідження завантаженості каналів комутації багатопроесорної системи**

Для аналізу перевірки коректності вибору мережевого устаткування розглянемо характеристику коефіцієнта завантаженості каналів комутації багатопроесорної системи  $\xi$ . Цю характеристику мережевого інтерфейсу обчислювального комплексу можна подати таким чином:

$$\xi = \frac{T_{ex}}{T_{it}}. \quad (4.20)$$

Перетворимо це співвідношення через параметри багатопроцесорної системи, а саме:

$$\xi = \frac{m \cdot N \cdot (N - 1) \cdot \sqrt{R}}{T_i \cdot k \cdot d \cdot V_p + N \cdot m \cdot (N - 1) \cdot \sqrt{R}} \quad (4.21)$$

Результати моделювання коефіцієнта завантаженості каналів комутації наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Результати моделювання коефіцієнта завантаженості каналів (КЗК) комутації багатопроцесорної системи

Кільк. вузлів	КЗК
1	0,00
2	0,12
3	0,30
4	0,46
5	0,59
6	0,68
7	0,75
8	0,80
9	0,84
10	0,86

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що, як і очікувалося, збільшення числа вузлів в обчислювальній системі веде до зростання значень коефіцієнта завантаженості каналів зв'язку. Проте відомо, що коли  $\xi = 50\%$ , то оперативна пам'ять комутатора буде використовуватися приблизно на  $70\%$ . Запас цієї пам'яті (до  $30\%$ ) резервується для усунення перевантажень і колізій, які при цьому можуть виникати внаслідок завантаженості в комутаційній мережі системи. Причина перевантажень зазвичай криється не в тому, що робота комутатора блокується, тобто йому не вистачає потужності процесорів для обслуговування потоків даних, а в обмеженій пропускній спроможності кожного окремого порту, що пов'язано з часовими параметрами протоколу системи [ 87, 88].

Крім того, враховуючи результати аналізу мережевого устаткування, дійшли до висновку, що забезпечити оптимальний режим мережевого інтерфейсу вдається тоді,

коли багатопроцесорна система має не більше чотирьох лез ( $N = 4$ ). Результати розрахунку (табл. 4.6) показали, саме така кількість лез сприяє досягненню найліпших показників ефективності цього багатопроцесорного комплексу. З огляду на вище зазначене, можна стверджувати, що устаткування мережевого інтерфейсу кластерної системи підібране вдало.

#### **4.7. Висновки до розділу 4**

У цьому розділі дисертації розкриваються шляхи щодо підвищення ефективності розробленого багатопроцесорного комплексу за рахунок зміни архітектури його мережевого інтерфейсу. Встановлено, що безперечною перевагою режиму агрегації каналів є істотне підвищення швидкості обміну даними між відповідними вузлами у багатопроцесорній системі. Запропонована методика сприяє не тільки підвищенню ефективності розпаралелювання, але й суттєвому зменшенню часу обчислень. Більше того, зазначений режим роботи багатопроцесорного комплексу має безумовну перевагу в його надійності. Так, у разі відмови адаптера трафік надсилається наступному справному адаптеру без переривання процесу обчислень. За умови, коли адаптер знову включається в роботу, то пересилання даних через нього знову відновлюється.

При цьому маємо такі підсумкові результати досліджень:

1. Виявлено існування двох режимів роботи мережевого інтерфейсу в модульній системі. Обґрунтовані умови визначення рівноважного числа обчислювальних вузлів у кластерній системі задля того, аби режим браку ресурсів мережевого інтерфейсу переходив у режим його надлишку.

2. Було проведено аналіз наявних режимів функціонування мережевого інтерфейсу в модульній багатопроцесорній системі. Підтверджено, що для досягнення високих показників ефективності й прискорення обчислень у багатопроцесорній системі необхідно, щоб вона функціонувала в режимі браку ресурсів мережевого інтерфейсу. Одночасно було помічено основну особливість режиму надлишку ресурсів мережевого інтерфейсу у випадку перевантаження

комутатора, коли сума трафіків, що в нього входять, перевищує суму тих, що виходять. Як виявилось, в цих умовах основні характеристики ефективності такої кластерної системи істотно погіршуватимуться.

3. Проаналізовано роботу комутаційної матриці комутатора в режимі наскрізної комутації (*cut – through*), коли інформація передавалася без проходження процедури буферизації. Такий підхід забезпечує процес передачі пакетів даних з найбільшою швидкістю, а це зумовлює поліпшення показників ефективності розробленої системи внаслідок формування багатоканальних режимів її мережевого інтерфейсу.

4. Показано, що запропонований режим роботи мережевого інтерфейсу даної системи не тільки розширив смугу пропускання даних через комутаційну шину, але дає змогу істотно зменшити число вузлів у кластері, аби його функціонування відповідно оптимальному варіанту мережевого інтерфейсу. Така обставина означає, що сформований режим роботи мережевого інтерфейсу даної багатопроцесорної системи створює ліпші можливості для виконання необхідних розрахунків, істотно поліпшує характеристики ефективності й швидкодії.

5. Визначено показники ефективності кластерного модуля в умовах формування багатоканальних режимів його мережевого інтерфейсу. Кожен показник ефективності було подано через параметри обчислювальної системи, що дозволяє більш раціонально компонувати її вузли.

6. Було виведено аналітичні залежності через параметри багатопроцесорного кластерного комплексу, за допомогою яких стало можливим визначення оптимального числа його вузлів, що забезпечує розв'язування задачі за мінімально можливий час.

7. Виконано розрахунки параметра завантаженості каналів комутації обчислювальної системи. Це дозволило переконатися в коректності підбору мережевого устаткування.

Подані в розділі теоретичні положення повністю було узгоджено 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.

**РОЗДІЛ 5****КОМП'ЮТИРИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ  
СУЧАСНИХ СКЛАДНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

Сьогодні практика виробничої діяльності висуває перед спеціалістами проблеми, вирішення яких найчастіше можливе лише шляхом використання багатопроцесорних комплексів. Наприклад, у сфері металургійного виробництва спостерігається безліч найрізноманітніших та взаємопов'язаних процесів [46, 47, 61, 89 – 93]. Це може бути процес виплавки та розливання залізовуглецевих сплавів, вальцювання, нагрівання та термічна обробка різної металопродукції, а також робота допоміжного устаткування, до якого відносяться завалочні машини, ковші, чаші та ін. При цьому, розв'язок зазначених задач відомими стандартними підходами досить часто являє собою значну проблему, вирішити яку можна тільки шляхом застосування багатопроцесорних комп'ютерних технологій. Своєю чергою ці технології мають безперечну перевагу, яка зводиться до збільшення продуктивності й швидкодії обчислень. При цьому значна продуктивність обчислень допускає розв'язування багатовимірних задач, а також задач, які потребують значного обсягу процесорного часу. Швидкодія дозволяє ефективно контролювати не тільки технологічні процеси, але передбачає також створення передумов для розробки перспективних і новітніх технологічних процесів.

При цьому, зауважимо, що, наприклад, структура й властивості сталі залежать, в основному, від процесів структурного перетворення, які відбуваються в сталевій заготовці під час термічної обробки (ТО). Відомо також, що технологічні процеси підготовки прокату до подальшої деформації потребують певної оптимізації з метою їхнього удосконалення. Причому конструювання нових технологічних ліній ТО металу пов'язано із значними витратами на проведення численних натурних експериментів та на використання лабораторного й дослідно-промислового устаткування або проведення досліджень в умовах реального виробництва. З метою зменшення таких витрат створюють і запроваджують у практику багатопроцесорні



комплекси, використовуючи їхнє математичне та програмне забезпечення, що на сьогодні являє собою актуальну проблему. Вирішення такої проблеми дозволяє суттєво скоротити число експериментальних досліджень, також, що важливо, і час, необхідний для їхнього проведення. Такий підхід дозволяє отримувати необхідну інформацію про розробку та впровадження різного роду технологічних нововведень. У сучасних умовах жорсткої конкуренції між світовими виробниками металопродукції українські дослідники постійно працюють над створенням і реалізацією конкурентоздатних технологій виробництва своєї продукції. Нові технологічні процеси ТО заготовок (нагрівання та охолодження металу з необхідною швидкістю в конкретних температурно-часових умовах), у яких передбачено ресурсозбереженні технології їхньої підготовки до подальшої обробки – це найважливіші перспективні напрями розвитку гірничо-металургійного комплексу та машинобудування. Контроль певних технологічних параметрів і керування процесом ТО можна забезпечити за рахунок використання багатопроцесорних комплексів.

У цьому розділі дисертації відображено методи розробки новітніх металургійних технологій із застосуванням багатопроцесорних комплексів. Розробку проілюстровано на прикладі ТО заготовки. Відомо, що ТО заготовки є найбільш перспективним способом докорінного поліпшення споживчих властивостей металовиробів. При цьому заготовка для холодної висадки повинна мати в початковому стані структуру зернистого перліту певного балу, тобто такого, що має глобулярну форму карбідної фази певного розміру. Для досягнення металом такого структурного стану заготовку піддають сфероїдизуючому відпалюванню.

Основна мета цього розділу дисертації зводиться до розробки моделі процесу ТО сталевих виробів. Зокрема таку модель можна застосовувати в процесі рекристалізації, а також сфероїдизувального відпалювання каліброваних сталей, що йде на виготовлення міцних кріпильних виробів через холодне об'ємне штампування (ХОШ) без процесу завершальної ТО. В основу такої моделі було покладено спосіб ТО заготовки з низько- й середньовуглецевих сталей, які призначаються для процесу холодної висадки [94]. Застосування моделі дозволяє суттєво поліпшувати технологічні властивості заготовки шляхом надання металу високої дисперсності та

однорідності відповідної структури заданого зразка на всій площі його перерізу. Технологічний процес ТО сталі при цьому набуває таких пріоритетів, як висока продуктивність, суттєве зниження енергоспоживання, поліпшення відповідних експлуатаційних характеристик. Зазначених властивостей технологічного процесу ТО металопрокату досягають за рахунок використання багатопроцесорної системи [49]. Така багатопроцесорна система монтується як окремий модуль і дозволяє за допомогою засобів спеціального ПЗ задавати та контролювати певні температурні режими зразка при його нагріванні й витримці на всій його площині перерізу, а за необхідності така система може контролювати режим теплової обробки сталі в інтервалах температур відпалювання.

### **5.1. Установа для комп'ютиризованого контролю параметрів сучасних складних технологічних процесів**

Запропонована до впровадження установа має на меті суттєво скоротити тривалість процесу сфероїдизувального відпалювання металовиробу шляхом проведення неізотермічної витримки, що дозволяє покращувати технологічні властивості металу з забезпеченням високої дисперсності та значної однорідності структури металопрокату на всій його площині перерізу [95]. Безпосередньо технологічний процес ТО металопроката має низку переваг, серед яких висока продуктивність, суттєво знижене енергоспоживання, функцію контролю певних технологічних параметрів, характерних для режимів неізотермічної обробки металу.

Поставлену задачу досягають за рахунок того, що в такій установці для інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталевих виробів вдається задіяти такі наявні в ній пристрої: розмотувальний, правильно-тяговий та нагрівальний. При чому нагрівальний пристрій, виконано у вигляді відповідного генератора, який з'єднується з індуктором. Установа також оснащена камерами регламентованого підстуджування металу (вони обладнані пірометрами і необхідними виконавчими пристроями). Установа відрізняється додатково встановленою камерою неізотермічної витримки, певним пристроєм інтенсивної сфероїдизації, пірометрами,

які з'єднано з блоком керування та спеціальними виконавчими пристроями. До того ж установку оснащено багатопроцесорною системою зі встановленим на ній спеціально орієнтованим ПЗ. Своєю чергою багатопроцесорний обчислювальний комплекс з'єднується через засоби інформаційного двоспрямованого інтерфейсу зв'язку з блоком керування. При цьому двоспрямований інформаційний інтерфейс для збору даних приєднується до блока керування та відповідних виконавчих пристроїв. Саму багатопроцесорну систему (БОС) було виконано як окремий модуль. Завдяки дії спеціального ПЗ така система має можливість задавати й контролювати певні температурні режими металовиробу під час його нагрівання й витримці, а також контролювати режим неізотермічного відпалювання сталі. Система налаштовано на контроль теплових режимів обробки металу в інтервалах температур відпалювання.

Застосування БОС з її програмним забезпеченням передбачає на основі використання відповідної математичної моделі нагрівання металу у виробничих умовах виконувати процес контролю нагрівання дроту до моменту досягнення ним аустенітного стану в діапазоні температур фазової перекристалізації за всією площиною перерізу сталевого виробу. Далі, після розв'язування оберненої задачі теплопровідності (ОЗТ), виконують контроль заданого режиму неізотермічної витримки металу в інтервалах температур відпалювання за всією площиною перерізу металу. Використання такої установки для реалізації інтенсивного режиму сфероїдизувального відпалювання металу обумовлює рівномірне розподілення глобул фази цементиту у феритній матриці. Такий процес забезпечує задані механічні властивості металовиробу, необхідні для виконання подальшої холодної деформації.

Основні принципи роботи установки для інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталевого виробу проілюструємо за допомогою її структурної схеми, яку зображено на рис. 5.1.

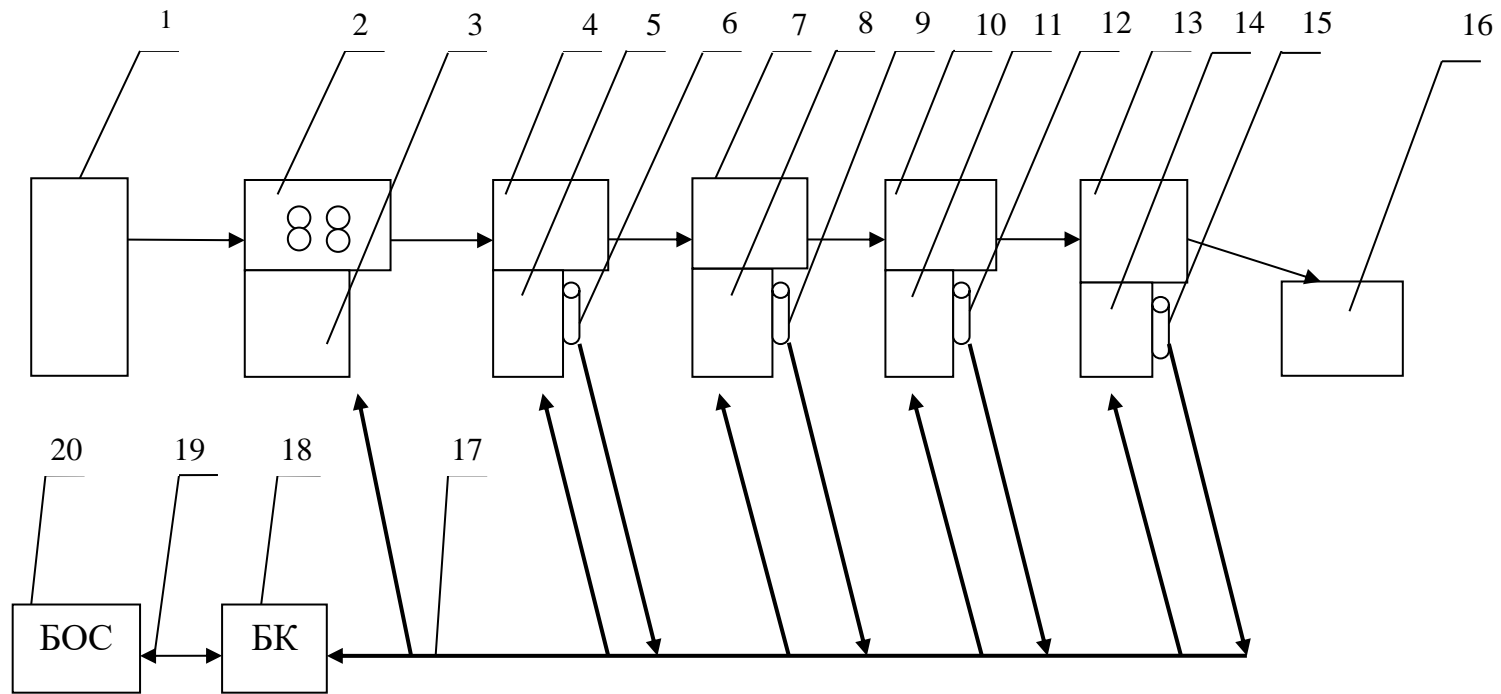


Рис. 5.1. Структурна схема установки для інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталевих виробів

На рис. 5.1 подано відповідну схему, на якій позначено блоки установки, це зокрема розмотувальний пристрій 1; правильно-тяговий пристрій 2, який обладнано виконавчим механізмом 3; індуктор нагрівального пристрою 4; генератор з певним виконавчим механізмом 5; пірометр 6; камера ізотермічної витримки металу 7 з виконавчим механізмом 8; через цифру 9 позначаються пірометри; камера регламентного підстуджування металу<sup>10</sup> з виконавчим механізмом 11, який регулює надходження водоповітряної суміші; пірометр 12; цифрою 13 позначається камера неізотермічної витримки з її виконавчим механізмом 14; пірометр 15; пристрій для переміщення дроту для подальшого технологічного циклу 16; двоспрямований інформаційний інтерфейс 17 для збору даних з таких пристроїв: 3, 6, 9, 12, 15, які приєднується до блока керування 18, а також до таких виконавчих механізмів 3, 5, 8, 11, 14 відповідних пристроїв; двоспрямований інформаційний інтерфейс зв'язку 19 блока керування багатопроцесорної системи 20.

