

*О.М. Хімич, О.В Попов, Т.В. Чистякова, В.Г. Тульчинський*

## **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ПАРАЛЕЛЬНИЙ КОМП'ЮТЕР НА ПРОЦЕСОРАХ INTEL XEON PHI НОВОГО ПОКОЛІННЯ**

### **ВСТУП**

Математичне моделювання з великими об'ємами даних є актуальною інноваційною проблемою в різних сферах людської діяльності. Дуже часто завдяки чисельним експериментам досліджуються такі характеристики об'єктів та явищ, які неможливо встановити теоретично або натурними експериментами. На сьогодні суттєве поліпшення якості математичного моделювання в багатьох галузях науки та інженерії можливе лише при використанні принципово нових тривимірних моделей, переходу від комп'ютерного моделювання окремих вузлів та агрегатів до розрахунку та оптимізації виробу в цілому. Очевидно, що розгляд проблем в такій постановці приводить до дискретних математичних моделей надвеликої розмірності, для комп'ютерної реалізації яких не вистачає обчислювальних ресурсів сучасних персональних комп'ютерів та робочих станцій.

Впродовж декількох десятків років значне підвищення продуктивності комп'ютерів досягалося за рахунок збільшення кількості процесорів, зростання їх тактової частоти та розпаралелення обчислень. За останні 10–12 років відбулось суттєве зростання продуктивності таких обчислювальних систем з паралельною організацією обчислень. Але на сьогодні підвищення продуктивності за рахунок зростання тактової частоти процесорів вже досягло своєї межі.

В останні роки набули поширення багатоядерні комп'ютери з використанням співпроцесорів-прискорювачів різної архітектури. Серед них досить потужними комп'ютерами є комп'ютери гібридної архітектури, які поєднують MIMD- і SIMD-архітектуру. При розв'язуванні задач на цих комп'ютерах обчислення розпаралелюються між багатоядерними центральними процесорами з використанням графічних процесорів, які ефективно виконують багатопоточні однотипні обчислення великих об'ємів.

Суперкомп'ютери гібридної архітектури донедавна займали чільні позиції в світовому рейтингу найпродуктивніших комп'ютерів TOP 500 (див. [1]). Проте при розв'язуванні складних обчислювальних задач на цих потужних комп'ютерах виникають досить суттєві труднощі, які пов'язані з використанням особливостей двох принципово різних архітектур, комунікаційними втратами між процесорних зв'язків, різних програмних засобів розпаралелення – MPI та CUDA. Без урахування цих особливостей неможливо ефективно використати обчислювальні можливості гібридних комп'ютерів.

В кінці 2012 року компанія Intel запропонувала нове рішення підвищення

продуктивності комп'ютерів Intel – процесор Intel Xeon Phi першого покоління з архітектурою Intel MIC (Intel® Many Integrated Core Architecture), який використовується як співпроцесор, а влітку 2016 року було анонсовано багатоядерний процесор Intel Xeon Phi другого покоління з архітектурою Knights Landing, який використовується як центральний процесор. В останньому рейтингу TOP500 (за листопад 2017 р.) друге місце займає процесор Intel Xeon Phi першого покоління, а сьоме – дев'яте місця займають процесори другого покоління.

Процесори другого покоління Intel Xeon Phi призначені для швидкого розв'язування практичних задач з надвеликими об'ємами даних. Це забезпечується високою швидкістю розпаралелених обчислень на спільній пам'яті багатоядерного процесора та відсутністю комунікаційних втрат при цьому, а також завдяки можливості використання великої оперативної пам'яті різних рівнів. Проте ефективно використати потенціал обчислювальних ресурсів комп'ютерів з процесорами Intel Xeon Phi можна лише при застосуванні прикладного програмного забезпечення, яке враховує нові архітектурні можливості процесорів.

Ще одним важливим чинником ефективного виконання комп'ютерних обчислень є точність розв'язків прикладних задач. Математичні моделі, що описують прикладні задачі, завжди містять похибки в початкових даних. Отже, їх математичні властивості апріорі невідомі. В межах заданого рівня похибки задачі можуть бути як сумісні так і несумісні, як коректно так і некоректно поставлені, як погано так і добре обумовлені. В свою чергу, математичні властивості комп'ютерної задачі, яку зрештою і доводиться розв'язувати, можуть суттєво відрізнятися від математичних властивостей дискретної та математичної моделей через заокруглення обчислень та даних в комп'ютері [2 – 11].

Проте існуюче високопродуктивне прикладне програмне забезпечення здебільшого не враховує наближений характер вихідних даних. Отже, аналіз достовірності одержуваних комп'ютерних результатів покладається на користувачів.

Необхідно також відмітити, що багато користувачів сучасним прикладним програмним забезпеченням, наприклад, проблемно-орієнтованими пакетами прикладних програм типу ANSYS, NASTRAN [12 – 14], вказують на їх невисоку інтегрованість до нових комп'ютерних архітектур, закритість, величезні об'єми документації. Відзначається, що в них не враховується наближений характер даних задачі, не проводиться аналіз достовірності одержуваних результатів. Самостійне вирішення цих проблем потребує від користувачів додаткових затрат інтелектуальних зусиль та часу.

Сучасні високопродуктивні комп'ютерні системи, на виготовлення яких затрачаються величезні асигнування, потребують потужного живлення, систем кондиціонування, мають

достатньо високий рівень акустичного шуму і, враховуючи все це, розташовуються в окремих спеціальних приміщеннях. Такі витрати перешкоджають їх широкому застосуванню.

