

УДК 004.272.43.003.13

В.П. Іващенко¹, Г.Г. Швачич¹, Є.О. Башков²
¹Національна металургійна академія України,
²Донецький національний технічний університет
bashkov@pmi.dgtu.donetsk.ua

Дослідження оцінок ефективності модульної багатопроцесорної кластерної системи

Статтю присвячено проблемі дослідження оцінок ефективності багатопроцесорної обчислювальної системи. Основна увага приділяється дослідженню ефективності й прискорення обчислень шляхом збільшення кількості вузлів кластерної системи. Виведено аналітичні співвідношення основних оцінок ефективності обчислень через параметри багатопроцесорної системи.

Ключові слова: персональний обчислювальний кластер, багатопроцесорна обчислювальна система, прискорення, ефективність, коефіцієнт завантаження обчислювальної мережі, обчислювальні вузли.

Вступ

Застосування паралельних обчислювальних систем являє собою стратегічний напрям розвитку обчислювальної техніки. Ця обставина викликана не тільки принциповим обмеженням максимально можливої швидкодії звичайних послідовних ЕОМ, але пояснюється практично постійним існуванням обчислювальних задач, для розв'язування яких недостатньо можливостей існуючих засобів обчислювальної техніки. До таких задач відносяться, наприклад, числове моделювання процесів гідродинаміки й металургійної теплофізики [1, 2, 3], задачі на розпізнавання образів, оптимізаційні задачі з великою кількістю параметрів, моделювання клімату, розрахунки в генній інженерії, проектування інтегральних схем, аналіз забруднення навколишнього середовища [4], а також розв'язок широкого кола багатовимірних нестационарних задач [5] і т. д.

Проте ефективність паралелізації обчислень істотно залежить від багатьох чинників, один з найважливіших – це особливості пересилання даних між сусідніми вузлами багатопроцесорної системи, що зазвичай є найповільнішою частиною алгоритму і може звести нанівець ефект від збільшення числа використовуваних процесорів.

Практично одночасно з появою комп'ютерів виникла необхідність в оцінці їх продуктивності та в подальшому порівнянні обчислювальних систем з огляду на цей параметр. Звичайно, хотілося б мати просту і єдину методику апріорного порівняння обчислювальних систем між собою. В ідеальній ситуації це могло б бути визначення за деяким законом одного числа для кожної системи, яке б і відображало їхню загальну характеристику. З цього погляду

природною ознакою будь-якого комп'ютера виступає його пікова продуктивність. Цей показник визначає той максимум, на який здатен відповідний комп'ютер. Для задач обчислювального характеру в багатьох випадках операції над дійсними числами виконуються повільніше, ніж, скажімо, керуючі, або реєстрові, операції. Це послужило причиною застосування іншого способу виміру пікової продуктивності, коли враховується кількість дійсних операцій, які виконує комп'ютер за одиницю часу. Для цього було введено одиницю виміру – флопс. Урахування обчислювальної складності програми дає можливість користувачеві визначити тільки нижню межу оцінки затрат часу на її виконання. Існують програми, які виконують роль еталона, тобто вони дозволяють судити про можливості обчислювальної системи. На підставі різних критеріїв створювали так звані тестові набори програм. Наприклад, таким тестом став *LINPACK*, його призначено для розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

Характеристики комп'ютерів, отримані за результатами тестування, завжди викликали й викликатимуть недовіру та критику. Один з можливих напрямів виходу з даної ситуації полягає у формуванні набору тестів, кожен з яких доповнював би один одного. Таким чином, якщо одне число не може адекватно охарактеризувати обчислювальну систему, то можна спробувати зробити це за допомогою набору чисел.

З цих позицій і буде оцінюватися ефективність багатопроцесорної кластерної системи, яка досліджується в даній роботі. Ці дослідження проведено в межах виконання науково-дослідної роботи «Математичне моделювання режимів термічної обробки при швидкісному циклічному нагріванні й охолодженні довгомірною виробу».

Постановка проблеми досліджень

Одна з основних проблем використання кластерної системи до розв'язку класу задач, що розглядаються в цій роботі, може бути сформульована таким чином: маємо різницеву сітку розмірності M , час обчислення задачі, яка розв'язується з використанням однопроцесорної системи, визначається величиною t . Цей параметр є ключовим. Необхідно істотно зменшити час обчислень, зберігаючи значення M .