Установка для інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталевого виробу функціонує в такій послідовності. Спочатку з розмотувального пристрою 1 за допомогою правильно-тягового пристрою 2 дріт подають в індуктор нагрівального пристрою 4, де він нагрівається до його переходу в аустенітну область, досягаючи температури фазової перекристалізації. При цьому температура нагрівання металу контролюється відповідним пірометром (6). Температурний режим підтримується за допомогою блока керування 18 та багатопроцесорної обчислювальної системи 20. Сигнал від пірометра 6 через засоби інформаційного двоспрямованого інтерфейсу 17 надходить у блок керування 18, а потім вже через інформаційний двоспрямований інтерфейс 19 – до засобів багатопроцесорної системи 20, де згідно з результатами розв'язування математичної моделі, яка задається прямою задачею теплопровідності, відбувається безпосередньо процес регулювання потужностей генератора 5. Далі розігрітий зразок металу надходить до камери ізотермічної витримки 7, тут необхідна температура регулюється на основі використання виконавчого механізму 8. Потім сигнал від пірометра 9 через двоспрямований інформаційний інтерфейс 17 надходить у блок керування 18, а вже потім завдяки інформаційному двоспрямованому інтерфейсу 19 – до засобів багатопроцесорної системи 20, тут відповідно до

отриманих результатів розв'язку заданих математичних моделей ізотермічної витримки, відбувається регулювання температурного режиму засобами виконавчого механізму 8. Далі металевий виріб переходить до камери регламентованого підстуджування 10. В залежності від заданого режиму термічної обробки, марки певної сталі та самого діаметра дроту визначається необхідна швидкість температури підстуджування металу в діапазоні від 650 °С до 600 °С. У цьому температурному інтервалі обробки аустеніт втрачає вуглець і, досягши необхідної його концентрації, зазнає певних поліморфних змін, перетворившись на ферит. Таким чином розпад аустеніту здійснюється за аномальним механізмом. Саму температуру підстуджування зразка контролює блок керування 18 і багатопроцесорний обчислювальний комплекс 20, де з урахуванням показників зафіксованих пірометром 12, і відповідно до певних результатів щодо розв'язування математичної моделі ОЗТ виконавчий механізм 11 подає певну водоповітряну суміш, причому шляхом збільшення або зменшення її кількості, в залежності від необхідного температурного режиму підстуджування. Далі дріт потрапляє до камери неізотермічної витримки 13, де температура регулюється за допомогою виконавчого механізму 14. Під час неізотермічної витримки металу в ньому завершується процес утворення квазіевтектоїду (перліту) у тих зонах, які містять підвищену концентрацію вуглецю і готові цементитні частинки.

Зауважимо, що в установці інтенсивної сфероїдизації відбувається зміна температурного режиму зі швидкістю від 13 до 22 °С/хв шляхом досягненням підкритичної температури  $A_{c1}$  (у такій температурній зоні виконується інтенсивна сфероїдизація цементитних частинок). А вже потім через пристрій подачі 16 метал переміщується на подальший технологічний цикл обробки.

Для більш детального висвітлення перебігу процесів, які відбуваються у запропонованій установці розглянемо схему її основних контурів керування для інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталевого виробу, яку подано на рис. 5.2.

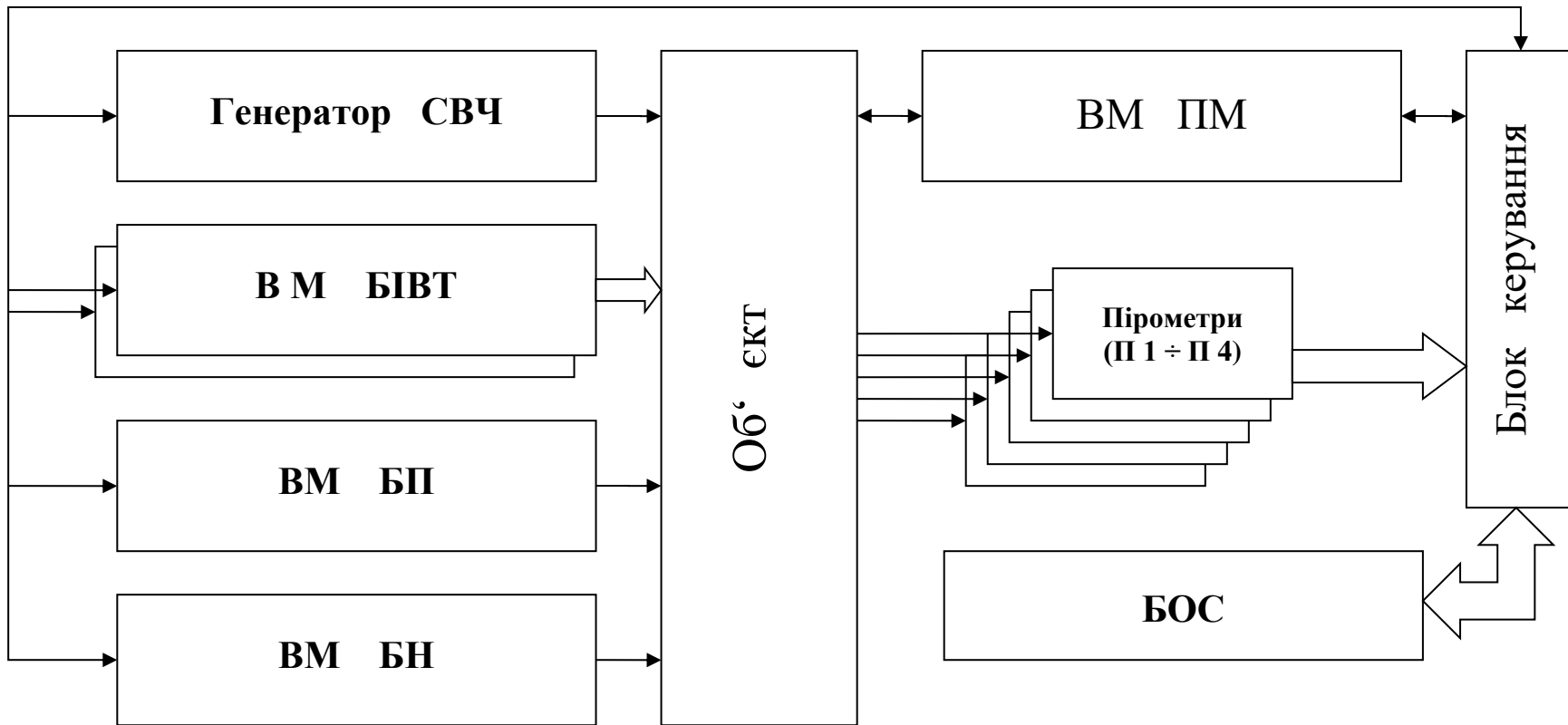


Рис. 5.2. Схема системи керування установкою інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталевих виробів

На рис. 5.2 прийнято такі позначення: БОС – багатопроцесорна система; ВМ ПМ – виконавчий механізм протяжного механізму; ВМ БІВТ – виконавчі механізми певних блоків ізотермічної витримки температури металу; ВМ БНВТ – виконавчий механізми блока неізотермічної витримки температури металу; ВМ БП – виконавчий механізм блока підстуджування металу; ВМ БН – виконавчий механізм блока нагрівання дроту.

Наведена система керування містить блоки, які можуть отримувати інформацію про необхідні поточні параметри кожного з контрольованих процесів. Особливість такої системи пояснюється тим, що для керування кожним з чотирьох процесів технологічної обробки металу розв'язують двовимірну задачу теплопровідності. Це дає змогу програмним засобам БОС контролювати такі температурні режими, які протікають як по всій площині перерізу заданого зразка, так і за його довжині. Безпосередньо контроль вказаних температурних режимів відбувається в центрі площини перерізу дроту.

## **5.2. Теоретичне обґрунтування напрямів комплексної інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталі**

Системне висвітлення процесів комплексної інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталі й розгляд можливих технологічних аспектів реалізації інтенсивних режимів відпалювання в потокових лініях – усе це дає можливість визначити теоретичні засади згаданих процесів.

Отже, задача досліджень має на меті інтенсифікувати сфероїдизувальне відпалювання сталі шляхом проведення неізотермічної витримки з використанням для нагрівання металу внутрішнього теплоносія, при цьому суттєво скоротити тривалість процесу сфероїдизувального відпалювання та одночасним поліпшенням технологічних властивостей сталевих виробів – надавши йому високу дисперсність та однорідність структури за всій площині його перерізу. Такий підхід дозволяє використовувати запропоновану



установку в модульних потокових лініях і автоматизованих комплексах підготовки сталей до відповідного процесу ХОШ.

Для дослідження процесу інтенсифікації сфероїдизувального відпалу сталі, візьмемо за основу рівняння, що описує швидкість процесу сфероїдизації, котре як і більшість процесів структурного перетворення, має такий вигляд [46, 47, 96]:

$$V_{sp} = A \cdot KF \cdot TF, \quad (5.1)$$

де  $A$  – коефіцієнт, значення якого залежить від типу структурного перетворення;  $KF$  – кінетичний чинник;  $TF$  – термодинамічний чинник.

Далі розглянемо основні особливості структурних перетворень металу. На першому етапі відпалювання довгомірного виробу процес сфероїдизації відбувається під впливом кінетичного чинника  $KF$ . При цьому аналітичне співвідношення для визначення такого чинника описується таким співвідношенням:

$$KF = \gamma \cdot e^{-\frac{\Delta G_a^D}{R \cdot T}}, \quad (5.2)$$

де  $\gamma$  – частота теплових коливань;  $\Delta G_a^D$  – енергія активації дифузії компонента, який зумовлює зміну морфології цього структурного компонента;  $R$  – газова константа;  $T$  – температура.

Процес інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталевих виробу здійснюється за рахунок термодинамічного чинника  $TF$ , який визначається з такого співвідношення :

$$TF = \left(1 - e^{-\frac{\Delta G_{TDS}}{R \cdot T}}\right) \cdot \text{grad}(\Delta G_{TDS}), \quad (5.3)$$

де:  $\Delta GTDS$  – термодинамічна рушійна сила цього структурного перетворення (СП);  $\text{grad}(\Delta GTDS)\text{grad}\Delta GTDS$  – градієнт термодинамічної рушійної сили цього СП.

Попередньо зауважимо, що аналіз співвідношень (5.2) та (5.3) показує таку залежність, коли величина  $KF$  є зростаючою функцією температури, то  $TF$  являє собою спадну функцією температури.

Безпосередньо графічна інтерпретація змінення значень термодинамічного  $TF$  та кінетичного  $KF$  факторів у процесі комплексної сфероїдизації цементиту подана на рис. 5.3.

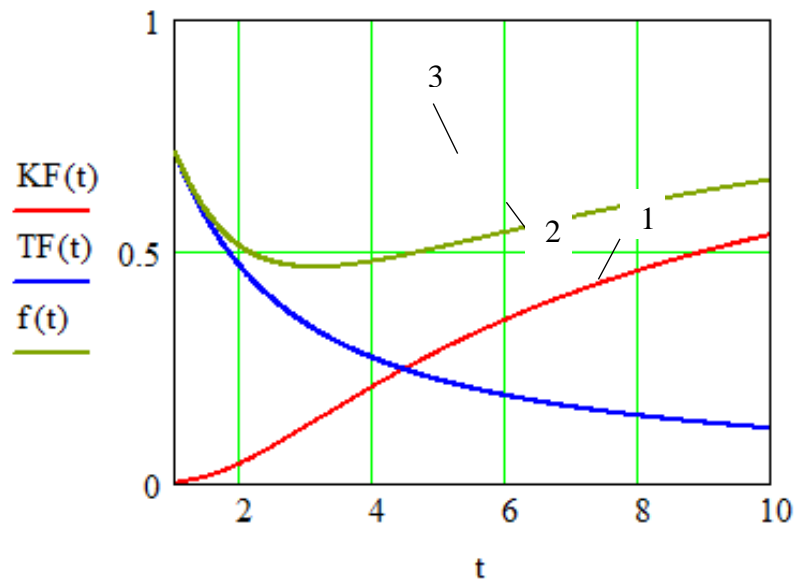


Рис. 5.3. Графічна інтерпретація зміни значень термодинамічного та кінетичного факторів у процесі комплексної сфероїдизації цементиту

Тут лінія 1 показує вплив термодинамічного фактора на процес інтенсифікації сфероїдизації цементиту, лінія 2 – вплив кінетичного фактора на процес інтенсифікації сфероїдизації цементиту, лінія 3 ілюструє повну тенденцію зміни згаданих факторів у процесі сфероїдизації цементиту. Проаналізувавши графічні залежності впливу факторів на технологічний

процес сфероїдизації металу, можемо сформулювати деякі теоретичні положення.

*Визначення 1.* Точку перетину ліній впливу на процес сфероїдизації термодинамічного та кінетичного факторів називаємо точкою термодинамічної рівноваги.

*Визначення 2.* Інтервал процесу сфероїдизації до точки термодинамічної рівноваги (коли  $TF > KF$ ) називаємо інтервалом *процесу активної сфероїдизації цементита*.

*Визначення 3.* Інтервал процесу сфероїдизації після точки термодинамічної рівноваги (коли  $TF < KF$ ) називаємо інтервалом процесу пасивної сфероїдизації цементиту.

Отже, в інтервалі, коли відбувається активна сфероїдизація цементиту, термодинамічна рушійна сила цього процесу може змінювати швидкість його перебігу більше, ніж на три порядки [96]. Саме на цьому інтервалі сфероїдизації цементиту спостерігається процедура інтенсифікації сфероїдизації шляхом неізотермічної витримки. Проте, як показано на рис. 5.3 (лінія 1) така складова являє собою спадну функцію температури. В той же час кінетичний фактор (рис. 5.3, лінія 2) є зростаючою функцією температури. Ця особливість і є вирішальною для неізотермічної витримки через підвищення температури із певною швидкістю. Такий процес дозволяє компенсувати зменшення величини  $TF$  за рахунок зростання фактора  $KF$ . З огляду на таку залежність між величинами факторів, можна констатувати загальну тенденцію щодо перебігу комплексної інтенсивної сфероїдизації цементиту, за рахунок основних властивостей неізотермічної витримки металу, що показує на рис. 5.3 лінія 3. Отже, дослідження еволюції скорочення тривалості сфероїдизувального відпалювання сталі дозволяє відзначити основні чинники, які впливають на його *комплексну інтенсифікацію*.

По-перше, набуває ваги проведення регламентації початкової структури металу за рахунок попередньої ТО, яка виключає утворення структурно-вільного фериту, а перетворення аустеніту на бейніт здійснюється за типом

ізотермічного загартування. Таким чином забезпечується виконання рівномірного розподілу глобул цементита у феритній матриці, що не викликає можливої появи в металі в'язких тріщин.

По-друге, використання тих температурних режимів сфероїдизації цементита, які враховують особливості зміни термодинамічного ( $TF$ ) і кінетичного ( $KF$ ) факторів у процесі розвитку структурного перетворення. За таких умов для сфероїдизації цементиту використовується неізотермічна витримка під час якої температуру нагрівання зразка підвищують з певною швидкістю. Це компенсує зменшення величини  $TF$  збільшенням фактора  $KF$ .

По-третє, нагрівання зразків відбувається за рахунок внутрішнього теплоносія на стадії сфероїдизації цементиту з отриманням ефекту Гевелінга для гетерофазних структур [20]. При цьому такий ефект забезпечується завдяки локальному підвищенню температури в мікрообластях у міжфазній зоні ферит-цементит, тобто виходячи з існуючих уявлень про механізм сфероїдизації, саме там, де швидкість дифузії компонентів є вирішальною для необхідного структурного перетворення.

### 5.3. Математичне забезпечення процесів моделювання термічної обробки металевого виробу

У багатопроцесорній системі з її спеціальним ПЗ, містяться математичні моделі, які задаються рівняннями теплопровідності, тобто

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + W, \quad (5.4)$$

у цьому випадку критерій Фур'є  $\tau = \frac{at}{R^2}$ , якщо  $\tau > 0$ ,  $W$  – питома потужність джерел тепла, Вт/м<sup>2</sup>.