Одним з перспективних напрямків розвитку високопродуктивних обчислень автори вбачають у створенні та використанні інтелектуальних комп'ютерів на основі новітніх обчислювальних засобів (графічних процесорів або останніх моделей процесорів), які здатні реалізувати обчислення (до 3 Тфлопс) у форматі персонального комп'ютера, за рахунок новітніх високопродуктивних графічних прискорювачів або останніх моделей процесорів Intel Xeon Phi, а також сучасних технологій зберігання значних обсягів інформації, інтелектуалізації процесів дослідження та розв'язування задач з наближеними даними.

У 2015 році при виконанні інноваційного науково-технічного проекту «Розробка апаратно-програмного комплексу на базі інтелектуального персонального суперкомп'ютера гібридної архітектури для математичного моделювання в оборонній галузі, галузях машинобудування та будівництва» Інститутом кібернетики ім. В.М. Глушкова НАНУ спільно з Державним підприємством (ДП) «Електронмаш» розроблено концепцію та створено експериментальний зразок одновузлового восьмиядерного інтелектуального персонального суперкомп'ютера Інпарком\_pg з новітніми графічними процесорами NVIDIA Tesla K40 для розв'язування науково-технічних задач [15].

У 2017 році, в рамках виконання інноваційного науково-технічного проекту «Розробка інтелектуального паралельного комп'ютера на процесорах нового покоління Intel Xeon Phi для задач науки та інженерії», Інститутом кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України спільно з ДП «Електронмаш» розроблено архітектуру та створено експериментальний зразок одновузлового інтелектуального персонального комп'ютера Інпарком\_hr на багатоядерному процесорі другого покоління Intel Xeon Phi.

Ці інноваційні розробки розвивають концептуальні принципи інтелектуалізації паралельних комп'ютерів різної архітектури сімейства Інпарком [16, 17], які розробляються на протязі останніх десяти років Інститутом кібернетики імені В.М. Глушкова та ДП «Електронмаш».

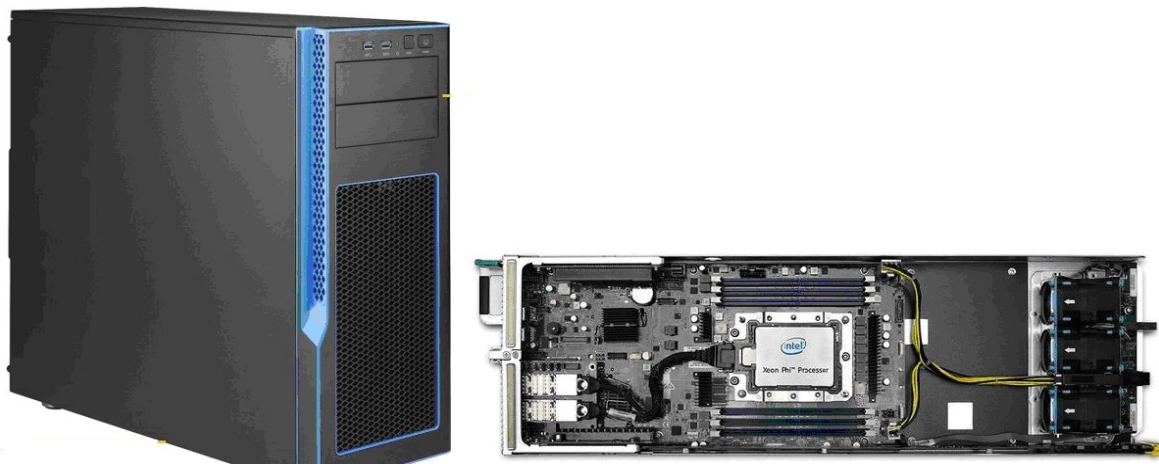
Концептуально інтелектуальний комп'ютер для розв'язування науково-технічних задач – це знання-орієнтований паралельний комп'ютер, структура і архітектура якого, а також операційне середовище підтримують інтелектуальне програмне забезпечення для автоматичного дослідження та розв'язування задач обчислювальної математики з наближеними даними.

Основними перевагами інтелектуального паралельного комп'ютера є:

- звільнення користувачів від роботи по дослідженню задач, створенню паралельних алгоритмів та програм, що скорочує час постановки і розв'язування задач науки і інженерії;
- постановка в комп'ютері на мові предметної області задачі з наближеними даними;
- забезпечення вимог до точності обчислень (програмно або апаратно) у відповідності до властивостей комп'ютерної моделі задачі на основі багаторозрядної арифметики, отримання комп'ютерного результату з оцінкою достовірності;

## ПЕРСОНАЛЬНИЙ КОМП'ЮТЕР НА ПРОЦЕСОРІ INTEL XEON PHI ДРУГОГО ПОКОЛІННЯ

У відповідності до концепції створення інтелектуального багатоядерного персонального комп'ютера Інпарком\_хр виготовлено експериментальний зразок одновузлового інтелектуального паралельного персонального комп'ютера Інпарком\_хр з процесором Intel Xeon Phi 7210 (рис. 1) [18].



*Рис. 1.* Експериментальний зразок інтелектуального персонального комп'ютера Інпарком\_хр

Технічні характеристики та стандартні програмні засоби персонального комп'ютера Інпарком\_хр:

- процесор Intel Xeon Phi 7210 – 32 «плитки», з'єднані двомірною решіткою, 64 ядра, 16 Гб «швидкої» пам'яті (MCDRAM). Кожна плитка містить 2 ядра, 2×2 VPU (векторні процесори), кеш команд і даних першого рівня – 32 Кб, кеш другого рівня – 1 Мб;
- основна операційна система – Linux та Windows;
- оперативна пам'ять – 192 Гбайт, накопичувач SSD – 240 Гбайт, пікова

(теоретична) продуктивність (DP) – 2.663 Tflops, максимальна продуктивність (DP, тест Linpack) – 1.793 Tflops;

- компілятори Intel – C, C++, Fortran;
- системи розпаралелення MPI, OpenMP;
- бібліотека Intel Math Kernel (MKL);
- інтелектуальне програмне забезпечення для дослідження та розв’язування задач основних класів обчислювальної математики.

Розглянемо більш детально складові частини персонального комп’ютера Інпарком\_хр.

### Архітектурні особливості процесора Intel Xeon Phi другого покоління

Процесор нового покоління Intel Xeon Phi, який використовується в персональному паралельному комп’ютері Інпарком\_хр, – це перший завантажувальний хост-процесор компанії Intel, який підтримує масовий паралелізм і векторизацію високопродуктивних обчислювальних додатків великих об’ємів. В ньому вперше інтегровані пам’ять і технології комутації. Тому, на відміну від існуючих процесорів, які використовуються як співпроцесори, та GPU-прискорювачів, його функціональні можливості не обмежені комунікаційними затримками.

Завдяки відсутності таких обмежень новітні процесори Intel Xeon Phi забезпечують велику ефективність і масштабованість, здатні працювати в різноманітних конфігураціях. Цей процесор є третім поколінням процесорів на базі архітектури Intel MIC та другим у поколінні Xeon Phi (Intel Xeon Phi x200 Family) під кодовою назвою Knights Landing [19]. Розглянемо його структуру та архітектуру (рис. 2).

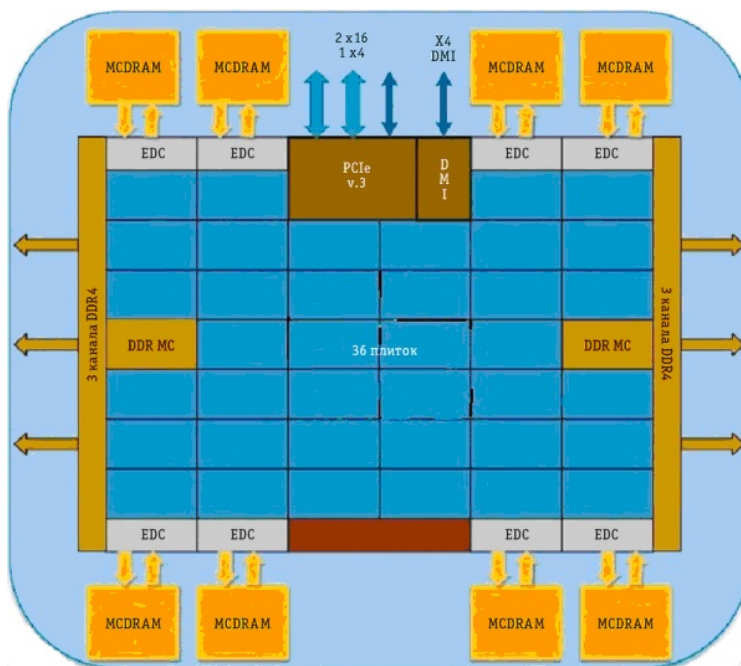


Рис. 2. Архітектура процесора Knights Landing

Процесор Knights Landing має у своєму складі до 36 так званих плиток (tiles) із топологією зв'язків між ними – «двовимірна решітка». Кожна «плитка» – два ядра Intel Atom Airmont (14 НМ версія Silvermont) з двома VPU (векторними процесорними пристроями) – AVX512 для роботи з числами у форматі з плаваючою комою подвійної точності.

Кожне ядро має кеші команд і даних по 32 Кбайт з додатковим кешем другого рівня місткістю 1 Мбайт, що розділяється між ядрами плитки. У мікросхемі забезпечується когерентність кеша другого рівня для всіх ядер з загальною місткістю до 36 Мбайт. Одне таке ядро припускає одночасне використання чотирьох ниток, або тредів (потоки команд, що виконуються одночасно). До складу процесора входять також вісім модулів «ближньої» пам'яті MCDRAM (Multi-Channel DRAM) загальною місткістю 16 Гбайт та пропускною здатністю більше 400 ГБайт / с, що мають доступ до плитки.

Крім того, є ще можливість для звернення до «далекої» пам'яті DDR4 2400 місткістю до 384 Гбайт і пропускною здатністю більше 90 Гбайт / с. «Ближня» пам'ять може працювати в трьох різних режимах: як кеш «далекої» пам'яті (Cache Mode); у складі єдиного адресного простору з «далекою» пам'яттю (Flat Mode); у комбінованому режимі (Hybrid Mode), коли частина MCDRAM використовується як кеш, а частина – в єдиному адресному просторі з оперативною пам'яттю DDR4.

Таким чином, архітектурні можливості процесора Intel Xeon Phi (використання оперативної пам'яті різних рівнів) розраховані на ефективне виконання задач великих розмірів.

## **Особливості системного програмного забезпечення персонального комп'ютера**

### **Інпарком\_хр**

Системне програмне забезпечення (ПЗ) одноузлового багатоядерного комп'ютера Інпарком\_хр враховує декілька режимів використання:

- робота користувача безпосередньо на комп'ютері,
- віддалений робочий стіл,
- доступ до комп'ютера в мережі Інтернет.