Безпосередньо крайові умови такого рівняння подаються наступним чином:

$$T(0, r, z) = f(r, \tau);$$

$$T(\tau, 1, z) = var;$$

$$\frac{\partial T(\tau, 0, z)}{\partial r} = 0;$$

$$T(\tau, 0, z) \neq 0.$$

Два останні з перелічених співвідношень свідчать, що величина температури в осі циліндра протягом усього процесу теплообміну має бути скінченною. У координаті  $z$  можуть задаватися граничні умови в залежності від певних особливостей розв'язку задачі. Зокрема це можуть бути умови першого, другого або третього роду. Рівняння (5.4) розв'язують шляхом застосування методів розщеплення. Суть таких методів полягає в перетворенні складного оператора (5.4) до кількох простих виразів. Такий підхід буде дозволяти інтегрувати дане рівняння через послідовність процесу інтегрування заданих одновимірних рівнянь простої структури. Беручи до уваги суттєву складність самої математичної моделі (5.4), потрібно розробити економічні алгоритми для обчислення ефектів певного керування функціями заданої установки.

Розглянемо процес конструювання вказаних алгоритмів за допомогою конструкції схем розщеплення рівняння (5.4). На описовому рівні ідею побудови схем розщеплення за довжиною та радіусом зразка можна викласти в поданій нижче послідовності. Диференціальну задачу, сформульовану виразом (5.4), подамо в такому вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = A \cdot f, \tag{5.5}$$

де  $A$  – певний оператор за просторовими змінними, наприклад:

$$Af = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}. \quad (5.6)$$

Значення функції  $f(z, r, t_p)$  за вже відомими величинами  $f(z, r, t_{p-1})$ , якщо  $t_p = p \cdot Dt1$  ( $Dt1 = (t_p - t_{p-1})$ ), представляє собою певну відстань щодо сіткових вузлів на заданому часовому інтервалі ( $p = 1, 2, 3, \dots$  – певні номери вузлів), відповідно такій формулі:

$$\begin{aligned} f(z, r, t_{p-1} + Dt1) &= f(z, r, t_{p-1}) + Dt1 \frac{\partial f}{\partial t} + O(Dt1^2) \equiv \\ &\equiv (E + Dt1 \cdot A)f(z, r, t_{p-1}) + O(Dt1^2), \end{aligned}$$

де  $E$  – одиничний оператор.

Праву частину рівняння (5.6) зведемо до такого вигляду:

$$Af = A_1 f + A_2 f.$$

Тоді його можна записати таким чином:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = A_1 f + A_2 f. \quad (5.7)$$

Це рівняння допускає розщеплення на такі два вирази:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial \tau} &= A_1 v, & t_{p-1} \leq t \leq t_p, \\ v(z, r, t_{p-1}) &= f(z, r, t_{p-1}), \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} &= A_2 w, & t_{p-1} \leq t \leq t_p, \\ w(z, r, t_{p-1}) &= v(z, r, t_p). \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

Відзначимо, що

$$w(z, r, t_p) \equiv f(z, r, t_{p-1}) + O(Dt1^2). \quad (5.10)$$

Рівність (5.10) дозволяє для кожного інтервала часу, коли  $t_{p-1} \leq t \leq t_p$ , замість рівняння (5.5), послідовно розв'язати два рівняння (5.8) і (5.9).

Для практичного розв'язування заданих рівнянь у вигляді (5.8) та (5.9) вони формально апроксимуються згідно з певними різницевиими схемами. У таких умовах виникає деяка різницева схема розщеплення, яка дає змогу в два етапи обчислювати значення функції, керуючись  $f(z, r, t_p)$  за вже відомим значенням  $f(z, r, t_{p-1})$ .

Перший етап моделювання ТО полягає в обчисленні величини  $v(z, r, t_p)$  за відомими значенням функції  $f(z, r, t_{p-1})$ , а другий етап розв'язування – це обчислення такого виразу:  $f(z, r, t_p) = w(z, r, t_p)$ , коли на основі першого етапу розрахунків стає відомо, що  $w(z, r, t_{p-1}) = v(z, r, t_p)$ .

Наведені тут міркування мають евристичний характер. Після того, як різницеву схему розщеплення побудовано, тоді для числового розв'язку задачі необхідно якимось методом перевірити особливості її апроксимації та стійкості. Виконане вище розщеплення двовимірного рівняння (5.5) на два одновимірних (5.8), (5.9) можна трактувати як наближену заміну поширення тепла по площині  $Ozr$  протягом часу, який перебуває в таких межах:  $t_{p-1} \leq t \leq t_p$  ( $p = 1, 2, 3, \dots$ ), на два відповідних процеси. Для першого з них, описаного першим рівнянням, подумки вводять певні теплоізоляційні перегородки, що мають перешкоджати поширенню тепла в напрямку осі  $Or$ . Далі, після настання часу  $Dt_1$ , замість згаданих перегородок, вводяться інші, що повинні перешкоджати поширенню тепла за напрямком осі  $Oz$ , а колишні перегородки подумки прибирають. Поширення тепла вже протягом часу  $Dt_1$  тепер описується другим рівнянням (5.9).

Зауважимо, що в заданій постановці задача керування процесами (як і сама задача синтезу) відноситься до певного класу обернених задач. Така обставина пояснюється тим, що в ній передбачено призначення керуючих параметрів шляхом заздалегідь заданого, певним чином необхідного результату (а це і є

принцип оберненості керування). Одним із алгоритмів розв'язування ОЗТ виступає метод “вилки” коли необхідне попереднє визначення певного початкового відрізка. Тоді розв'язок даної задачі буде реалізовано в два етапи. На першому етапі відбувається відокремлення від значення функції мінімуму нев'язки, а вже на другому етапі знаходять значення мінімуму шуканої функції за допомогою відокремленого інтервалу необхідного значення кореня. Така процедура реалізується типово для описаного підходу. Інакше кажучи, за умов коли параметр  $\vartheta$  є деяким дійсним значенням шуканого кореня, тобто, якщо  $a \leq \vartheta \leq b$ , а  $f(\vartheta) = 0$ , то виникає можливість обчислення такого числа  $w$ , коли будуть задовольнятися умови:  $a \leq \vartheta \leq b$  та  $|\vartheta - w| < \varepsilon$ , тобто воно буде значно меншим від деякого наперед заданого значення малого числа  $\varepsilon$ . Вказаний підхід включено до складу розробленого математичного апарату керування багатопроцесорною обчислювальною системою.

Зауважимо, що протягом всіх п'яти циклів ТО металу застосовується математична модель, описана залежністю (5.1). За таких умов результати моделювання будуть відноситися до циклу первинного нагрівання металовиробу. Сама проблема моделювання буде полягати в тому, щоб забезпечити необхідну точність і стійкість обчислень, а це зробити можна тільки на основі застосування розрахункової сітки зі значною кількістю вузлів, тим самим виконуючи безліч ітерацій. В результаті чого кількість арифметичних операцій, необхідних для розрахунку заданих температурних полів нагрівання, буде перебувати в межах  $10^7 \div 10^8$  обчислювальних вузлів. При цьому, якщо обрати крок з часовою ознакою  $10^{-2}$  с, то буде необхідно збільшити загальну кількість вузлів для певних обчислень до  $10^{30}$  і навіть більше. Звісно, що однопроцесорні обчислювальні системи не в змозі впоратись із таким навантаженням, моделюючи задачу в реальному масштабі часу. В такому випадку найбільш доцільним буде використання багатопроцесорних систем. Більше того, при розв'язуванні задач подібного класу необхідно підготувати спеціальне математичне забезпечення, огляд



якого подано в дослідженнях [97 – 105]. Такий підхід і було задіяно для проведення технологічного процесу описаного вище типу термічної обробки металовиробу.

#### **5.4. Користувацьке програмне забезпечення процесів моделювання термічної обробки металевго виробу**

До виконання програмних обчислень згідно користувацькими завданнями було залучено мову системного програмування C++ і стандартну бібліотеку *mpich-1*. При складанні програми було задіяно метод модульного програмування. Цей метод має ту перевагу, що кожна підпрограма може налагоджуватися окремо, а це забезпечує її правильну декомпозицію.

Зазвичай програма містить такі основні розділи:

- оголошення й співвідношення;
- текст процедур і функцій;
- основний блок.

Для реалізації механізму паралельних обчислень в основний блок закладено логіку розпаралелювання. Під час запуску програми внаслідок ініціалізації кожному *mpich*-вузлу надається унікальний ідентифікатор (з номерами від 0 до 255). На основі цього ідентифікатора визначають алгоритм розпаралелювання, блок-схему якого подано на рис. 5.4. Виконаємо аналіз цього алгоритму.

Нульовий процес (як правило, запущений на звичайній ЕОМ) бере на себе роль координатора обчислень (*master*), забезпечуючи пересилання даних і задач на адресу останніх уведених *slave*-процесів. При цьому він не виконує жодних обчислень.

Алгоритм розподілу завдань між *slave*-процесами полягає в циклічному перебиранні доступних *mpich*-процесів з подальшою роздачею даних,

зумовлених поточним станом обчислення, відсиленням команди на виконання обчислень, прийомом результатів. а далі перемиканням на роботу наступного вузла.

Розв'язування багатовимірних та обернених задач здійснюються шляхом прогону за координатами  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ . З цією метою було введено три ідентифікатори обчислень і один додатковий для завершення ведених процесів, а саме:

1. #define ACTION\_QUIT 0
2. #define ACTION\_RYFP 1
3. #define ACTION\_RXFP 2
4. #define ACTION\_RZFP 3

На початку введення в дію основного блока програми проводиться ініціалізація *MPI*-процесів засобами *mpich*-бібліотеки і визначається ідентифікатор поточного процесу відповідно до числа зареєстрованих вузлів, тобто

```
MPI_Init (&argc &argv);
```

1. MPI\_Comm\_rank (MPI\_COMM\_WORLD &myrank);
2. MPI\_Comm\_size (MPI\_COMM\_WORLD &size);

Після цього в кожному вузлі відбувається первинна ініціалізація початкових умов і даних обчислень, проводиться підготовка до роботи вузла-координатора і введених *slave*-вузлів.

Далі здійснюється логічний розподіл потоку обчислень на дві гілки, а саме:

1. if (myrank == 0) {
2. // код координатора обчислень
3. } else {
4. // код усіх ведених вузлів
5. }

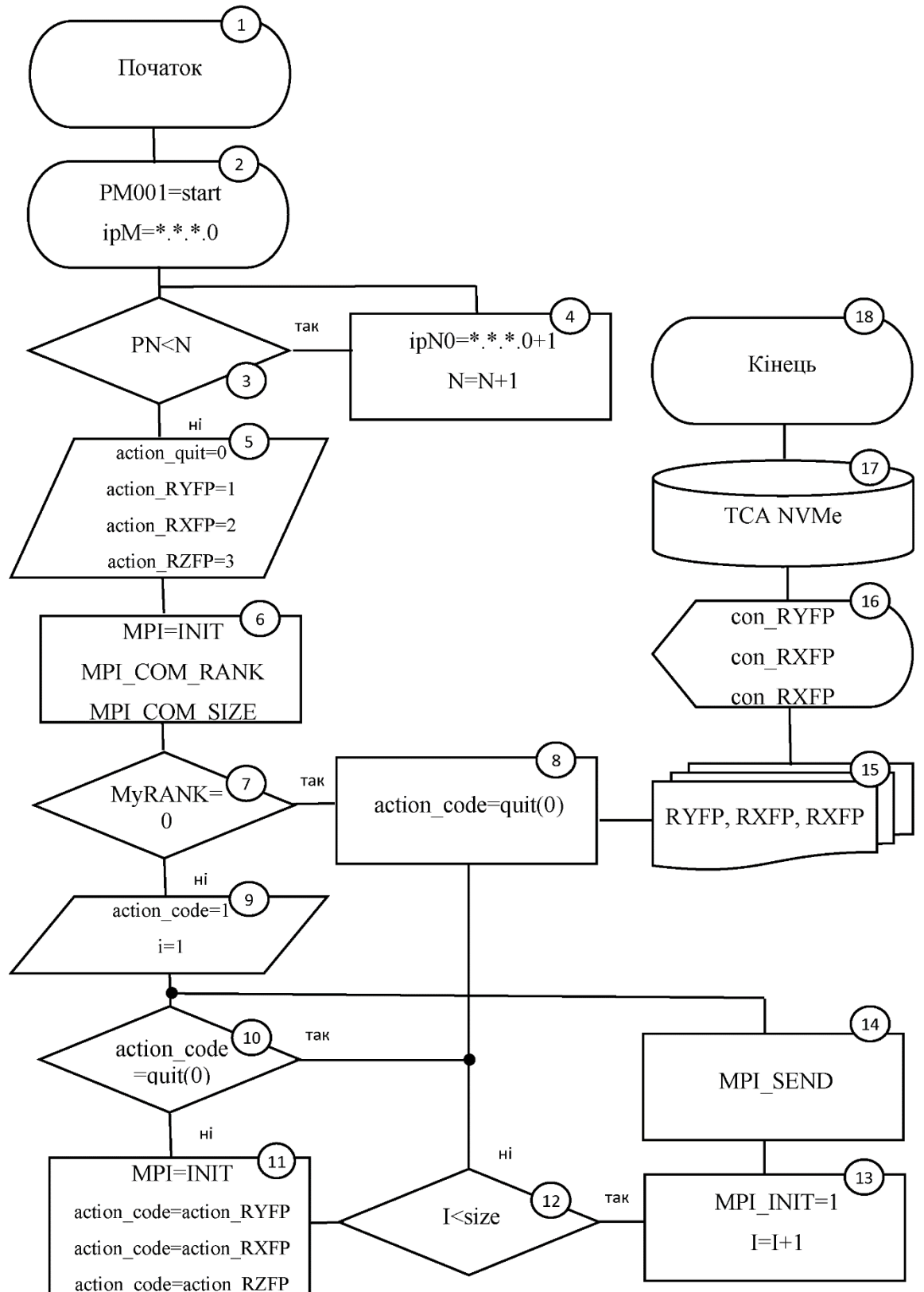


Рис. 5.4. Блок-схема алгоритму розпаралелювання обчислень у задачах моделювання термічної обробки металевго виробу

Зокрема код усіх введених (*slave*) вузлів являє собою нескінченний цикл, в якому відбувається очікування повідомлення від координатора (*master*). Як уже наголошувалося раніше, усього може бути чотири задачі.

Нижче подаємо програмний матеріал одного із завдань:

```

1. } else {
2. while (1) {
3. MPI_Recv (&action_code, 1, MPI_INT, 0, 99, MPI_COMM_WORLD &status);
4. if (action_code == ACTION_QUIT) {
MPI_Finalize();
return 1;
5. }
6. if (
(action_code == ACTION_RYFP)
(action_code == ACTION_RXFP)
(action_code == ACTION_RZFP)
7. ) {
8. // обчислення
9. }
10. }
11. }

```

Під час надходження одного з кодів, наприклад, *ACTION\_RYFP*, або *ACTION\_RXFP*, або *ACTION\_RZF*, виконуються обчислення, а їхні результати відправляються координатору. Коли ж надходить код *ACTION\_QUIT*, то відбувається завершення роботи вузла і вихід з програми.

Зауважимо, що коли в гілці ведених вузлів триває очікування вхідних повідомлень, то в головній гілці керування обчислювальним процесом відбувається розподіл завдань відповідно до циклу почергово серед усіх вузлів. А після виконання всіх операцій головний вузол ініціює розсилання повідомлень про завершення всіх ведених процесів, тобто

```

1. code = ACTION_QUIT;
2. for (i=1; i<size; i++) {

```

3. MPI\_Send (&code, 1, MPI\_INT, i, 99, MPI\_COMM\_WORLD);
4. }

Після цього головний вузол (*master*) лишається єдиним запущеним процесом, роздруковує результати обчислень і завершує свою роботу.

### **5.5. Експериментальні дослідження процесу термообробки металу**

Скорочення тривалості сфероїдизувального відпалювання дроту забезпечено завдяки режиму обробки заготовки, у якому передбачено глибоке переохолодження та неізотермічна витримка з використанням нагріву внутрішнім теплоносієм (електроконтактний або індукційний нагрів). При цьому підготовлена регламентована структура заготовки (початковий бейнітний структурний стан) зумовлює максимальний ступінь рівномірності розподілу глобул цементиту для феритної матриці. Для підтвердження дії вказаних складових комплексної інтенсифікації процесу сфероїдизації цементиту низьковуглицевих сталей проведено кілька експериментів. Відпрацювання конкретного режиму сфероїдизувального відпалу проводили, обробляючи катанку діаметром 6,5 мм із сталі марок 20Г2Р та 30Г1Р, з тих причин, що такі марки, як правило, застосовуються для виготовлення особливо міцних кріпильних виробів способом ХОШ.

Хімічний склад досліджуваних марок сталі подано в табл. 5.1, він задовольняє вимоги ДСТУ 3684-98. При цьому співвідношення в них бору й азоту забезпечує як збільшення прожарюваності заготовки, так і подрібнення зерна аустеніта під час нагрівання.

Режим інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання відпрацьовували, скориставшись лабораторною установкою електроконтактного нагрівання, обладнаною пристроями водоповітряного охолодження і системою контролю, регулювання та реєстрації показників процесів нагрівання й охолодження. Дослідження мікроструктури сталі проводили за допомогою мікроскопа «Neophot-21». Механічні властивості зразків (часовий опір, відносне

подовження й  $\delta$  звуження) фіксували, піддаючи їх одноосьовому розтягуванню на машині FU-10000ez, а твердість за критерієм Бринеля – за допомогою приладу ТШ-2М.

Таблиця 5.1

Хімічний склад досліджуваних марок сталей 20Г2Р і 30Г1Р

Марка сталі	Масова частка елемента, %										
	C	Si	Mn	Al	Ti	S	P	Cr	Cu	B	N
20Г2Р	0,20	0,26	1,20	0,04	0,040	0,011	0,026	0,20	0,04	0,003	0,009
30Г1Р	0,30	0,30	1,02	0,02	0,017	0,007	0,024	–	–	0,0007	0,016

**Експеримент 1.** За початкову було взято заготовку з ферито - перліто - бейнітною структурою. Термічна обробка сталі 20Г2Р здійснювалася шляхом нагрівання заготовки в межах міжкритичної зони температур ( $A_{C1} - A_{C3}$ ). Згідно з термокінетичною діаграмою для сталі 20Г2Р встановлено такі критичні значення температур:  $A_{C1} = 725 \text{ }^{\circ}\text{C}$  та  $A_{C3} = 795 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Нагрівання відбувалось до такого значення:  $A_{C1} + (10 - 30^{\circ}\text{C})$ . Нагрівання металу до певних температур здійснювалося зі швидкістю  $V_n = 20 - 25 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$  за допомогою індуктора. Наступним етапом обробки матеріалу був процес ізотермічної витримки протягом 30 с. проходження цих етапів режиму відпалювання дроту (інтенсивне нагрівання з подальшою ізотермічною витримкою) забезпечило в короткий термін підготовку структурного стану заготовки до подальших структурних перетворень. Далі дріт надходив у камеру регламентованого пістуджування де піддавався охолодженню водо – повітряною сумішшю з швидкістю  $V_o = 15 - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$  до температури  $550 - 520 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тривалість цього етапу досягає 8 – 10 с. Дотримання описаного режиму термічної обробки металовиробу зумовлює розпад переохолодженого аустеніту при більш низьких температурах в порівнянні зі стандартними (класичними) процесами сфероїдизації низьковуглецевих сталей. На цій стадії обробки забезпечення високої швидкості охолодження металу після аустенізації до настання

згаданих температур виключає утворення структурно вільного фериту, а перетворення аустеніту відбувається в інтервалі температур, характерному бейнітному. При досягненні зазначених температур дріт надходить до камери неізотермічної витримки з підвищенням температури з певною швидкістю нагрівання. Завдяки електроконтактному способу забезпечується швидкість нагрівання дроту в межах  $15 - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до температур  $620 - 660 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . На цьому етапі розв'язується задача інтенсивного охолодження зразка з одночасним його підігріванням. Завдяки локальному підвищенню температури в зразку швидкість дифузії компонентів металу буде вирішальною для тих структурних перетворень, що відбуваються в цій зоні. Тому протягом нетривалого періоду часу (тривалість неізотермічної витримки становить  $15 - 20 \text{ с.}$ ) спостерігається стрімке прискорення сфероїдизації цементиту з одночасним високим ступенем рівномірності розподілу подрібнених глобул цементиту в її феритній матриці. В подальшому настає остаточне охолодження матеріалу без будь-якої постійної теплової підтримки, після чого зразок переходить до наступного технологічного циклу. Графічну інтерпретацію режиму термічної обробки металовиробу відображено на рис. 5.5.

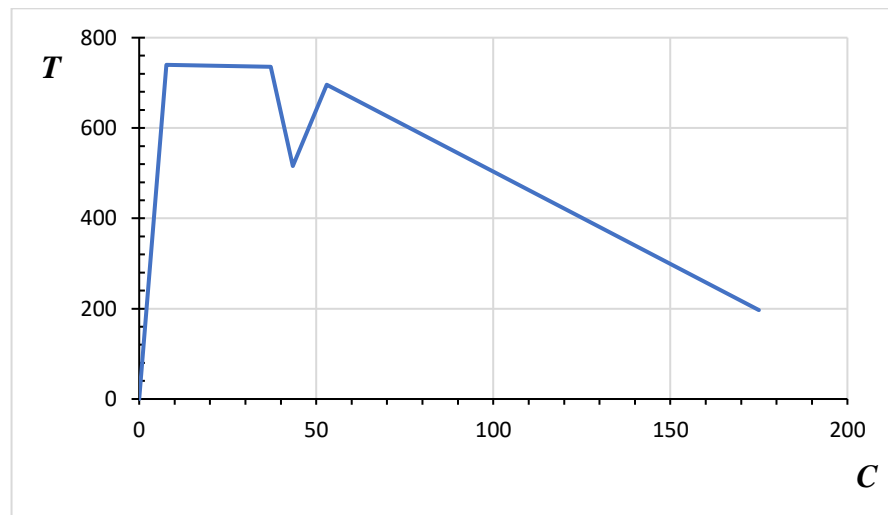


Рис. 5.5. Графічна інтерпретація режиму термічної обробки металовиробу

У ході експерименту було проаналізовано механічні властивості й показник твердості металу, а також результати структуроутворення в матеріалі зразків. Після проведення сфероїдизувального відпалювання було встановлено, що механічні властивості зразків задовольняють вимоги ДСТУ 3684-98. На рис. 5.6, *а* зображено початковий стан ферито-перліто-бейнітної структури металу. Остаточний вигляд мікроструктури матеріалу після інтенсивної сфероїдизації показано на рис. 5.6, *б*. Мікроструктура являє собою перліт зернистий за стандартною оцінкою в 2 бали, його твердість становить 148 – 152 НВ.

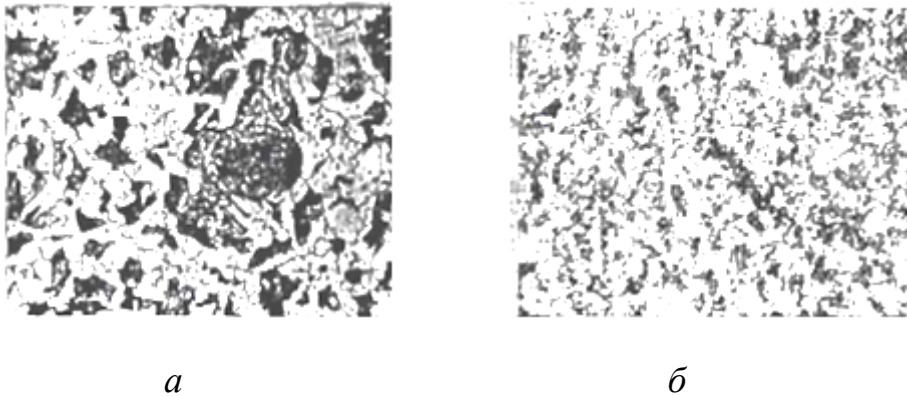


Рис. 5.6. Зміни в мікроструктурі металевого зразка під впливом експерименту 1

Як бачимо, після сфероїдизації карбідної фази металу під впливом описаних режимів ТО заготовок забезпечується надання даному матеріалу структури зернистого перліту. Причому запропонований процес швидкісної сфероїдизації зумовлює більш рівномірне розподілення глобул цементиту для феритної матриці (рис. 5.6, *б*).

**Експеримент 2.** За початкову було взято заготовку ферито-бейнітної структури. Процес термічної обробки матеріалу було виконано за технологією, що була запроваджена в експерименті 1.



У ході дослідження було проведено металографічний аналіз структури зразків, а також проаналізовано механічні властивості металу, котрі як з'ясувалося, задовольняють вимоги державного стандарту. На рис. 5.7, *а* показано бейнітну структуру металу на початковому етапі експерименту. Остаточний вигляд мікроструктури заготовки (зернистий перліт) після інтенсифікації процесу сфероїдизації зображено на рис. 5.7, *б*. Мікроструктура зразків за стандартною оцінкою становить 1 бал, величина твердості дорівнює 150 – 152 НВ.

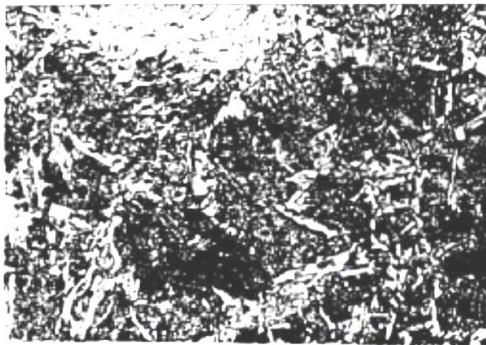
*а**б*

Рис. 5.7. Зміни в мікроструктурі металевого зразка під впливом експерименту 2

Експеримент проводили на зразках сталі марки 30Г1Р. За початкову було взято бейнітну структуру заготовки. Процес ТО матеріалу було здійснено за технологією, запровадженою в експерименті 1.

У ході дослідження було проведено металографічний аналіз структури зразків, а також проаналізовані механічні властивості дослідженого металу (табл. 5.2). На рис. 5.7, *а* відображено бейнітну структуру металу на початковому етапі експерименту. Остаточний вигляд мікроструктури заготовки (зернистий перліт) після інтенсифікації процесу сфероїдизації

подається на рис. 5.7, б. Мікроструктура зразків за стандартною оцінкою становить 1 бал, величина твердості дорівнює 148 – 152 НВ.

Отже, виконана процедура сфероїдизації для карбідної фази заданого металу за умов відповідного режиму термічної обробки заготовок з використанням неізотермічної витримки та підвищенням температури і відповідною регламентованою швидкістю нагрівання, що забезпечує матеріалу структури зернистого перліту.

Таблиця 5.2

Механічні властивості і твердість сталі марок 20Г2Р та 30Г1Р після сфероїдизувального відпалу

Початкова структура	Загальна тривалість відпалу, с	Механічні властивості			
		Твердість НВ	Тимчасовий опір, Бв, МПа	Відносне подовження $\delta$ , %	Відносне звуження $\Psi$ , %
Бейнітна	200–220	148–152	460–480	25–27	62–64

Причому інтенсифікація сфероїдизації сприяє максимальній рівномірності розподілу глобул цементиту для феритної матриці (рис. 5.7, б). Після термічної обробки зразки сталі однакової твердості набули властивості дрібнодисперсної структури, яка забезпечує значно високий рівень пластичності металовиробу. За рахунок швидкого нагрівання металу та неповної його аустенітизації відбулися значні зміни в морфології карбідної фази від пластинчастої до дрібнодисперсної глобулярної.

## 5.6. Висновки до розділу 5

В цьому розділі дисертації розглянуто особливості моделювання ТО металу із застосуванням багатопроцесорної системи, яка для цього використовує відповідне математичне та програмне забезпечення. Було поставлено за мету розробити модель ТО сталевих виробів, яка

використовується в процесах рекристалізаційного та сфероїдизувального відпалювання каліброваного металовиробу. При цьому було помічено, що удосконалення наявних і створення принципово нових видів технологічних процесів ТО металу пов'язано із суттєвими матеріальними витратами на проведення великої кількості натурних експериментів у лабораторних, дослідно-промислових умовах, а також на виробничих установках. Стало очевидним, що тільки використовуючи багатопроцесорні обчислювальні комплекси, можна суттєво скоротити кількість проведених експериментальних досліджень та відповідний час на їх проведення за умов отримання необхідної інформації для формування та упровадження нових технологічних розробок. Запропонована 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 певними технологічними процесами. Сама багатопроцесорна система завдяки засобам спеціального ПЗ спроможна задавати й контролювати потрібні температурні режими металозаготовки по всій площині її перерізу під час нагрівання й витримки металу. За необхідності вона здійснює контроль теплового режиму обробки сталевого виробу в інтервалі заданих температур відпалювання. Безпосередньо багатопроцесорний обчислювальний комплекс з його спеціальним ПЗ містить певні математичні моделі, що задаються рівняннями теплопровідності. В роботі було запропоновано розв'язувати такі рівняння, скориставшись методами розщеплення. Саме завдяки такому підходу процес розв'язування двохвимірних рівнянь зводився до послідовного інтегрування одновимірних диференціальних рівнянь простої структури. Саме використання числово-аналітичних методів забезпечило створення економічних і стійких алгоритмів розв'язування задач такого типу.

було виконано експериментальні дослідження необхідних властивостей сталевому виробу. Наведені в роботі результати експериментів свідчать про можливість запропонувати методика в моделюванні швидкісних режимів обробки металеві заготовки як складову конструювання новітніх технологічних процесів.

Упровадження у виробничий процес запропонованої установки інтенсифікації сфероїдизувального відпалювання сталевому виробу дозволяє мати такі переваги:

1. Здійснювати контроль технологічних параметрів у певних режимах термічної та неізотермічної обробки металу, зокрема температури в центральній частині перерізу металовиробу. Такий підхід забезпечив надання металу необхідних властивостей, як за всією площиною перерізу зразка, так і за його довжиною з метою подальшої для нього холодної деформації.

2. За рахунок неізотермічної витримки зразка з підвищенням температури забезпечити мінімальну тривалість відпалювання сталі, що має вихідну бейнітну структуру.

3. Не використовувати в процесі ТО спеціальні блоки регламентованого охолодження, витримки та нагрівання сталі із заданою швидкістю, натомість запровадити особливий режим неізотермічної обробки сталей для інтервалів температур відпалювання з метою надання їй структури його зернистого перліту.

4. Контролювати температуру нагрівання, ізотермічної та неізотермічної витримки й охолодження по всій площині перетину зразка, застосовуючи з цією метою БОС, тим самим підвищити якість термічно обробленої сталі.

5. Суттєво скоротити тривалість технологічного процесу сфероїдизувального відпалювання металу.

6. Зменшити енергоспоживання процесів ТО металовиробу у порівнянні з традиційними технологічними процесами сфероїдизації сталі.

7. Синхронізувати технологічний процес неізотермічної обробки металу з технологічним процесом виготовлення кріпильних виробів, тобто

виробництво дроту об'єднати в спільну технологічну лінію, яка включає операції підготовки катанки, неізотермічної обробки заготовки й холодного волочіння сталі.

8. Порівняно з іншими технологічними процесами сфероїдизації сталі значно поліпшити умови експлуатації, у т. ч. й зменшити негативний вплив на стан довкілля.

9. За рахунок внутрішнього теплоносія суттєво скороти тривалість ТО металу з утворенням феритно-перлітних та феритно-перлітно-бейнітних структур порівняно з іншими технологічними процесами сфероїдизації сталі.

Наукова новизна відображених у цьому розділі дисертації досліджень зводиться до того, що на основі багатопроцесорного обчислювального комплексу створено систему автоматизованого контролю необхідних температурних режимів ТО металевого виробу в реальному часі задля проведення процедури рекристалізації та сфероїдизувального відпалювання каліброваного сталювого виробу. Таким чином, запропонований підхід дозволяє виконувати контроль технологічних параметрів ТО металу. Це зокрема стосується температури зразка в центрі його перерізу, завдяки чому забезпечується надання металу необхідних властивостей, як за всією площиною перерізу, так і за його довжиною.

Практична цінність наведених у розділі результатів підтверджено тим, що технологічний процес ТО металу вдалося удосконалити за рахунок застосування задіяних математичних моделей і комплексів програм. Використання математичних моделей, які опрацьовуються засобами багатопроцесорної системи, дозволило виконувати контроль температурного поля металовиробу в процесі його режимів нагрівання, витримки та охолодження, тим самим забезпечується швидка адаптація виробництва металопродукції до заданих вимог споживача.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі зроблено теоретичне узагальнення й відображено новий розв'язок науково-прикладної задачі розвитку теоретичних і практичних основ удосконалення архітектур модульних багатопроцесорних систем шляхом упровадження багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу, а також за рахунок використання шести віртуальних локальних мереж надання можливості не тільки підвищувати ефективність розпаралелювання, але й істотно зменшувати час обчислень, забезпечивши високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів системи, зниживши навантаження на канал, який проходить між її вузлами, що сприяє скороченню тривалості граничного обміну даними між обчислювальними вузлами, створивши умови при цьому для розв'язування багатовимірних задач, а також тих, що потребують великої кількості процесорного часу.

При цьому отримано такі основні наукові, теоретичні та прикладні результати:

1. Проведено аналіз архітектури сучасних багатопроцесорних обчислювальних систем, а також визначено основні напрями їхнього розвитку. Проаналізовано передумови конструювання таких систем на базі використання типових модулів масового виробництва. Виконано огляд сучасних видів мережевої архітектури багатопроцесорних систем з метою виявлення та обґрунтування основних їхніх переваг та недоліків.