З метою забезпечення ефективного використання специфіки прикладних програмних засобів для моделювання процесів та явищ в різних предметних областях, які здебільшого функціонують в операційній системі Windows, а також для їх взаємодії з іншими програмними засобами, що працюють в операційній системі Linux, передбачено дві архітектури системного програмного забезпечення:

- на основі ОС Windows Server 2016;
- на основі ОС Linux.

Отже, користувачі цього комп'ютера мають можливість самостійно вибрати операційне середовище залежно від специфіки прикладного ПЗ, що ними використовується.

### ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ INPARSOFT\_XP

Для вирішення проблем математичного моделювання процесів і явищ, які виникають в наукових та інженерних дослідженнях, а також підвищення продуктивності праці дослідників створено інтелектуальне програмне забезпечення Inparsoft\_xp для дослідження і розв'язування основних класів задач обчислювальної математики (системи лінійних алгебраїчних рівнянь; алгебраїчна проблема власних значень, нелінійні рівняння та системи; звичайні диференціальні рівняння і системи) на паралельних комп'ютерах з новітніми процесорами Intel Xeon Phi, яке легко адаптується до різних комп'ютерних архітектур та операційних систем (рис. 3).

Структурно Inparsoft\_xp складається з інтелектуального програмного засобу (ІПЗ) Inpartool\_xp для автоматичного дослідження та розв'язування задач обчислювальної математики з наближеними даними, а також бібліотеки паралельних програм Inparlib\_xp, що реалізують дослідження та розв'язування визначених класів задач конкретними високопродуктивними методами [17].

З точки зору користувача Inpartool\_xp – програмний інструментарій для автоматичного дослідження та розв'язування задач обчислювальної математики з наближеними даними з гарантією достовірності комп'ютерних результатів.

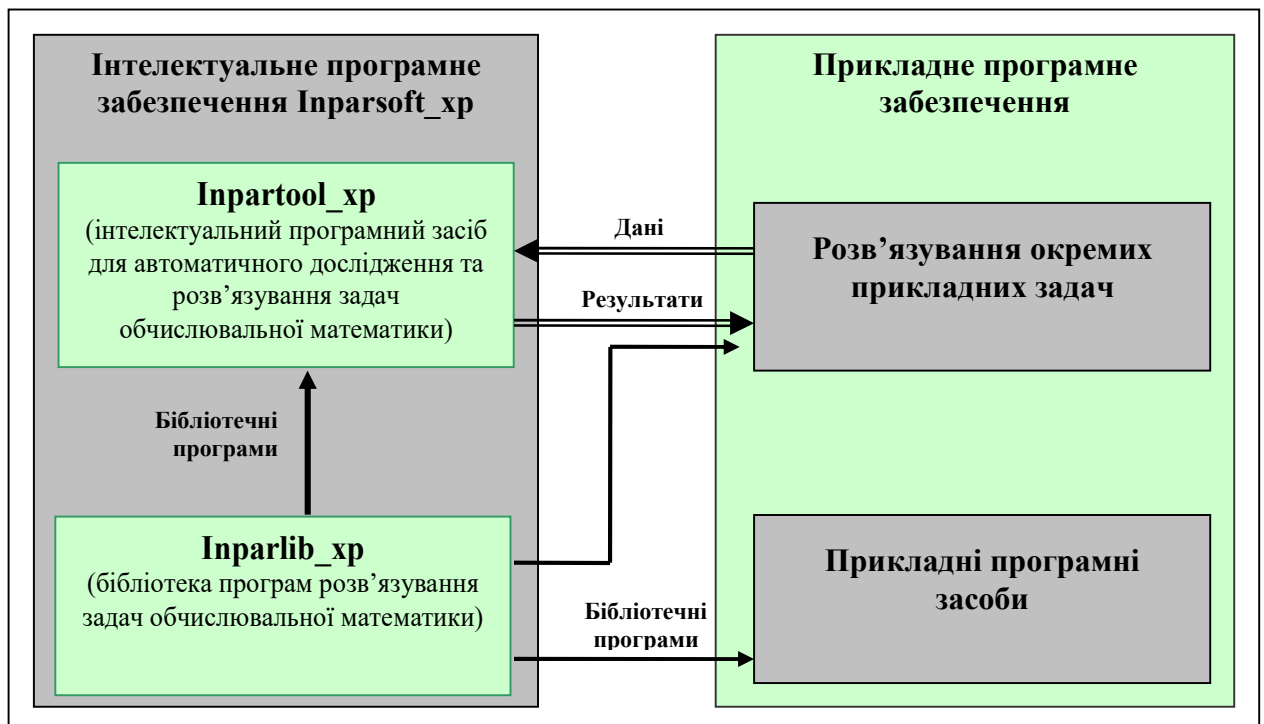


Рис. 3. Архітектура програмного забезпечення Inparsoft\_xp

Функціонально Inpartool\_xp забезпечує виконання таких етапів робіт [17, 20]:

- постановка в комп'ютері задачі з наближеними даними на мові предметної області;
- природні для користувача форми введення вихідних даних задачі;
- автоматизація процесів комп'ютерного дослідження математичних властивостей задачі, вибору алгоритму і синтезу програми розв'язування на основі знань про предметну область та про задачу, що розв'язується;
- забезпечення розв'язування задач з підвищеною розрядністю;
- розв'язування задачі з оцінкою достовірності одержуваних комп'ютерних результатів при ефективному використанні архітектури новітнього процесора Intel Xeon Phi
- пояснення процесу дослідження та розв'язування задачі;
- реалізація принципу «прихованого паралелізму».