2. На основі аналізу сучасної теорії і методів конструювання модульних багатопроцесорних обчислювальних систем запропоновано нову концепцію їхньої архітектури, яка, на відміну від відомих, за рахунок упровадження багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфейсу, а також шляхом використання шести віртуальних локальних мереж сприяє підвищенню ефективності розпаралелювання та істотному зменшенню тривалості обчислень, забезпечивши високошвидкісний доступ до пам'яті вузлів системи, зниживши завантаження каналу, який проходить між ними, що сприяє зменшенню часу граничного обміну даними між обчислювальними

вузлами. До того ж, на відміну традиційного підходу, через крос-панель або *WEB* -інтерфейс з'явилася можливість змінювати топологію локальних мереж у системі, адаптуючи їх структури до розв'язування задач необхідного типу.

3. Запропоновано та реалізовано метод багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфесу на основі шести віртуальних локальних мереж *VLAN*, що дозволило у порівнянні з іншими багатопроцесорними системами не тільки підвищити ефективність розпаралелювання, але й суттєво зменшити тривалість обчислень за рахунок забезпечення високошвидкісного доступу до пам'яті *slave*-вузлів, знизивши завантаження каналу, який проходить між вузлами обчислювальної системи, до того ж час програмної реорганізації мережевого інтерфесу знизився на 530 %; на 250 % знизився час на обробку, пересилання та зберігання проміжних і кінцевих результатів розрахунку; на 240 % знизився час обробки системних статистичних даних.

4. Порівняно з іншими багатопроцесорними системами, за рахунок запровадження нового стандарту *NVMe2.\** накопичувачів *SSD* було створено нові можливості “конективності” *main*-вузла обчислювальної системи з різними обчислювальними середовищами, що зумовлює підвищення швидкості обміну даними в її основних елементах та сприяє розвантаженню системної шини, при цьому вдалося знизити час завантаження операційної системи в *main*-вузлі на 180 %, а в *slave*-вузлах – на 320 %.

5. Запропонований режим застосування віртуальних локальних мереж *VLAN* і проведення багатовимірної агрегації каналів мережевого інтерфесу, а також запровадження технології *HDR4* високошвидкісної комутаційної комп'ютерної мережі *InfiniBand* вдалося, на відміну від відомих систем, збільшити пропускну спроможність порту мережевого інтерфесу з 200 до 800 Мб/с, що в чотири рази підвищує швидкість обміну даними між вузлами багатопроцесорної системи.

6. Проведені дослідження показників ефективності розробленої багатопроцесорної системи, що були отримані внаслідок запровадження багатоканальних режимів її мережевого інтерфесу, які на противагу до інших

систем подані через параметри обчислювального комплексу, що дозволяє раціональним чином здійснювати компонування її вузлів. До того ж, було удосконалено аналітичні залежності, аби встановити оптимальну кількість вузлів у системі з огляду на її можливості, тобто таку кількість вузлів, що забезпечить розв'язування задач протягом мінімально можливого часу. У роботі також виконано розрахунки показників завантаженості каналів комутації обчислювальної системи, що дозволяє переконатися в коректності налаштувань мережевого устаткування.

7. Унаслідок проведення розподілених обчислювальних експериментів вдалось істотно скоротити кількість натурних випробувань і зменшити їхню тривалість, отримуючи при цьому необхідну інформацію шляхом використання математичних моделей та запропонованих комплексів програм.

8. На основі багатопроцесорного обчислювального комплексу було створено установку комп'ютеризованого контролю необхідних температурних режимів ТО металевого виробу в реальному часі з метою проведення процедури рекристалізації та сфероїдизувального відпалювання каліброваної сталі. Запропонований підхід дозволив виконувати комп'ютеризований контроль технологічних параметрів ТО металу. Причому на відміну від застосування традиційного підходу, контролюється температура зразка в центрі його перерізу, тим самим забезпечується надання металу необхідних властивостей у поперечному й поздовжньому напрямках.

9. Удосконалено структурно-алгоритмічне забезпечення комп'ютеризованої технології контролю ТО металу з використанням внутрішнього теплоносія, що дозволяє суттєво скоротити тривалість процесу ТО металу на відміну від інших технологічних процесів обробки сталі.

10. Створені під час досліджень математичні моделі, методи й засоби доведено до практичної реалізації у вигляді програмного продукту та промислових зразків.



**ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Швачич Г.Г. Об алгебраическом подходе в концепции распределенного моделирования многомерных систем. *Теория и практика металлургии*. 2007. № 6(61). С. 73 – 78.
2. Швачич Г.Г., Иващенко В.П., Иващенко О.В. Чисельно-аналітична концепція розв'язків прикладних задач на основі схем підвищеного порядку точності. *Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація*. Дніпро. 2017. № 1. С. 85 – 89.
3. Швачич Г.Г. Математическое моделирование одного класса задач металлургической теплофизики на основе многопроцессорных параллельных вычислительных систем. *Математичне моделювання*. 2008. №1(18). С. 60 – 65.
4. Швачич Г.Г., Шмукин А.А. Особенности векторизации вычислений при моделировании процессов тепло- и массообмена. *Математичне моделювання*. 2005. №1(13). С. 23 – 28.
5. Швачич Г.Г., Побочий И.А., Иващенко Е.В., Сушко Л.Ф. Математическое моделирование теплофизических свойств материалов обратными методами. *Вісник Херсонського національного університету*. Херсон. 2019. № 2 (69). Ч. 3. С. 211 – 215.
6. Швачич Г.Г., Шмукин А.А. Определение теплофизических свойств материалов на основе решений коэффициентных ОЗТ в экстремальной постановке. *Теория и практика*. 2005. № 1 – 2. С. 104 – 108.
7. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А. Вычислительное дело и кластерные системы. Москва, 2007. 150 с.
8. Баканов В.М. Персональный вычислительный кластер как недостающее звено в технологии проведения сложных технологических расчетов. *Метизы*. 2006. №2 (12). С. 33 – 36.
9. Shvachych G.G. Prospects of construction highly-productive computers systems on the base of standard technologies : *IV Intrenational Conference*

“*Strategy of Quality in Industry and Education*”. Varna, May 30 – June 6, 2008. Vol. 2. P. 815 – 819.

10. Иващенко В.П., Швачич Г.Г. Персональный вычислительный кластер для моделирования многомерных нестационарных задач : *Материалы XVI международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики и механики»*. Севастополь, 2008. – С. 235 – 238.

11. Shvachych G.G. Prospects of construction highly-productive computers systems on the base of standard technologies. *Strategy of Quality in Industry and Education : IV International Conference*. May 30 – June 6. 2008, Varna, Bulgaria, 2008. Vol. 2. P. 815 – 819.

12. Швачич Г.Г., Шмукин А.А., Щербина П.А. Персональный вычислительный кластер как эффективное средство в технологии проведения сложных расчетов. *Проблеми математичного моделювання : Міждержавна наук.-метод. конф. м. Дніпродзержинськ*, 2008. С. 201 – 203.

13. Иващенко В.П., Башков Е.А., Швачич Г.Г. Информационные системы и технологии. Красноярск, 2011. 302 с.

14. Швачич Г.Г., Шмукин А.А., Щербина П.А. Персональный вычислительный кластер как эффективное средство в технологии проведения сложных расчетов. *Проблеми математичного моделювання : міждержавна наук.-метод. конф.*, 2008. С. 201 – 203.

15. Лацис А.О. Как построить и использовать суперкомпьютер. Москва, 2003. 240 с.

16. Moroz. D. Research of the influence of a network interface on the efficiency of modular multiprocessor systems. *Fundamental and applied research in the modern world : Abstracts of VIII International Scientific and Practical Conference*. Boston, USA. 2021. P. 162–171.

17. Moroz D. Research of energy efficiency of processors and network interface of multiprocessor computing systems. *World science problems, prospects*

*and innovations* : VII International Scientific and Practical Conference. Toronto, Canada. 2021. P. 108–118.

18. Швачич Г.Г., Мороз Д.М. Аналіз розвитку архітектур сучасних багатопроцесорних систем. *Людина і космос* : Збірник тез XXIII міжнародної науково-практичної конференції. м. Дніпро, 14–16 квітня 2021 р. Дніпро. С. 52.

19. Moroz D. Some aspects of network interface link aggregation in multiprocessor systems. *Молода академія 2022* : Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених. м. Дніпро, 19–20 травня 2022 р. Дніпро. № 2. С. 69.

20. Швачич Г.Г., Карпова Т.П., Іващенко О.В. Технології комунікаційної мережі багатопроцесорних обчислювальних систем. *Стратегія якості в промисловості і освіті* : Матеріали конф., г. Варна, 5 – 8 июля 2017 г. Варна, Болгарія. 2017. Т. 2. С. 448 – 452.

21. Специфікація кластера *Blackford MultiCore* / Інститут динаміки систем і теорії управління СО РАН, г. Иркутск. [Електронний ресурс] . – Режим доступу: [http://www.mvs.icc.ru/cluster\\_info.html](http://www.mvs.icc.ru/cluster_info.html)).

22. Патент заявка: 2004136937/09, 16.12.2004, Науково-дослідний інститут багатопроцесорних обчислювальних систем Таганрозького державного радіотехнічного університету (НДІ МВС ТРТУ). [Електронний ресурс] . – Режим доступу: <http://fpga.parallel.ru/family.html>

23. Башков Є.О., Іващенко В.П., Швачич Г.Г. Високопродуктивна багатопроцесорна система на базі персонального обчислювального кластера. *Проблеми моделювання та автоматизації проектування*. 2011. Вип. 9 (179). С. 312 – 324.

24. Швачич Г.Г., Чернецький С.О., Холод О.Г. Конструювання високопродуктивного інтегрованого середовища на базі персонального обчислювального кластера. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* : VIII міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпропетровськ, 2010. С. 278 – 280.

25. Shvachych G., Udovykd I., Moroz D., Mamuzić I. Research of the efficiency of multiprocessor systems taking into account the influence of the network interface. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia.

26. Shvachych G. G., Shcherbyna P. A., **Moroz D. M.** Untersuchung der netzwerkeigenschaften der kommunikationsschnittstelle von multipressor-systemen. *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, моделювання та управління* : Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції. м. Надвірна. 2022. С. 65 – 74.

27. Пат. 61944 Україна, МПК С21D 1/26, G06F 15/16 (2011.01). Модуль високоефективної багатопроесорної системи підвищеної готовності / Иващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О. ; патентовласники Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № и 2010 09341; заявл. 26.07.2010 ; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.

28. Иващенко В.П., Башков Е.А., Швачич Г.Г., Ткач М.А. Современные коммуникационные технологии в модульных многопроцессорных системах: опыт использования, исследование оценок эффективности, перспективы применения. Днепропетровск, 2012. 140 с.

29. Швачич Г.Г., Карпова Т.П., Иващенко О.В. Технології комунікаційної мережі багатопроесорних обчислювальних систем. *Стратегія якості в промисловості и образовании* : Матеріали конф., г. Варна, 5 – 8 июля 2017 г . Варна, Болгария. 2017. Т. 2. С. 448 – 452.

30. Technology That Works. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.myricom.com/>.

31. 10 Gigabit Ethernet. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://kunegin.narod.ru/ref1/giga/10giga.htm>

32. Швачич Г.Г., Холод Е.Г., Ткач М.А. Особенности применения сетевого интерфейса INFINIBAND в многопроцессорных системах с распределенной областью вычислений. *Системи обробки інформації*. 2016. № 3(140), С. 175 – 181.

33. Долженков И.Е., Большаков В.И., Долженков В.И. Оборудование термических цехов. Днепропетровск, 2004. 320 с.

34. Швачич Г.Г., Соболенко А.В., Соболенко М.А. Исследование температурного режима работы печей отжига шахтного типа бунтов проволоки. *Теория и практика металлургии*. 2003. № 1. С. 59 – 62.

35. Швачич Г.Г., Соболенко А.В., Бутенко И.Г., Коломоец Н.А. Исследование и разработка теплового режима отжига бунтов в шахтной печи. *Металлургическая теплотехника*. 2002. Т. 5. С. 14 – 18.

36. Бобылев М.В., Гринберг В.Е., Закиров Д.М., Лавриненко Ю.А. Подготовка структуры при электротермообработке сталей, применяемых для высадки высокопрочных крепежных изделий. *Сталь*. 1996. № 11. С. 54 – 60.

37. Патент РФ 2137847, кл. С 21 D 1/32, С 21 D 9/60, С 21 D 11/00. Установка для термообработки калиброванной стали / Закиров Д.М., Бобылев М.В., Лавриненко Ю.А., Лебедев Л.П., Сюльдин В.И.; Патентообладатель: Открытое акционерное общество “Автономаль”. – № 98117255/02; заявл. 16.09.1998; опубл. 20.09.1999.

38. Пат. 61944 Україна, МПК С21D 1/26 (2006.01), G06F 15/16 (2006.01). Установка для термічної обробки довгомірного сталевго виробу / Іващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О.; патентовласники: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № u 201014225; заявл. 29.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.

39. Robey R., Zamora Y. *Parallel and High Performance Computing*. 2021. 704 p.

40. Shvachych G.G., Shmukin A.A. Peculiarities of parallel computational algorithm synthesizing for personal electronic computer (pec) in heat – and – mass

exchange problems. *Eastern-europeanjournal of enterprise technologies*. 2004. № 2. P. 15 – 29.

41. Швачич Г.Г., Шмукин А.А. О технологии параллельного компьютерного моделирования на многопроцессорных вычислительных комплексах кластерного типа. *Математичне моделювання*. 2007. № 2 (17). С. 99 – 106.

42. Иващенко В.П., Швачич Г.Г., Шмукин А.А. Некоторые аспекты проблемы математического моделирования задач металлургической теплофизики на основе применения параллельных вычислительных систем кластерного типа. *Сучасні проблеми металургії*. 2005. С. 23 – 30.

43. Zhou D., Lo V. Cluster Computing on the Fly: resource discovery in a cycle sharing peer-to-peer system. *IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid*, 2004, P. 66 – 73.

44. Патент 105438, Україна, МПК G06F 15/16 (2006.01) Модуль високоефективної багатопроцесорної системи з розширюваною областю обчислень / В.П. Иващенко, Є.О. Башков, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач, П.О. Щербина, В.В. Волнянський; патентовласники: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № u 201507019; заявл. 14.07.2015; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6.

45. Shlomchak G., Shvachych G., Moroz B., Fedorov E., Kozenkov D. Automated control of temperature regimes of alloyed steel products based on multiprocessors computing systems: *Metalurgija*, № 58(2019) 3–4, p. 299–302.

46. Shvachych G., Moroz B., Martynenko A., Hulina I., Busygin V., Moroz D. Model of Speed Spheroidization of Metals and Alloys Based on Multiprocessor Computing Complexes. *Machine Learning for Predictive Analysis. Networks and Systems*. Springer. 2020. P. 33–41.

47. Shvachych G., Mamuzić I., Tsvykh V., Khylyko M., Sashchuk H., Timchenko O., Ivaschenko O., **Moroz D.** Some complex intensification features of spheroidizing annealing of low carbon steel. *Metalurgija*. 2022. № 61 (2). P. 344–346.

48. Besta M., Hoefler T. Slim fly: A cost effective low-diameter network topology. *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, IEEE Press*, 2014, P. 348 – 359.

49. **Moroz D. M.** Module high-efficiency multiprocessor system with multidimensional aggregating of channels of network interface. *Radio electronics, informatics, management. Zaporizhzhia*. 2022. P. 133 – 143.

50. Beowulf Introduction & Overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.beowulf.org>.

51. Moroz. D. Some problems of designing high-performance multiprocessor systems. *Управління проєктами. Перспективи розвитку проєктного та нейроменеджменту, інформаційних технологій управління, технологій створення та використання об'єктів права інтелектуальної власності* : Збірник наукових праць за матеріалами IV міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. м. Дніпро, 24–25 березня 2022 р. Дніпро. С. 110–115.

52. Shainer G. Cluster Interconnects: Real Application Performance and Beyond. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.clustermonkey.net/>.

53. Shvachych G.G., Tkach M.A, Shcherbyna P.A. About problems of designing of the high-efficiency integrated environment on the basis of computing clusters. *Materiały IV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Nauka i innowacja – 2008»*. 2008. Тум 11. Nowoczesne informacyjne technologie: Przemysl. S. 41 – 46.

54. Михайлов С. Блейд-серверы: больше, лучше, мощнее. *СЮ*. 2008. № 2 (69). С. 28 – 31.

55. Технология Infiniband: скорость, легкость, надежность. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.slideshare.net/croc-library/infiniband-47569713>.