Реалізація «прихованого паралелізму» передбачає автоматичне формування ефективної конфігурації (топології) комп'ютера та розпаралелення обчислень на оптимальній кількості багатоядерних процесорів Intel Xeon Phi [17].

Паралельні програми бібліотеки Inparlib\_xp реалізують розв'язування задач визначених класів конкретними алгоритмами. Кожна програма в ході обчислювального процесу перевіряє відповідність вибраного алгоритму математичним властивостям комп'ютерної моделі задачі; формує ефективну конфігурацію комп'ютера з процесорів, що використовуються; виконує початкову розсилку даних; розв'язує задачу і оцінює достовірність отриманого розв'язку або повідомляє причину відмови в розв'язуванні задачі вибраним алгоритмом [16, 17].

З погляду кінцевого користувача програми бібліотеки є повторно використовуваними компонентами (reuse-компонентами) при розв'язуванні прикладних задач, де задачі обчислювальної математики є проміжним або завершальним етапом.

Програмну реалізацію інтелектуального забезпечення Inparsoft\_xp здійснено у вигляді окремих компонентів, що спрощує його адаптацію до обчислювального середовища користувача. Для різної архітектури паралельних комп'ютерів, віддаленого і локального доступу, а також різних операційних систем (Linux, Windows) створено ідентичний інтелектуальний інтерфейс, легко підключаються необхідні програми.

Враховуючи архітектурні та технологічні особливості процесора Intel Xeon Phi, який використовується, при створенні інтелектуального програмного забезпечення Inparsoft\_xp було застосовано такі способи підвищення ефективності обчислень: розпаралелення та векторизація обчислень; використання кеш-пам'яті різних рівнів [21].



Розпаралелення обчислень на розподіленій пам'яті комп'ютера з декількома хост-процесорами Intel Xeon Phi реалізується за допомогою системи MPI [22], а між ядрами CPU із спільною пам'яттю – за допомогою системи OpenMP [23].

Одним з важливих чинників прискорення обчислень на комп'ютері з хост-процесором Intel Xeon Phi є векторизація. В архітектурі процесора Intel Xeon Phi другого покоління передбачено використання системи команд AVX512 з підтримкою векторних регістрів. Крім того, в системі OpenMP версії 4.0 [23] також є функціональні можливості для реалізації векторизації обчислень на цих процесорах.

Для виконання матрично-векторних операцій можна використовувати відповідні функції версії бібліотеки програм Intel MKL (Math Kernel Library) [24], яка адаптована компанією Intel для використання на новітніх процесорах Intel Xeon Phi.

Коротко опишемо як виконуються обчислення на процесорі Intel Xeon Phi за допомогою програм з Intel MKL. При першому виклику якої-небудь функції бібліотеки відбувається перевірка апаратних можливостей комп'ютера та вибирається варіант коду, який дає максимально ефективне використання паралелізму SIMD-команд і регістрів, а також вибирається стратегія роботи з надшвидкою пам'яттю MCDRAM. Причому функції Intel MKL коректно працюють при одночасному виклику з декількох потоків. Таким чином, використання відповідних функцій з бібліотеки програм Intel MKL для реалізації математичних операцій над матрицями та векторами забезпечує ефективне використання пам'яті під час обчислень.

### **Апробація розробленого інтелектуального програмного забезпечення**

Експериментальне дослідження розробленого інтелектуального програмного забезпечення з обчислювальної математики проводилось на низці тестових та прикладних задач різних об'ємів на таких комп'ютерах:

- персональний суперкомп'ютер Інпарком\_xr з новітнім хост-процесором Intel Xeon Phi [21] – 1 вузол, Xeon Phi 7210 (64 ядра, 16 Gb MCDRAM), 192 Gb RAM;
- персональний комп'ютер гібридної архітектури Інпарком\_pg – 1 вузол, два Xeon 5606 (4 ядра), 24 Gb RAM, 2 GPU Tesla K40.

Наведемо деякі результати апробації.

#### **1. Задача прогнозування працездатності трубопровідних елементів з корозійно-ерозійними дефектами в умовах високотемпературної експлуатації**

Ця задача розв'язувалася в інтересах Інституту електрозварювання імені Е.О. Патона НАН України. Математичне моделювання сучасних задач в цій предметній області потребують великих комп'ютерних ресурсів, тому для них було

використано потужні комп'ютери сімейства Інпарком. Задача зводиться до розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) із стрічковими несиметричними матрицями, для яких було використано паралельні програми з бібліотек інтелектуальних програм серії Inparlib. В таблиці 1 наведено результати розв'язування СЛАР із стрічковою несиметричною матрицею паралельними алгоритмами методу Гауса на основі *LU*-розвинення на паралельних комп'ютерах різної архітектури.

Таблиця 1

**Результати розв'язування СЛАР (сек) паралельними алгоритмами методу Гауса на різних комп'ютерних архітектурах**

Порядок матриці	Напівширина стрічки	Послідовний алгоритм	Гібридний алгоритм на Інпарком_PG (два GPU)	Паралельний алгоритм на Інпарком_Phi
137826	4448	1500	45	42,7

З таблиці ми бачимо, що за гібридним алгоритмом розв'язування СЛАР одержано такі прискорення у порівнянні з послідовною версією алгоритму: на гібридному персональному комп'ютері – в 33 раз, використовуючи два GPU. За паралельним алгоритмом на комп'ютері з новітніми Intel Xeon Phi процесорами (64 ядра), одержано прискорення в 35 раз.