56. Адаптеры Mellanox Infiniband. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://storusint.com/products/Mellanox\\_Infiniband\\_HCA.htm](http://storusint.com/products/Mellanox_Infiniband_HCA.htm)

57. Кластерные решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hardline.ru/2/22/1559>.
58. Moroz. D. Aggregation arrangement features of network interface channels in multiprocessor computing systems. *System technologies*. Dnipro. 2022. № 2 (139). P. 111–121.
59. Ivaschenko O.V. On the problem of modelling multiprocessor system architecture. *Стратегія якості в промисловості і освіті* : Матеріали XV міжнар. конф., м. Варна, 3 – 6 черв. 2019 р. Варна. Болгарія. 2019. С. 389 – 397.
60. Иващенко В.П., Башков Е.А., Швачич Г.Г., Ткач М.А. Современные коммуникационные технологии в модульных многопроцессорных системах: опыт использования, исследование оценок эффективности, перспективы применения. Днепропетровск, 2012. 140 с.
61. Поддержка и сопровождение Linux. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://techexpert.ua/ru/our-services/podderzhka-i-soprovozhdenie-linux/>
62. Руководство по системному администрированию Red Hat Enterprise Linux 4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rhd.ru/docs/manuals/enterprise/RHEL-4-Manual/sysadmin-guide/ch-diskless.html>
63. Официальный сайт MPI-форума [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mpi-forum.org>.
64. Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Tkach M.A. Prospects of network interface infiniband in multiprocessor computer system for solving tasks of calculations' area spreading. *System technologies*, 2014. № 2(91). P. 32 – 43.
65. Moroz. D. Research the efficiency of a modular multiprocessor computing system. *Youth and science. Practice of innovative search* : Proceedings of II All-Ukrainian Conference of Young Scientists. Dnipro, 17 December 2020. Dnipro. P. 299–303.
66. Moroz. D. Investigation of multiprocessor system efficiency estimates when solving application problems. *Молода академія 2022* : Збірник тез



доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених. м. Дніпро, 19–20 травня 2022 р. Дніпро. № 2. С. 70.

67. Shvachych G., Pobochii I., Ivaschenko O., Busygin V. Research of compatibility in the multi-processing compound systems. *Science Review*. Poland. 2018. № 2 (9). Vol. 1. P.15 – 19.

68. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. Петербург, 2002. 608 с.

69. Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Semenov S.G. Efficient parallelization algorithms of the applied tasks in multiprocessor computing systems. *Системні технології*. Дніпро. 2017. № 2 (109). P. 57 – 66.

70. Moroz. D. Research of the influence of a network interface on the efficiency of modular multiprocessor systems. *Fundamental and applied research in the modern world : Abstracts of VIII International Scientific and Practical Conference*. Boston, USA. 2021. P. 162 – 171.

71. Moroz D. Research of the influence of a network interface on the efficiency of modular multiprocessor systems. *System technologies*. Dnipro. 2021. № 3 (134). P. 56–66.

72. **Moroz D. M.** Network features study of the communication interface of multiprocessor modular systems. *Computer systems and information technologies*. Khmelnytskyi. 2022. P. 82–90.

73. Башков Є.О., Іващенко В.П., Швачич Г.Г. Високопродуктивна багатопроцесорна система на базі персонального обчислювального кластера. *Проблеми моделювання та автоматизації проектування*. 2011. Вип. 9 (179). С. 312 – 324.

74. Moroz. D. Research of multichannel modes of the network interface of modular computing systems. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції*. м. Дніпро, 18 травня 2022 р. Дніпро. С. 271 – 274.

75. Moroz D. M. Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks. *Актуальні напрями розвитку*

*технічного та виробничого потенціалу національної економіки* : монографія / G. G. Shvachych, D. M. Moroz. Дніпро. 2021. С. 111 – 136.

76. Moroz. D. Research of energy efficiency of processors and network interface of multiprocessor computing systems. *World science problems, prospects and innovations* : VII International Scientific and Practical Conference. Toronto, Canada. 2021. P. 108 – 118.

77. Shvachych G.G., Kholod E.G., Tkach M.A. Peculiarities of the use of the INFINIBAND seismic interface in multiprocessor systems with a distributed computing area. *Information processing systems*. 2016. № 3(140), P. 175–181.

78. Мороз Д. М. Особливості використання багатоядерних процесорів в багатопроцесорних обчислювальних системах. *Стратегія якості в промисловості і освіті* : Матеріали XVI міжнародної конференції. м. Варна, 2–5 червня 2021 р. Варна, Болгарія. С. 278–281.

79. Ivashchenko V., Shvachych G., Udovyyk I., **Moroz D.**, Mamuzić I. On the problem of the efficiency of computations of multiprocessor systems when solving applied problems. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia.

80. Shvachych G., Vozna N., Ivashchenko O., Bilyi O., **Moroz D.** Efficient algorithms for parallelizing tridiagonal systems of equations. *System technologies*. Dnipro. 2021. № 5 (136). P. 110 – 119.

81. Shvachych G., Moroz D., Mamuzić I. Maximum parallel algorithms for solving applied problems. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia.

82. Moroz D., Mamuzić I. Parallel numerical-analytical algorithms with continuous time. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia.

83. Shvachych G., Moroz B., Pobochii I., Ivaschenko O. , Busygin V. Maximally parallel forms of distributed simulation of dynamic systems. *World Science*. Poland. 2018. № 4(32). Vol.1. P. 12 – 19.

84. Швачич Г.Г., Соболенко О.В., Иващенко О.В. Режим агрегації каналів мережевого інтерфейсу багатопроцесорних обчислювальних систем. *Стратегия качества в промышленности и образовании* : Материалы конф., г. Варна, 5 – 8 июля 2017 г. Варна, Болгария. 2017. Т. 2. С. 452 – 457.

85. Ivaschenko V., Shvachych G., Ivaschenko O., Busygin, V. Improving the efficiency of multiprocessors system through in-line interface network aggregation. *Системні технології*. Дніпро. 2018. № 2(115). P. 84 – 93.

86. Ivaschenko V., Shvachych G., Ivaschenko O., Busygin V. Deceleration problem research in multiprocessional computing systems. *Information Technology in Metallurgy and Machine Building* : Materials and Technical International Conference. м. Дніпро, 27 – 29 березня 2018 р. Дніпро. 2018. С. 131.

87. Полнодуплексные протоколы локальных сетей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lanhelper.ru/seti/4/15>

88. Построение локальных сетей по стандартам физического и канального уровней [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://compnets.narod.ru/3-4.html>

89. Швачич Г.Г. Математическое моделирование одного класса задач металлургической теплофизики на основе многопроцессорных параллельных вычислительных систем. *Математичне моделювання*. 2008. №1(18). С. 60 – 65.

90. Швачич Г.Г., Шмукин А.А. Особенности векторизации вычислений при моделировании процессов тепло- и массообмена. *Математичне моделювання*. 2005. №1(13). С. 23 – 28.

91. Швачич Г.Г., Шмукин А.А. Определение теплофизических свойств материалов на основе решений коэффициентных ОЗТ в экстремальной постановке. *Теория и практика*. 2005. № 1 – 2. С. 104 – 108.

92. Швачич Г.Г., Шмукин А.А., Протопопов Д.В. Некоторые особенности математического моделирования обратных задач исследования теплофизических свойств материалов. *Металлургическая теплотехника*. 2005. С. 448 – 455.

93. Shvachych G., Pobochij I., Sazonova M., Bilyi O., **Moroz D.** Intelligent decision support system. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2021. № 2 (52). P. 1–9.

94. Пат. 36892 Україна, МПК (2006), C21D 1/26 C21D 1/78. Спосіб термічної обробки прокату з низько- і середньовуглецевих сталей для холодного висадження / Колпак В. П., Лещенко А. М., Івченко О. В, Соболенко М.О., Кокашинська Г.В. ; патентовласник Національна металургійна академія України – № u200807153; заявл. 23.05.2008; опубл. 10.11.2008, Бюл. № 21.

95. Патент №143971 Україна МПК C21D 1/26 (2006.01) Установка для інтенсифікації сфероїдизуючого відпалювання сталі / Іващенко В. П., Швачич Г. Г., Соболенко М.О., Гуль Ю.П., Соболенко О.В., Кокашинська Г.В., Мороз Д. М.; патентовласник Національна металургійна академія України – № u202000940; заявл. 14.02.2020; опубл. 25.08.2020, Бюл. №16.

96. Gul Yu.P., Sobolenko M.A., Ivchenko A.V. Integrated intensification of spheroidizing annealing of low carbon steels for cold heading. *Steel*. 2012. № 3(2012), С. 44 – 47.

97. Shvachych G., Pobochii I., Khokhlova T., Kholod A., **Moroz D.** Multiprocessor Computing based Parallel Structures of Mathematical Models of Tridiagonal Systems. *5th International Conference on Inventive Computation Technologies*. 2020. P. 1031–1035.

98. Shvachych G., Vozna N., Ivashchenko O., Bilyi O., **Moroz D.** Method of lines in distributed problems of experimental data processing. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2021. № 2 (52). P. 1–7.

99. **Мороз Д. М.** Модель паралельних обчислень з безперервним часом. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні* : Матеріали

міжнародної науково-технічної конференції, м. Дніпро, 16–18 березня 2021 р. Дніпро. С. 305–309.

100. **Moroz D.**, Mamuzić I. Maximally parallel forms of mathematical models with a tridiagonal structure. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia.

101. Швачич Г.Г., Шмукин А.А. Особенности конструирования параллельных вычислительных алгоритмов для ПЭВМ в задачах тепло- и массообмена. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2004. № 3. С. 42 – 47.

102. Швачич Г.Г., Шмукин А.А., Протопопов Д.В. Некоторые особенности математического моделирования обратных задач исследования теплофизических свойств материалов. *Металлургическая теплотехника*. 2005. С. 448 – 455.

103. Шмукин А. А., Посудиевский Р.А. Градиентный численно-аналитический метод решения уравнений Навье – Стокса. *Инженерно-физический журнал*. 1989. Т. 58. № 5. С. 730 – 737.

104. Shvachych G., Shcherbyna P., **Moroz D.** Aggregation of computing channels based on the nvidia cuda platform for control modes of components of technological systems. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2022. № 2. P. 85 – 92.

105. Shvachych G., Shcherbyna P., **Moroz D.** Study of the influence of network characteristics of a multiprocessor system on assessments of its efficiency. *Актуальні питання розвитку інформаційних технологій: тези доповідей IV Всеукраїнської конференції молодих учених (Маріуполь, 24 листопада 2022 р.)/ ДВНЗ «ПДТУ»*. – Дніпро-Маріуполь: ПДТУ, 2022. – 81 С. 64 – 66.

## ДОДАТОК А

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА НА ТЕМУ ДИСЕРТАЦІЇ

*Основні наукові результати дисертації*

1. **Moroz D. M.** Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks. *Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки* : монографія / G. G. Shvachych, D. M. Moroz. – Дніпро: 2021. – С. 111–136. Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/12zFHpMg33GRegRJS5woGi8FSPOVQT5tI/view>
2. Патент №143971 Україна МПК С21D 1/26 (2006.01) Установка для інтенсифікації сфероїдизуючого відпалювання сталі / Іващенко В. П., Швачич Г. Г., Соболенко М.О., Гуль Ю.П., Соболенко О.В., Кокашинська Г.В., **Мороз Д. М.** № u202000940; заявл. 14.02.2020; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 16. Режим доступу: <https://iprop-ua.com/inv/3hallquy/>
3. Shvachych G., Pobochni I., Khokhlova T., Kholod A., **Moroz D.** Multiprocessor Computing based Parallel Structures of Mathematical Models of Tridiagonal Systems. *5th International Conference on Inventive Computation Technologies*. 2020. P. 1031–1035. (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9112512>
4. Shvachych G., Moroz B., Martynenko A., Hulina I., Busygin V., **Moroz D.** Model of Speed Spheroidization of Metals and Alloys Based on Multiprocessor Computing Complexes. *Machine Learning for Predictive Analysis. Networks and Systems*. Springer. 2020. P. 33–41. (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7106-0\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7106-0_4)
5. **Moroz. D.** Research of the influence of a network interface on the efficiency of modular multiprocessor systems. *Fundamental and applied research in the modern world* : Abstracts of VIII International Scientific and Practical Conference. Boston, USA. 2021. P. 162–171. Режим доступу: <https://kmaesm.edu.ua/wp-content/uploads/2021/06/konferenciya-boston-2021-rik.pdf>

6. **Moroz D.** Research of energy efficiency of processors and network interface of multiprocessor computing systems. *World science problems, prospects and innovations* : VII International Scientific and Practical Conference. Toronto, Canada. 2021. P. 108–118. Режим доступу: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/03/WORLD-SCIENCE-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-24-26.03.21.pdf>

7. Shvachych G., Pobochij I., Sazonova M., Bilyi O., **Moroz D.** Intelligent decision support system. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2021. № 2 (52). P. 1–9. Режим доступу: <https://rsglobal.pl/index.php/wos/article/view/1907/1758>

8. Shvachych G., Vozna N., Ivashchenko O., Bilyi O., **Moroz D.** Method of lines in distributed problems of experimental data processing. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2021. № 2(52). P. 1–7. Режим доступу: <https://rsglobal.pl/index.php/wos/article/view/1951/1759>

9. **Moroz D.** Numerical-analytical method for distributed modelling of applied tasks. *Science and education* : Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference. Kyoto, Japan. 2021. P. 128–136. Режим доступу: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/SCIENCE-AND-EDUCATION-PROBLEMS-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-1-3.04.2021.pdf>

10. **Moroz D.** Research of the influence of a network interface on the efficiency of modular multiprocessor systems. *System technologies*. Dnipro. 2021. № 3 (134). P. 56–66 (фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки). Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/download/747/628/1267>

11. **Мороз Д. М.** Моделирование максимально параллельных структур алгоритмов решения тепловых задач. *Сучасні проблеми металургії*. Дніпро. 2021. № 24. С. 98–109. (фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки). Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/mpm/article/view/628/668>

12. Shvachych G., Vozna N., Ivashchenko O., Bilyi O., **Moroz D.** Efficient algorithms for parallelizing tridiagonal systems of equations. *System technologies*. Dnipro. 2021. № 5 (136). P. 110–119 (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки**). Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/783/684>

13. Shvachych G., Mamuzić I., Tsvykh V., Khylyko M., Sashchuk H., Timchenko O., Ivaschenko O., **Moroz D.** Some complex intensification features of spheroidizing annealing of low carbon steel. *Metalurgija*. 2022. № 61 (2). P. 344–346 (**видання індексується в Scopus**). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386160>

14. **Moroz D.** Aggregation arrangement features of network interface channels in multiprocessor computing systems. *System technologies*. Dnipro. 2022. № 2 (139). P. 111–121 (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки**). Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/1040>

15. **Moroz D.** Performance evaluations research of multiprocessor system in the problem of heat treatment of metal products. *Modern problems of metallurgy*. Dnipro. 2022. № 25. P. 136–149 (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки**). Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/mpm/article/view/1026>

16. **Moroz D. M.** Module high-efficiency multiprocessor system with multidimensional aggregating of channels of network interface. *Radio electronics, informatics, management*. Zaporizhzhia. № 3. 2022. P. 133–143. (**фахове видання категорії А, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки, індексується в Web of Science**). Режим доступу: <http://ric.zntu.edu.ua/article/view/265792/261817>

17. **Moroz D. M.** Network features study of the communication interface of multiprocessor modular systems. *Computer systems and information technologies*. Khmelnytskyi. № 3. 2022. P. 82–90. (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки**). Режим доступу: <http://csitjournal.khmnu.edu.ua/index.php/csit/issue/view/9>



18. Shvachych G., Shcherbyna P., **Moroz D.** Aggregation of computing channels based on the Nvidia Cuda platform for control modes of components of technological systems. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2022. № 2. P. 85 – 92 (**фахове видання категорії Б, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки**). Режим доступу: <https://journals.politehnica.dp.ua/index.php/it/article/view/95/80>

### *Наукові праці апробаційного характеру*

19. **Мороз Д. М.** Особливості використання багатоядерних процесорів у багатопроцесорних обчислювальних системах. *Стратегія якості в промисловості і освіті* : Матеріали XVI міжнародної конференції. м. Варна, 2–5 червня 2021 р. Варна, Болгарія. С. 278–281. Режим доступу: <http://nmetau.edu.ua/file/--sbornik-varna-2021-full.pdf>

20. Ivashchenko V., Shvachych G., Udovyk I., **Moroz D.**, Mamuzić I. On the problem of the efficiency of computations of multiprocessor systems when solving applied problems. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (**видання індексується в Scopus**). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

21. Shvachych G., Udovyk I., **Moroz D.**, Mamuzić I. Research of the efficiency of multiprocessor systems taking into account the influence of the network interface. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (**видання індексується в Scopus**). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

22. Shvachych G., **Moroz D.**, Mamuzić I. Maximum parallel algorithms for solving applied problems. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (**видання індексується в Scopus**). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

23. **Moroz D.**, Mamuzić I. Parallel numerical-analytical algorithms with continuous time. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

24. **Moroz D.**, Mamuzić I. Maximally parallel forms of mathematical models with a tridiagonal structure. *Metallurgy and related tropics* : Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia (*видання індексується в Scopus*). Режим доступу: <https://hrcak.srce.hr/file/386178>

25. Shvachych G. G., Shcherbyna P. A., **Moroz D. M.** Untersuchung der netzwerkeigenschaften der kommunikationsschnittstelle von multipressor-systemen. *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, моделювання та управління* : Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції. м. Надвірна. 2022. С. 56–65. Режим доступу: [https://drive.google.com/file/d/1ed41htLbZvHrQOJA\\_-oK3pBNgFhke\\_Za/view](https://drive.google.com/file/d/1ed41htLbZvHrQOJA_-oK3pBNgFhke_Za/view)

26. **Мороз Д. М.** Модель паралельних обчислень з безперервним часом. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Дніпро, 16–18 березня 2021 р. Дніпро. С. 305–309. Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/726/604>

27. **Moroz D.** Some problems of designing high-performance multiprocessor systems. *Управління проєктами. Перспективи розвитку проєктного та нейроменеджменту, інформаційних технологій управління, технологій створення та використання об'єктів права інтелектуальної власності* : Збірник наукових праць за матеріалами IV міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. м. Дніпро, 24–25 березня 2022 р. Дніпро. С. 110–115. Режим доступу: [https://nmetau.edu.ua/file/zbirnik\\_\\_materialiv\\_\\_konf\\_udunt\\_2022.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zbirnik__materialiv__konf_udunt_2022.pdf)

28. **Moroz D.** Research of multichannel modes of the network interface of modular computing systems. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. м. Дніпро, 18 травня 2022 р. Дніпро. С. 271–274. Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/1168>

***Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації***

29. **Moroz. D.** Research the efficiency of a modular multiprocessor computing system. *Youth and science. Practice of innovative search* : Proceedings of II All-Ukrainian Conference of Young Scientists. Dnipro, 17 December 2020. Dnipro. P. 299–303. Режим доступу: <https://nmetau.edu.ua/file/min-2020-elver.pdf>

30. Швачич Г.Г., **Мороз Д.М.** Аналіз розвитку архітектур сучасних багатопроцесорних систем. *Людина і космос* : Збірник тез XXIII міжнародної науково-практичної конференції. м. Дніпро, 14–16 квітня 2021 р. Дніпро. С. 52. Режим доступу: [https://spacehuman.org/\\_files/doc/sbornik2021.pdf](https://spacehuman.org/_files/doc/sbornik2021.pdf)

31. **Moroz. D.** Some aspects of network interface link aggregation in multiprocessor systems. *Молода академія 2022* : Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених. м. Дніпро, 19–20 травня 2022 р. Дніпро. № 2. С. 69. Режим доступу: [https://nmetau.edu.ua/file/tom\\_2\\_merged\\_red.1.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/tom_2_merged_red.1.pdf)

32. **Moroz. D.** Investigation of multiprocessor system efficiency estimates when solving application problems. *Молода академія 2022* : Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених. м. Дніпро, 19–20 травня 2022 р. Дніпро. № 2. С. 70. Режим доступу: [https://nmetau.edu.ua/file/tom\\_2\\_merged\\_red.1.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/tom_2_merged_red.1.pdf)

33. Shvachych G., Shcherbyna P., **Moroz D.** Study of the influence of network characteristics of a multiprocessor system on assessments of its efficiency. *Актуальні питання розвитку інформаційних технологій*: тези доповідей IV Всеукраїнської конференції молодих учених (Маріуполь, 24 листопада 2022

р.)/ ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро-Маріуполь: ПДТУ, 2022. – 81 С. 64 – 66. Режим доступу: <https://pstu.edu/wp-content/uploads/2023/01/zbirnyk-tez-aprit-2022.pdf>

**ДОДАТОК Б**  
**АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Додаток Б.1. Впровадження результатів дисертаційної роботи на підприємстві ТОВ «КМД»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Директор підприємства  
ТОВ «КМД»  
Медведєв М.Г. П.І.П.

«26» липня 2022 р.

**А К Т**

***впровадження результатів дисертаційної роботи  
Мороза Дмитра Максимовича***

Цей акт складено представниками підприємства ТОВ «КМД» про те, що в умовах даного підприємства використовувалися результати досліджень і розробок, що містяться в дисертаційній роботі на здобуття вченого ступеня доктора філософії Мороза Д.М.

1. Для визначення і аналізу теплофізичних властивостей матеріалів використовується розроблений в дисертаційній роботі пакеті прикладних програм. Основна особливість такого пакета прикладних програм полягає в наданні істотної допомоги дослідникові на всіх етапах обробки теплофізичного експерименту.

2. Паралельні обчислювальні технології, які розроблені в дисертаційній роботі та реалізовані в даному пакеті прикладних програм ефективні при розв'язуванні широкого кола нестационарних багатовимірних задач, дозволили підвищити продуктивність і якість обчислень.

3. Представлені програмні засоби застосовуються для планування і обробки результатів теплофізичного експерименту. Застосування пакета прикладних програм дозволило істотно скоротити число натурних експериментів, виконуючи відповідні дослідження засобами математичного моделювання.

4. Розроблені алгоритми розв'язку багатовимірних задач, що реалізовані в пакеті прикладних програм відрізняються високою точністю і ефективністю: тестові варіанти розв'язку задач завжди збігаються з теплофізичними характеристиками матеріалу тих зразків, які досліджуються.

5. Розроблене програмне забезпечення для обробки результатів теплофізичного експерименту є саморегуляризованим і досить просто перебудовується на розв'язок інших задач.

Провідний фахівець



Щербина П.О.

Додаток Б.2. Впровадження результатів дисертаційної роботи на підприємстві «Український інститут по проектуванні металургійних заводів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора Державного підприємства

«Український інститут з проектування металургійних заводів»

\_\_\_\_\_ Дмитро Летучий

29 серпня 2022 р.



А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи  
Мороза Дмитра Максимовича

Цей акт складено представниками Державного підприємства «Український інститут по проектуванню металургійних заводів» (ДП «УкрдіпромеЗ») про те, що в умовах ДП «УкрдіпромеЗ» використовуються дослідження і розробки, що містяться в дисертаційній роботі на здобуття вченого ступеня доктора філософії Мороза Д.М.

Здобувачем розроблено персональний обчислювальний кластер МРР архітектури, як модульна багатопроцесорна система, що побудована на основі стандартних обчислювальних вузлів, з'єднаних високошвидкісним комунікаційним середовищем. Потреба у високопродуктивних обчисленнях належить до фундаментальних чинників розвитку стратегічного потенціалу суспільства, вона має важливе науково-технічне й економічне значення.

*Застосування технологій кластерних обчислень в практиці відповідних досліджень ДП «УкрдіпромеЗ» дозволило істотно скоротити час обробки експериментальних даних, підвищити продуктивність обчислень. Крім того, застосування кластерних систем дозволило розширити спектр обчислювальних експериментів.*

Здобувачем запропонований, проаналізований і реалізований новий підхід для розв'язування багатовимірних нестационарних задач металургійного виробництва на основі паралельних комп'ютерних технологій



модульного типу. Доведена універсальність його по відношенню до розв'язування широкого класу задач металургійного виробництва.

*В ДП «Укрдїпромез» при дослідженні багатовимірних нестационарних задач металургії як методологічну основу для побудови числових методів розв'язування задач отримав розвиток кінцеворізносі та числово-аналітичні методи у поєднанні з методом розцеплювання. Метод розцеплювання, дозволив за допомогою відповідної редукації зводити складні задачі до більш простих. Так, тривимірні системи зводяться до послідовності простих систем, що включають невідомі величини лише в окремому напрямі. При цьому, метод розцеплювання забезпечує економічну і стійку реалізацію чисельних моделей.*

В рамках виконання дисертаційної роботи здобувачем було розроблено пакет прикладних програм (ППП), що реалізовує розв'язок широкого кола задач металургії методами математичного моделювання. Створення пакету відбувалось з урахуванням вимог об'єктно-орієнтованого програмування. Процедура моделювання було реалізовано на основі застосування персонального обчислювального кластера.

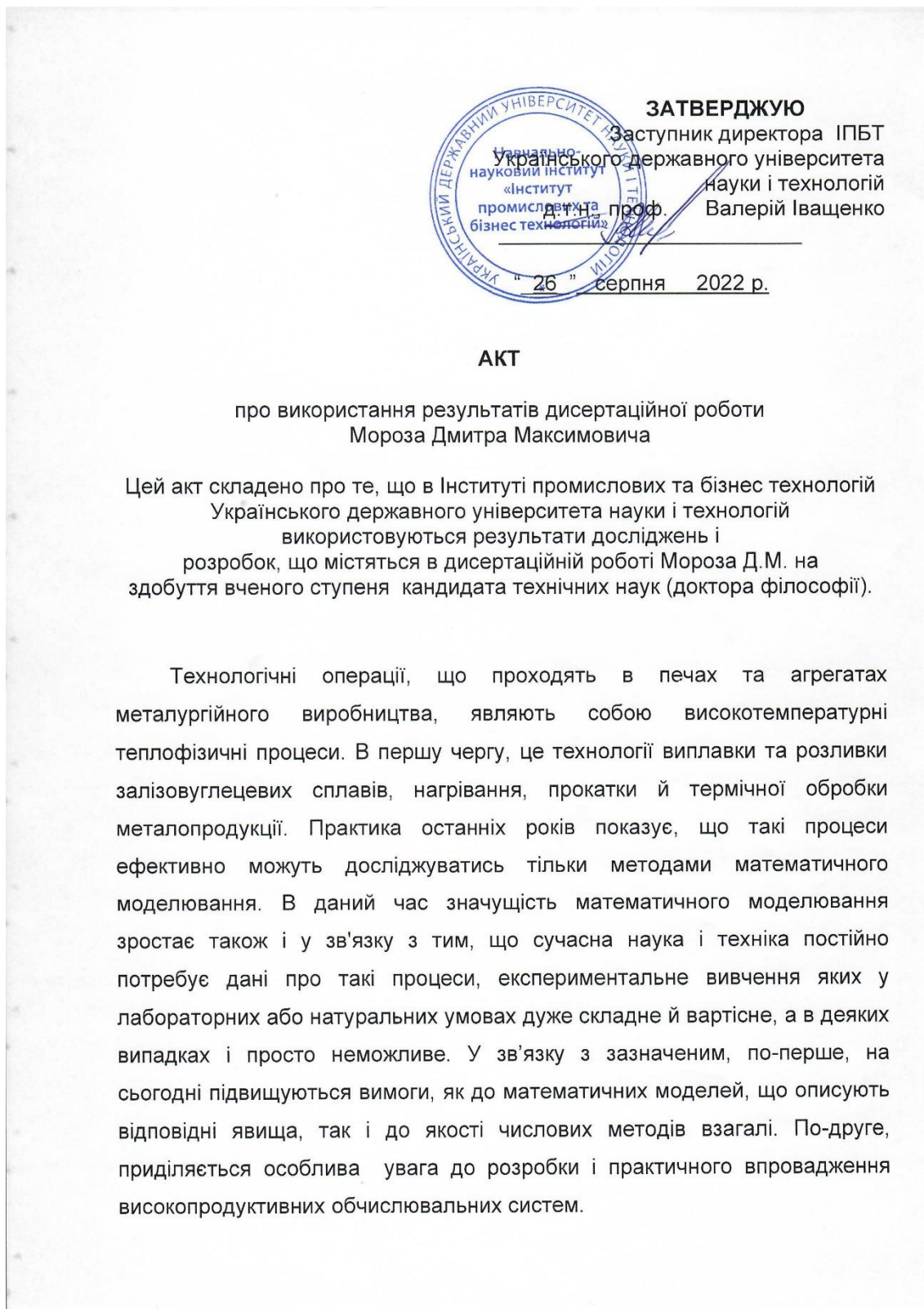
*В практиці досліджень ДП «Укрдїпромез» застосовується відповідний ППП, який уявляє собою інформаційне середовище. Розроблені методи і алгоритми розв'язку задач, які при цьому моделюються на модульній обчислювальній системі, дозволяють опрацьовувати результати практичних експериментів.*

**Начальник відділу інформаційних  
технологій ДП «Укрдїпромез»**



**Єсаулова В.П.**

Додаток Б.3. Впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес «Українського державного університету науки і технологій»



**АКТ**

про використання результатів дисертаційної роботи  
Мороза Дмитра Максимовича

Цей акт складено про те, що в Інституті промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій використовуються результати досліджень і розробок, що містяться в дисертаційній роботі Мороза Д.М. на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії).

Технологічні операції, що проходять в печах та агрегатах металургійного виробництва, являють собою високотемпературні теплофізичні процеси. В першу чергу, це технології виплавки та розливки залізовуглецевих сплавів, нагрівання, прокатки й термічної обробки металопродукції. Практика останніх років показує, що такі процеси ефективно можуть досліджуватись тільки методами математичного моделювання. В даний час значущість математичного моделювання зростає також і у зв'язку з тим, що сучасна наука і техніка постійно потребує дані про такі процеси, експериментальне вивчення яких у лабораторних або натуральних умовах дуже складне й вартісне, а в деяких випадках і просто неможливе. У зв'язку з зазначеним, по-перше, на сьогодні підвищуються вимоги, як до математичних моделей, що описують відповідні явища, так і до якості числових методів взагалі. По-друге, приділяється особлива увага до розробки і практичного впровадження високопродуктивних обчислювальних систем.

В зв'язку з відзначеним особливий інтерес викликають системи розподіленого моделювання. Високопродуктивна обчислювальна система, яка розроблена в дисертаційній роботі Мороза Д.М., має ту особливість, що вона створена на базі стандартних технологій. Запропонований підхід, з урахуванням економічних реалій нашої країни, стає надзвичайно актуальним.

В Інституті промислових та бізнес технологій Українського державного університета науки і технологій на факультеті Прикладних комп'ютерних технологій використовується зазначена обчислювальна модульна система при проведенні відповідних обчислювальних експериментів. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити продуктивність обчислювальних експериментів.

Особливості розроблених в дисертаційній роботі Мороза Д.М. обчислювальних технологій полягають в їх спрямованості для вирішення широкого круга прикладних задач і дозволяють підвищити ефективність проведення математичного моделювання. В той же час найважливіша практична спрямованість розроблених розподілених числових методів полягає в їх застосуванні до багатовимірних задач, що вимагають вирішення сіткових систем з великим числом невідомих.

При цьому спеціально розроблене математичне, алгоритмічне і програмне забезпечення, на базі якого створені пакети прикладних програм для вирішення прямих і обернених задач теплопровідності, розподіленого моделювання, експериментального дослідження математичних моделей термічної обробки довгомірного виробу при швидкісному режимі і охолодженні використовується аспірантами та здобувачами факультета для проведення відповідних досліджень. Це дозволило:

- проводити дослідження багатовимірних нестационарних математичних моделей за рахунок застосування апарату різницевого схем розщеплювання і засобів розподіленого моделювання;

– обробляти та інтерпретувати результати теплофізичних експериментів з метою уточнення їх параметрів за рахунок застосування розроблених математичних моделей високої міри точності;

– розширити спектр обчислювальних експериментів істотно скоротивши натурні експерименти і час на їх проведення із здобуттям необхідної інформації шляхом створення і використання математичних моделей і відповідних комплексів програм.

Декан факультету прикладних  
комп'ютерних технологій  
к.е.н., професор



Лариса САВЧУК

Додаток Б.4. Впровадження результатів дисертаційної роботи за темою  
0116U006782

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ  
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ,  
ЕНЕРГЕТИКИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

NATIONAL  
METALLURGICAL ACADEMY  
OF UKRAINE



НАЦІОНАЛЬНА  
МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ  
УКРАЇНИ

FACULTY OF COMPUTER SYSTEMS, POWER INDUSTRY AND AUTOMATION  
Україна, 49600, Дніпро, пр. Гагаріна, 4  
Телефон (0562) 47-46-31, (056) 374-81-27, e-mail: dialod-aktiv@rambler.ru

№ 168 від 09.04.2021 р.

АКТ

про участь та використання результатів основних наукових положень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

*Мороза Дмитра Максимовича*

в розробці теми дослідження «Методологія соціально-економічного, інформаційного та науково-технічного розвитку регіонів, галузей виробництва, підприємств та їх об'єднань» (державний реєстраційний номер 0116U006782)

Факультет комп'ютерних систем, енергетики та автоматизації Національної металургійної академії України цим актом засвідчує, що окремі положення наукового дослідження представлені в монографії «Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки: монографія / за ред. В.О. Пінчук, Г.С. Прокудіна – Дніпро: Пороги, 2021. – 536 с., ISBN 978-617-518-399-1, виконаної в межах теми дослідження «Методологія соціально-економічного, інформаційного та науково-технічного розвитку регіонів, галузей виробництва, підприємств та їх об'єднань» (державний реєстраційний номер 0116U006782)

Результати дослідження *Мороза Дмитра Максимовича* на тему «Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks» оприлюднені в розділі 2 на стор. 111-136 зазначеної монографії.