**2. Задача стійкості композитного матеріалу**

Розв'язування часткової узагальненої проблеми власних значень із стрічковою матрицею при математичному моделюванні задачі стійкості композитного матеріалу

У співпраці з Інститутом механіки імені С.П.Тимошенка НАН України було проведено математичне моделювання задачі тривимірної теорії стійкості шарувато композитного матеріалу при стиску поверхневим навантаженням, яка зводиться до розв'язування часткової узагальненої алгебраїчної проблеми власних значень (АПВЗ) із стрічковою матрицею. Саме на розв'язування АПВЗ затрачається найбільше комп'ютерних ресурсів та часу. Отже, ефективність розв'язування всієї задачі в значній мірі залежить від ефективного розв'язування АПВЗ.

Тому було застосовано розроблені інтелектуальні програми, що реалізують паралельні алгоритми методу ітерацій на підпросторі для стрічкових матриць на різних комп'ютерних архітектурах [25].

Задача розв'язувалася з такими вихідними даними: порядок матриць – 12282; напівширина стрічки матриці *A* – 6212 та матриці *B* – 71; об'єм пам'яті – 2 Gb.

Порівняльна часова характеристика результатів розв'язування АПВЗ різними алгоритмами методу ітерацій на підпросторі на різних комп'ютерних архітектурах:

- послідовним алгоритмом час розв'язування – 22 хв;
- гібридним алгоритмом на Інпарком\_pg: при використанні одного GPU – 0 хв 18 сек, при використанні двох GPU – 0 хв 10 сек;
- паралельним алгоритмом на Інпарком\_xp з процесором Intel Xeon Phi, використовуючи 64 ядра, – 0 хв 7 сек.

Отже, за гібридним алгоритмом розв'язування АПВЗ одержано такі прискорення у порівнянні з послідовною версією алгоритму: на гібридному персональному комп'ютері – в 18 і 33 раз, використовуючи один і два GPU відповідно. За паралельним алгоритмом на комп'ютері з новітніми Intel Xeon Phi процесорами (64 ядра), одержано прискорення в 45 раз.

На основі обчислених власних значень було визначено величини критичних параметрів стійкості шарувато композитного матеріалу при стиску поверхневим навантаженням.

## **ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА КОМП'ЮТЕРІ ІНПАРКОМ\_ХР**

### **Математичне моделювання аналізу міцності будівельних конструкцій**

Задачі розрахунку міцності конструкцій та споруд виникають у багатьох галузях народного господарства, зокрема в будівництві, в різних галузях машинобудування тощо. Зростаючі вимоги до якості проектних рішень, а також використання нових конструктивних матеріалів пов'язані із виникненням якісно нових задач великих розмірів. Для їх комп'ютерного моделювання зростає потреба в нових методах, пов'язаних з побудовою і дослідженнями коректних комп'ютерних моделей, які адекватно відображають реальну роботу конструкцій.

В свій час, на основі існуючого програмного комплексу ЛПРА, призначеного для розв'язування задач розрахунку міцності будівельних конструкцій на персональних комп'ютерах, було розроблено програмний комплекс ЛПРА-кластер для кластерних комплексів та комп'ютерів гібридної архітектури [27]. Але ЛПРА-кластер широко використовує мережеві технології, а основний режим роботи користувача – режим віддаленого доступу, який передбачає копіювання надвеликих обсягів даних на кластерний комплекс та у зворотному напрямку. До того ж такий режим не забезпечує конфіденційності розрахунків.

Новий потужний комп'ютер Інпарком\_хр (у форматі персонального комп'ютера) дозволяє використовувати високопродуктивні обчислення локально. Зважаючи на те, що стандартний програмний комплекс ЛПРА створений для використання в операційному середовищі Windows, на комп'ютері Інпарком\_хр передбачена можливість використовувати, крім Linux, також операційне середовище Windows.

При моделюванні процесів за допомогою програмного комплексу ЛПРА виникають задачі лінійної алгебри, у яких порядок матриць – від 100 000 до десятків мільйонів. Очевидно, що для їх розв'язування затрачаються величезні комп'ютерні ресурси. Завдяки потужності процесора Intel Xeon Phi та ефективних паралельних програм з бібліотеки Inparlib\_хр при розв'язуванні таких задач на Інпарком\_хр отримано скорочення часу розв'язування в 20 і більше раз у порівнянні з часом їх розв'язування на однопроцесорному комп'ютері.

### **Математичне моделювання стану та ресурсу зварних конструкцій**

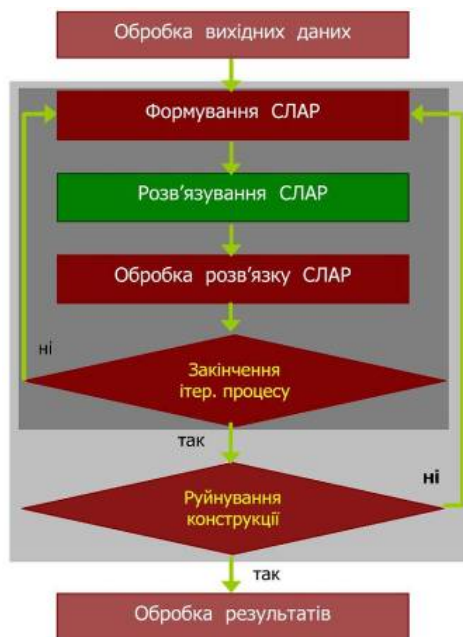
Діагностика технічного стану зварних конструкцій, що працюють при істотних зовнішніх навантаженнях і в умовах агресивних середовищ, є ключовим аспектом гарантування їх безпечної експлуатації. Області застосування таких конструкцій (атомна і теплова енергетика, трубопровідний транспорт) передбачають високі вимоги до їх довгострокової надійності. Важливим є якомога точніше визначення граничного стану, виходячи з відомого ступеня експлуатаційного пошкодження, до якого, передусім, слід віднести локальні поверхневі корозійні втрати металу.