Отримані результати виконаних *Морозом Дмитром Максимовичем* досліджень мають наукову і практичну значимість.

Примірники монографії розіслані в бібліотеки за встановленим переліком.

Акт виданий для подання до Спеціалізованої вченої ради за місцем захисту дисертації *Мороза Дмитра Максимовича* на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Науковий керівник теми дослідження  
канд.економ.наук, професор

Савчук Л.М.

Підпис к.е.н., професора Л.М. Савчук засвідчую:  
Начальник відділу кадрів ІІМетАУ

Шифрін В.С.



Додаток Б.5. Впровадження результатів дисертаційної роботи за темою  
0121U109528

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ  
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ,  
ЕНЕРГЕТИКИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

NATIONAL  
METALLURGICAL ACADEMY  
OF UKRAINE



НАЦІОНАЛЬНА  
МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ  
УКРАЇНИ

FACULTY OF COMPUTER SYSTEMS, POWER INDUSTRY AND AUTOMATION  
Україна, 49600, Дніпро, пр. Гагаріна, 4  
Телефон (0562) 47-46-31, (056) 374-81-27, e-mail: dialod-aktiv@rambler.ru

№ 169 від 09.04.2021 р.

**АКТ**

про участь та використання результатів основних наукових положень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

*Мороза Дмитра Максимовича*

в розробці теми дослідження «Розробка інноваційної «зеленої» технології глибокої переробки вугілля з метою отримання термоантрациту та штучного графіту високої якості» (державний реєстраційний номер 0121U109528)

Факультет комп'ютерних систем, енергетики та автоматизації Національної металургійної академії України цим актом засвідчує, що окремі положення наукового дослідження представлені в монографії «Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки: монографія / за ред. В.О. Пінчук, Г.С. Прокудіна – Дніпро: Пороги, 2021. – 536 с. », ISBN 978-617-518-399-1, виконаної в межах теми дослідження «Розробка інноваційної «зеленої» технології глибокої переробки вугілля з метою отримання термоантрациту та штучного графіту високої якості» (державний реєстраційний номер 0121U109528).

Результати дослідження *Мороза Дмитра Максимовича* на тему «Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks» оприлюднені в розділі 2 на стор. 111-136 зазначеної монографії.

Отримані результати виконаних *Морозом Дмитром Максимовичем* досліджень мають наукову і практичну значимість.

Примірники монографії розіслані в бібліотеки за встановленим переліком.

Акт виданий для подання до Спеціалізованої вченої ради за місцем захисту дисертації *Мороза Дмитра Максимовича* на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Головний редактор монографії,  
науковий керівник теми дослідження  
докт.техн.наук, професор

Підпис д.т.н., професора В.О.Пінчук засвідчую:  
Начальник відділу кадрів НМетАУ

Пінчук В.О.

Шифрін В.С.



Додаток Б.6. Впровадження результатів дисертаційної роботи за темою  
0120U105547

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ  
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ,  
ЕНЕРГЕТИКИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

NATIONAL  
METALLURGICAL ACADEMY  
OF UKRAINE



НАЦІОНАЛЬНА  
МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ  
УКРАЇНИ

FACULTY OF COMPUTER SYSTEMS, POWER INDUSTRY AND AUTOMATION  
Україна, 49600, Дніпро, пр. Гагаріна, 4  
Телефон (0562) 47-46-31, (056) 374-81-27, e-mail: dialod-aktiv@rambler.ru

№ 170 від 09.04.2021 р.

**АКТ**

про участь та використання результатів основних наукових положень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
**Мороза Дмитра Максимовича**  
в розробці теми дослідження «Підвищення ефективності організації управління перевезеннями у міжнародному сполученні»  
(державний реєстраційний номер 0120U105547)

Факультет комп'ютерних систем, енергетики та автоматизації Національної металургійної академії України цим актом засвідчує, що окремі положення наукового дослідження представлені в монографії «Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки: : монографія / за ред. В.О. Пінчук, Г.С. Прокудіна – Дніпро: Пороги, 2021. – 536 с. », ISBN 978-617-518-399-1, виконаної в межах теми дослідження «Підвищення ефективності організації управління перевезеннями у міжнародному сполученні» (державний реєстраційний номер 0120U105547).

Результати дослідження **Мороза Дмитра Максимовича** на тему «Implementation of system software of multiprocessor computing systems for solving applied tasks» оприлюднені в розділі 2 на стор. 111-136 зазначеної монографії.

Отримані результати виконаних **Морозом Дмитром Максимовичем** досліджень мають наукову і практичну значимість.

Примірники монографії розіслані в бібліотеки за встановленим переліком.

Акт виданий для подання до Спеціалізованої вченої ради за місцем захисту дисертації **Мороза Дмитра Максимовича** на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Головний редактор монографії,  
докт.техн.наук, професор

Підпис д.т.н., професора В.О.Пінчук засвідчую:  
Начальник відділу кадрів НМетАУ



Пінчук В.О.

Шифрін В.С.

Додаток Б.7. Впровадження результатів дисертаційної роботи на підприємстві ТОВ «Жордон»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Технічний директор підприємства

ТОВ «ЖОРДОН»



Єременко Є. В.

«14» вересня 2022 р.

**А К Т**

***впровадження результатів дисертаційної роботи  
Мороза Дмитра Максимовича***

Цей акт складено представниками підприємства ТОВ «ЖОРДОН» про те, що в умовах даного підприємства використовувалися результати досліджень і розробок, що містяться в дисертаційній роботі на здобуття вченого ступеня доктора філософії Мороза Д.М.

1. Для визначення і аналізу теплофізичних властивостей матеріалів використовується розроблений в дисертаційній роботі пакеті прикладних програм. Основна особливість такого пакета прикладних програм полягає в наданні істотної допомоги дослідникові на всіх етапах обробки теплофізичного експерименту.

2. Паралельні обчислювальні технології, які розроблені в дисертаційній роботі та реалізовані в даному пакеті прикладних програм ефективні при розв'язуванні широкого кола нестационарних багатовимірних задач, дозволили підвищити продуктивність і якість обчислень.



3. Представлені програмні засоби застосовуються для планування і обробки результатів теплофізичного експерименту. Застосування пакета прикладних програм дозволило істотно скоротити число натурних експериментів, виконуючи відповідні дослідження засобами математичного моделювання.

4. Розроблені алгоритми розв'язку багатовимірних задач, що реалізовані в пакеті прикладних програм відрізняються високою точністю і ефективністю: тестові варіанти розв'язку задач завжди збігаються з теплофізичними характеристиками матеріалу тих зразків, які досліджуються.

5. Розроблене програмне забезпечення для обробки результатів теплофізичного експерименту є саморегуляризуєчим і досить просто перебудовується на розв'язок інших задач.

Начальник технічного відділу



Вовчинський Р.К.

Додаток Б.8. Впровадження результатів дисертаційної роботи на підприємстві ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Керівник управління з технології

 Хохлов Я.І.  
2022 р.

**А К Т**

**впровадження результатів дисертаційної роботи**  
**Мороза Дмитра Максимовича**

Цей акт складено представниками підприємства ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН» про те, що в умовах даного підприємства використовуються результати досліджень і розробок, що містяться в дисертаційній роботі Мороза Д.М. на здобуття вченого ступеня доктора філософії.

Вдосконалення та створення нових технологічних процесів, пов'язаних з термічною обробкою металу, вимагають значних витрат для проведення великої кількості натурних експериментів в промислових умовах. Скорочення експериментальних досліджень та часу на їх проведення з одержанням необхідної інформації можна здійснити шляхом розробки та використання математичних моделей і комплексів програм.

Проте проблеми обробки і інтерпретації експериментальних спостережень приводять до так званих обернених задач, оскільки в класичній постановці такі задачі взагалі можуть не мати розв'язків. Таким чином, складність даної проблеми полягає в тому, що її розв'язок приводить до некоректно поставлених задач.

Для обробки експериментальних даних на підприємстві використовуються розроблені в дисертаційній роботі Мороза Д.М. методи розв'язку граничних і коефіцієнтних обернених задач. Особливість

запропоновано підходу полягає в тому, що відповідний клас задач розв'язується в перспективній на сьогоднішній день екстремальній постановці. Використання регуляризованих кубічних сплайнів для згладжування експериментальних даних, а також методу статистичних випробувань забезпечує стійкість наближених розв'язків некоректно поставлених математичних задач. При чому, в процесі проведення обчислювальних експериментів встановлено, що похибка розв'язків не перевищує похибки вхідних даних.

Обчислювальні експерименти виконуються за рахунок впровадження пакета прикладних програм, що реалізує розв'язок коефіцієнтних обернених задач методом математичного моделювання. Пакет прикладних програм розроблено з урахуванням вимог об'єктно-орієнтованого програмування. При цьому розв'язок коефіцієнтних обернених задач зводиться до задач оптимального керування.

Пакет прикладних програм являє собою інформаційне середовище, що дозволяє проводити обчислювальні експерименти, не маючи безпосереднього доступу до об'єкту дослідження. Висока швидкодія і продуктивність обчислень досягається за рахунок застосування розробленої обчислювальної кластерної системи.

**Керівник управління персоналу  
та корпоративної культури**

**Качала Г.О.**

**Начальник  
інженерно-дослідницького відділу**

**Балєв А.Є.**

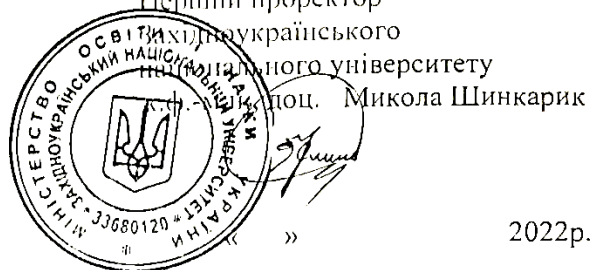
**Начальник відділу розробки  
програмного забезпечення та супроводу SAP**

**Часовіков О.О.**

Додаток Б.9. Впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес «Західноукраїнського національного університету»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор



2022р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Мороза Дмитра Максимовича

Цей акт складено про те, що в навчальному процесі Західноукраїнського національного університету використовуються результати досліджень і розробок, що містяться в дисертаційній роботі Мороза Д.М. на здобуття освітнього ступеня доктора філософії.

Нині комп'ютерне моделювання є одним з найбільш поширених і потужних методів дослідження складних систем. Проте існує широкий клас задач, розв'язок яких за допомогою класичного (послідовного) моделювання займає неприйнятно багато часу. В зв'язку з цим особливий інтерес викликають системи розподіленого моделювання. Обчислювальні модульні системи, розроблені в дисертаційній роботі Мороза Д.М., створені на базі стандартних технологій. Запропонований підхід, з урахуванням економічних реалій нашої країни, стає надзвичайно актуальним. У дисертаційній роботі показано, що залежно від задач і бюджету проекту можливі досить різні варіанти конфігурації обчислювальних модульних систем. Відзначена особливість розробок представляє інтерес для їх впровадження в навчальний процес закладів вищої освіти при підготовці фахівців в різних галузях.

В навчальному процесі Західноукраїнського національного університету паралельні технології моделювання, які представлені в дисертаційній роботі Мороза Д.М., використовуються для підготовки фахівців з інформаційних технологій, зокрема докторів філософії.

Особливості застосування технологій паралельних обчислень, які розроблені в дисертаційній роботі Мороза Д.М., знайшли своє відображення в дисципліні «Математичне моделювання та обчислювальні методи». Так, в цій дисципліні висвітлюються проблеми числового моделювання задач, які описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних. Моделювання на основі рівнянь Навьс – Стокса стало самостійним напрямом і при збільшенні швидкодії і пам'яті обчислювальної техніки приведе, до ще більшого прогресу при вирішенні різних прикладних проблем.


Отримані основи реалізації високопродуктивних обчислень, шляхом використання багатопроцесорних комп'ютерних систем, в подальшому знаходять свій розвиток в курсовому та дипломному проектуванні.

Впровадження сучасних високопродуктивних комп'ютерних технологій та методів розв'язку багатовимірних задач тепло- і масообміну дозволило:

- ознайомити студентів з сучасними тенденціями розвитку обчислювальної техніки та їх апаратних засобів;
- розвивати у студентів такі навички, як уміння розробляти алгоритми і програми паралельного розв'язку задач;
- реалізувати процедуру математичного моделювання широкого кола прикладних задач.

Відзначені особливості підготовки фахівців слід віднести до важливих кваліфікаційних характеристик сучасного фахівця з інформаційних технологій.

Декан факультету  
комп'ютерних інформаційних  
технологій Західноукраїнського  
національного університету,  
д.т.н., професор



Микола ДИВАК

Додаток Б.9. Впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес Університету імені Альфреда Нобеля

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Проректор із забезпечення  
якості освітнього процесу  
університету імені Альфреда Нобеля  
**КОРОБЕЙНИКОВА Т.І.**

" " 2022 р.

**А К Т**  
про використання результатів дисертаційної роботи  
Мороза Дмитра Макенмовича

Цей акт складено представниками Університету імені Альфреда Нобеля про те, що в учбовому процесі використовуються результати досліджень і розробок, які містяться в дисертаційній роботі Мороза Д.М. на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук (доктор філософії)

При економіко-математичному моделюванні часто виникає ситуація, коли система, що вивчається, має дуже складну структуру. За таких умов дослідник стикається з багатовимірністю її опису. До таких задач відносяться, наприклад, задачі сегментації ринку, прогнозування кон'юнктури ринку, вивчення і прогнозування економічної депресії, аналізу і прогнозування соціально-економічних явищ та ін. Крім того, багатовимірні задачі є актуальними для дослідників в області маркетингу та менеджменту.

Ефективне дослідження вказаних задач може здійснюватися лише на основі застосування багатопроекторних обчислювальних комплексів. В даний час істотний інтерес зріс саме до побудови та використання багатопроекторних паралельних обчислювальних систем (кластерів). Розроблені в дисертаційній роботі Мороза Д.М. технології паралельного кластерного моделювання багатовимірних задач знайшли своє застосування в учбовому процесі університету для студентів спеціальності «Економічна кібернетика» та «Комп'ютерні науки».


Більшість практичних багатовимірних задач економіки описуються лінійними моделями (задачі планування виробництва, транспортні задачі, задачі дискретного програмування і т.д.). При цьому на множині розв'язків систем лінійних алгебраїчних рівнянь відшукують оптимальні плани задач лінійного програмування. В дисципліні «Економіко-математичне моделювання» (розділ «Лнійне програмування») висвітлюються питання розв'язку систем лінійних рівнянь алгебри за допомогою паралельного процесора. При цьому відомо, що найбільший ефект від паралельного процесора досягається в тих випадках, коли він застосовується для

виконання матричних обчислень лінійної алгебри. Так, 80-95% загального часу обчислень в практичних задачах відводиться саме на розв'язок систем лінійних алгебраїчних рівнянь. В зв'язку з цим при ефективному розпаралелюванні такої системи можна добитися суттєвого прискорення обчислень багатовимірних задач. В даному розділі дисципліни висвітлюються питання математичного моделювання багатовимірних лінійних систем за допомогою паралельного процесора. Поза сумнівом, застосування такої системи для досліджуваних задач дозволяє збільшити продуктивність обчислень, швидкість обробки результатів експериментів.

При підготовці спеціалістів за фахом «Комп'ютерні науки» дисципліна «Математичні методи дослідження операцій» займає окреме місце, оскільки вона має досить важливе методологічне значення в системі підготовки сучасного фахівця. У ній найбільш чітко реалізується одна із основних ідей вивчення математичних дисциплін в вузі – ідея моделювання процесів, обґрунтування рішень, які приймаються в результаті управління організаційними структурами. У зв'язку з відзначеним, в даній дисципліні застосовуються розроблені в дисертаційній роботі Мороза Д.М. алгоритми чисельної мінімізації деякого функціонала на заданій множині аргументів. Показано, що якщо є обчислювальна система з  $p$  процесорами, то можна паралельно обчислювати  $p$  значень функціоналу. Саме за рахунок цієї обставини підвищується швидкодія і продуктивність обчислень. У роботі Мороза Д.М. доводиться, що із зростанням числа процесорів прискорення зростає логарифмічно. Алгоритми чисельної безумовної мінімізації відповідних функціоналів виявилися ефективними при розв'язуванні різного роду багатовимірних задачах оптимізації, що ілюструється відповідними прикладами.

Будучи досить новою інформаційною технологією, паралельні обчислення знайшли своє віддзеркалення в учбовому процесі Університету економіки і права при підготовці студентів спеціальності «Комп'ютерні науки». Застосування сучасних розподільних інформаційних технологій в учбовому процесі університету дозволило, з одного боку, досягти реального перелому в опануванні технологій високопродуктивних обчислень, а з іншого боку, підвищити конкурентоспроможність випускників ВНЗ в умовах ринкової економіки.

Зав. кафедри інформаційних  
технологій,  
к.е.н., доц.

  
Ю.М. Барташевська