Для розв'язування практичних задач, пов'язаних з термомеханічними процесами у зварюванні та при експлуатації зварних конструкцій, в Інституті електрозварювання імені Е.О. Патона НАН України розроблено програмний пакет WeldPredictions. Цей пакет реалізує послідовну модель обчислень і використовується на персональних комп'ютерах. Але для розрахунків сучасних тривимірних моделей може знадобитися значних обчислювальних ресурсів та часу – декількох діб неперервних обчислень на однопроцесорному комп'ютері. Тому доцільним є використання більш потужних комп'ютерів з паралельною організацією обчислень, зокрема, багатоядерного комп'ютера Інпарком\_хр.

Розглянемо коротко одну з типових задач математичного моделювання процесів зварювання та споріднених технологій [28], а саме задачу чисельного аналізу напружено-деформованого стану трубопровідних елементів з урахуванням зародження, взаємодії і розвитку пор в'язкого руйнування. В загальному випадку, механізм в'язкого руйнування представляється декількома послідовними етапами: зародження пор в'язкого руйнування

при виробництві конструкції; збільшення розмірів пор при пластичній деформації, взаємодія і об'єднання пор в'язкого руйнування; зародження макродефекту і відповідне зниження несучої здатності як дефектної області, так і конструкції в цілому; розвиток макродефекту. Кожний з цих етапів має різну фізико-механічну природу і описується відповідною взаємопов'язаною моделлю.

На рис. 4 представлено технологічну схему розв'язування задач чисельного аналізу напружено-деформованого і граничного станів зварних конструкцій з урахуванням зародження, взаємодії та розвитку пор в'язкого руйнування.



**Рис. 4** – Схема розв'язування розрахункових задач

З рис. 4 ми бачимо, що в цій технологічній схемі на кожній ітерації використовується розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь великого порядку. Саме на цю задачу витрачається найбільше комп'ютерних ресурсів та часу. Крім того, оригінальний програмний пакет WeldPredictions працює в операційному середовищі Windows. Але задачі великих розмірів, які виникають, часто потребують обчислювальних ресурсів більших, ніж можна використати в цій операційній системі (значно більше 4 Гбайт). Час розв'язування таких задач на багатоядерному персональному комп'ютері Інпарком\_хр, в середовищі ОС Linux при використанні пакету WeldPredictions та необхідних програм з бібліотеки Inparlib\_хр, скорочується до 50 раз.

## **ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ**

В результаті виконання науково-технічного проекту «Розробка інтелектуального паралельного комп'ютера на процесорах нового покоління Intel Xeon Phi для задач науки та інженерії» в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України розроблено

одновузловий інтелектуальний паралельний комп'ютер Інпарком\_хр на процесорах Intel Xeon Phi нового покоління для математичного моделювання в науці та інженерії.

Спільно з ДП «Електронмаш» створено експериментальний зразок цього багатоядерного комп'ютера з процесором Intel Xeon Phi 7210 (64 ядра), додатковими 192 Гбайт оперативної пам'яті та SSD накопичувачем обсягом 240 Гбайт.

Для забезпечення ефективного виконання математичного моделювання процесів та явищ в різних предметних областях розроблено інтелектуальне алгоритмічно-програмне забезпечення Inparsoft\_хр для автоматичного дослідження і розв'язування з оцінками достовірності результатів базових задач обчислювальної математики з наближеними даними. Крім того, з метою ефективного використання на Інпарком\_хр, програмного забезпечення Inparsoft\_хр та його окремих компонент проведено модифікацію існуючого прикладного програмного забезпечення для математичного моделювання в галузях будівництва, тепломасопереносу, електрозварювання, стійкості конструкцій.

Створений інтелектуальний багатоядерний персональний комп'ютер Інпарком\_хр реалізує високопродуктивні обчислення (до 3,5 Тфлопс) у форматі одного вузла за рахунок новітніх апаратних рішень процесора Intel Xeon Phi, ущільнення обчислень, урахування багаторівневої структури пам'яті та інтелектуалізації процесів дослідження і розв'язування задач. Експериментальні дослідження практичних задач на Інпарком\_хр показали істотне підвищення продуктивності праці користувачів та гарантію достовірності результатів математичного моделювання в галузях науки та інженерії.

Створений паралельний комп'ютер Інпарком\_хр буде застосовуватися для розв'язування цілого спектру нагальних задач математичного моделювання, зокрема в таких областях: машинобудування, ядерна енергетика, авіа- та суднобудування, оборонна галузь, галузі промислового та цивільного будівництва, електрозварювання, тощо.

Експериментальний зразок Інпарком\_хр вже використовується на ДП «Електронмаш» для проведення наукових досліджень та інженерних розрахунків, зокрема таких задач: аналіз міцності будівельних об'єктів; розрахунок фільтрації в багатокомпонентних середовищах; математичне моделювання напружено-деформованого стану зварних конструкцій.

Завдяки меншій вартості, габаритам та енергоспоживанню створений персональний суперкомп'ютер Інпарком\_хр орієнтований в основному на індивідуальне (локальне) використання, тим самим суттєво піднімаючи ресурс персонального комп'ютерінга для науково-технічних розрахунків. Таке використання (поза комп'ютерних мереж) є актуальним для багатьох користувачів, наприклад, для автоматизації проектування в галузі будівництва, оборонній промисловості тощо, забезпечуючи конфіденційність

розрахунків. З іншого боку існує можливість використання цього комп'ютера і у віддаленому доступі декількома користувачами одночасно.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. TOP 500. URL: <http://www.TOP500.org/> (дата звернення: 24.04 2018).
2. Wilkinson J.H. *Rounding Errors in Algebraic Processes*. – London: H.W. Stat. Off, 1963. – 161 p.
3. Уилкинсон Дж.Х. Райнш К. *Справочник алгоритмов на языке Алгол. Линейная алгебра*. – М.: Машиностроение. – 1976. – 389 с.
4. Воеводин В.В. *Ошибки округлений и устойчивость в прямых методах линейной алгебры*. – М.: Изд. ВЦ МГУ, 1969. 153 с.
5. Молчанов И.Н. *Машинные методы решения прикладных задач. Алгебра, приближение функций*. – Київ: Наукова думка. – 1987. – 288 с.
6. Химич А.Н. *Оценки возмущений для решения задачи наименьших квадратов // Кибернетика и системный анализ*. – 1996, № 3.– С. 95 – 102.
7. Химич А.Н. *Оценки полной погрешности решения систем линейных алгебраических уравнений для матриц произвольного ранга. // Компьютерная математика*. – 2002, № 2. – С. 41 – 49.
8. Химич А.Н., Войцеховский С.А., Брусникин В.Н. *О достоверности линейных математических моделей с приближенно заданными исходными данными. // Математические машины и системы*. – 2004, № 3. – С. 54 – 62.
9. Форсайт Дж., Малькольм М., К. Моулер. *Машинные методы математических вычислений*. – М.: Мир. – 1980. – 279 с.
10. Голуб Дж., Лоун Ч Ван. *Матричные вычисления*. – М.: Мир. – 1999. – 548 с.
11. Лоусон Ч., Хенсон Р. *Численное решение задач метода наименьших квадратов*. – М.: Наука. – 1980. – 279 с.
12. Чесбро Г. *Открытые инновации. Создание прибыльных технологий*. – М.: Поколение. – 2007. – 336 с.
13. Гарнавский Г.А., Алиев А.В. *Математическое моделирование: основные сегменты, их особенности и проблемы // Вычислительные методы и программирование*. – 2007. – Т. 8. – С 297 – 310.
14. Ильин В.П. *О некоторых проблемах «заоблачного» математического моделирования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика*. – 2014. – Т. 3, № 1. – С. 68 – 79.
15. Хімич О.М., Молчанов І.М., В.І. Мова, О.О. Ніколайчук, О.В. Попов, Т.В. Чистякова, М.Ф. Яковлев, В.Г. Тульчинський, Р.А. Ющенко *Інтелектуальний персональний суперкомп'ютер для розв'язування науково-технічних задач // Наука і інновації*. – 2016. – 12, № 4, С. 17–31.
16. Химич А.Н., Молчанов И.Н., Попов А.В., Чистякова Т.В., Яковлев М.Ф. *Параллельные алгоритмы решения задач вычислительной математики*. – Киев: Наукова думка. – 2008. – 247 с.
17. Химич А.Н., Молчанов И.Н., Мова В.И. и др. *Численное программное обеспечение MIMD-компьютера Инпарком*. – Киев: Наукова думка. – 2007. – 222 с.
18. IntelXeon Phi. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/processors/xeon-phi/> (дата звернення: 20.04 2018).
19. HC27.25.710-Knights-Landing-Sodani-Intel\_copy.pdf. URL: <https://www.hotchips.org/> (дата звернення: 22.04 2018).
20. Хімич О.М., Попов О.В., Чистякова Т.В., Рудич О.В., Чистяков О.В. *Інтелектуальна система для дослідження та розв'язування задач на власні значення на паралельних комп'ютерах з процесорами Intel Xeon Phi. // Науково-теоретичний журнал «Штучний інтелект»*. – 2017. – № 2. – С. 119 – 127.

21. *Чистяков О.В.* Про особливості розв'язання алгебраїчної проблеми власних значень на паралельних комп'ютерах з процесорами Intel Xeon Phi // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку», присвяченої 60-річчю заснування Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, м. Київ, 13 –15 грудня 2017 р., С 166 – 167.
22. *Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Паралельные вычисления /– СПб.: БХВ-Петербург. – 2002. – 608 с.
23. OpenMP. V. 4.0. URL: <http://www.openmp.org/mp-documents/OpenMP4.0.pdf/> (дата звернення: 24.04 2017).
24. Intel Math Kernel Library (MKL). Reference Manual URL: <https://software.intel.com/en-us/articles/mkl-reference-manual/> / (дата звернення: 20.04 2017).
25. *Химич А.Н., Попов А.В., Чистяков О.В.* Гибридные алгоритмы решения алгебраической проблемы собственных значений с разреженными матрицами // Кибернетика и системный анализ. – 2017. – Том 53, № 6. – С. 132 – 146.
26. ANSYS – Simulation Driven Product Development: URL: <https://www.ansys.com> (дата звернення: 20.04 2018).
27. *Химич А.Н., Полякко В.В., Попов А.В., Рудич О.В.* Решение задач расчета прочности конструкций на МІМD-компьютере // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 750 – 760.
28. *Великованенко Е.А., Миленин А.С., Попов А.В., Сидорук В.А., Химич А.Н.* Методы и технологии параллельных вычислений для математического моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом вязкого разрушения // Проблемы управления и информатики. – 2014. – № 6, – С. 42 – 52.