Саме питанням швидкодії та продуктивності приділяється основна увага при конструюванні кластерних систем. Такий підхід орієнтовано, наприклад, на розробку нових технологічних процесів (коли час обчислень являє собою критичну величину) [6]. Крім того, аналогічні задачі часто доводиться розв'язувати в медицині, військовій техніці та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Переважає більшість функціонуючих суперобчислювальних установок – це фактично багатопроцесорні паралельні обчислювальні системи архітектури *MPP* (*Massively Parallel Processing*). Багатопроцесорні обчислювальні системи, сконструйовані на базі локальних мереж, почали називати «кластерними системами» або просто «кластерами». Це пояснюється тим, що згадана система *MPP* мало відрізняється від звичайної локальної мережі.

У даній статті розглядаються так звані блейд-серверні рішення багатопроцесорних систем, при яких кілька однотипних материнських модулів встановлюються в одному корпусі. Практика показує, що блейд-системи більш компактні й зручні в обслуговуванні, а їхня реалізація не набагато дорожча порівняно з багатопроцесорними комп'ютерними комплексами. Але завдяки зростаючому попиту й пропозиції блейд-конфігурацій на нашому ринку, було прийнято рішення про створення саме такого кластерного пристрою для математичного моделювання багатовимірних задач.

Організація блейд-кластера полягає в об'єднанні лез в єдину мережу через комутатор, встановлений у тому самому корпусі. Для блейд-кластера буває достатньо одного жорсткого диска, на якому розміщено образ завантажуваної системи, при цьому використовують механізм мережевого завантаження *Network boot*. При вмиканні системи *Master*-вузол через мережевий комутатор роздає *IP*-адреси всім вузлам кластера, тобто відбувається початкова ініціалізація, і кластер готовий до роботи.

Саме з огляду на останні досягнення у справі конструювання багатопроцесорних систем і було створено персональний обчислювальний

кластер [7], блок-схема якого подана на рис.1. До того ж у конфігурації кластера було обрано шість лез, а це забезпечує в разі потреби його розширення за рахунок встановлення додаткових лез. Кожен вузол працює під керуванням власної копії операційної системи, причому найчастіше використовують стандартні операційні системи: *Linux*, *NT*, *Solaris* і т. ін. Склад і потужність вузлів описаного кластера може змінюватись, що дозволяє створювати неоднорідні системи. Комутуюча мережа з'єднує процесори один з одним.

Мета й завдання досліджень

Завдання, на вирішення якого спрямовано цю роботу, полягає у дослідженні оцінок ефективності розробленої багатопроцесорної кластерної обчислювальної системи.

При цьому необхідно розв'язати такі задачі:

- оцінити ефективність кластерної системи в організації одностороннього й двостороннього режимів граничного обміну даними;
- оцінити ефективність кластерної системи в організації напівдуплексного і дуплексного режимів роботи;
- оцінити ефективність кластерної системи при організації багатоканальних режимів функціонування обчислювальної мережі кластера.

Крім того, необхідно провести дослідження, спрямовані на визначення завантаженості лінії зв'язку кластерної системи. При цьому належить вивести аналітичне співвідношення для коефіцієнта завантаженості лінії зв'язку кластерної системи через її параметри.

Для зручності проведення досліджень ефективності персонального обчислювального кластера треба також встановити аналітичні співвідношення для визначення його основних числових характеристик через параметри обчислювальної системи.

Основа цього кластера являє собою встановлені у стійці щільно упаковані системи з процесорами лезового типу. Усередині стійки розміщено вузли, апаратура для ефективного з'єднання компонентів, апаратура керування внутрішньою мережею системи і под.

Вузли кластера можуть бути функціонально об'єднані в дві групи, а саме:

1. Обчислювальні вузли, які розв'язують основні обчислювальні задачі, власне, для цього і спроектовано кластерну систему.

2. Вузли інфраструктури, зокрема введення – виведення, вузли керування і вузли запам'ятовувальних пристроїв. Вони забезпечують керування системами і заданими функціями, що необхідні для об'єднання комп'ютерних вузлів у цілісний комплекс.

Упаковка обчислювальних вузлів, на скільки це можливо, виконана щільною, і вона має достатні можливості для ефективного з'єднання компонентів. Головні вузли, вузли керування і вузли запам'ятовувальних пристроїв забезпечують особливі функції керування

кластером – завантаження, керування пристроями, зовнішнє введення – виведення і т. д.

Персональний обчислювальний кластер, блок-схему якого зображено на рис. 1, має такі розміри: ширина 19, висота 10,9, глибина 9 дюймів. Маса кластера становить приблизно 8 кг.

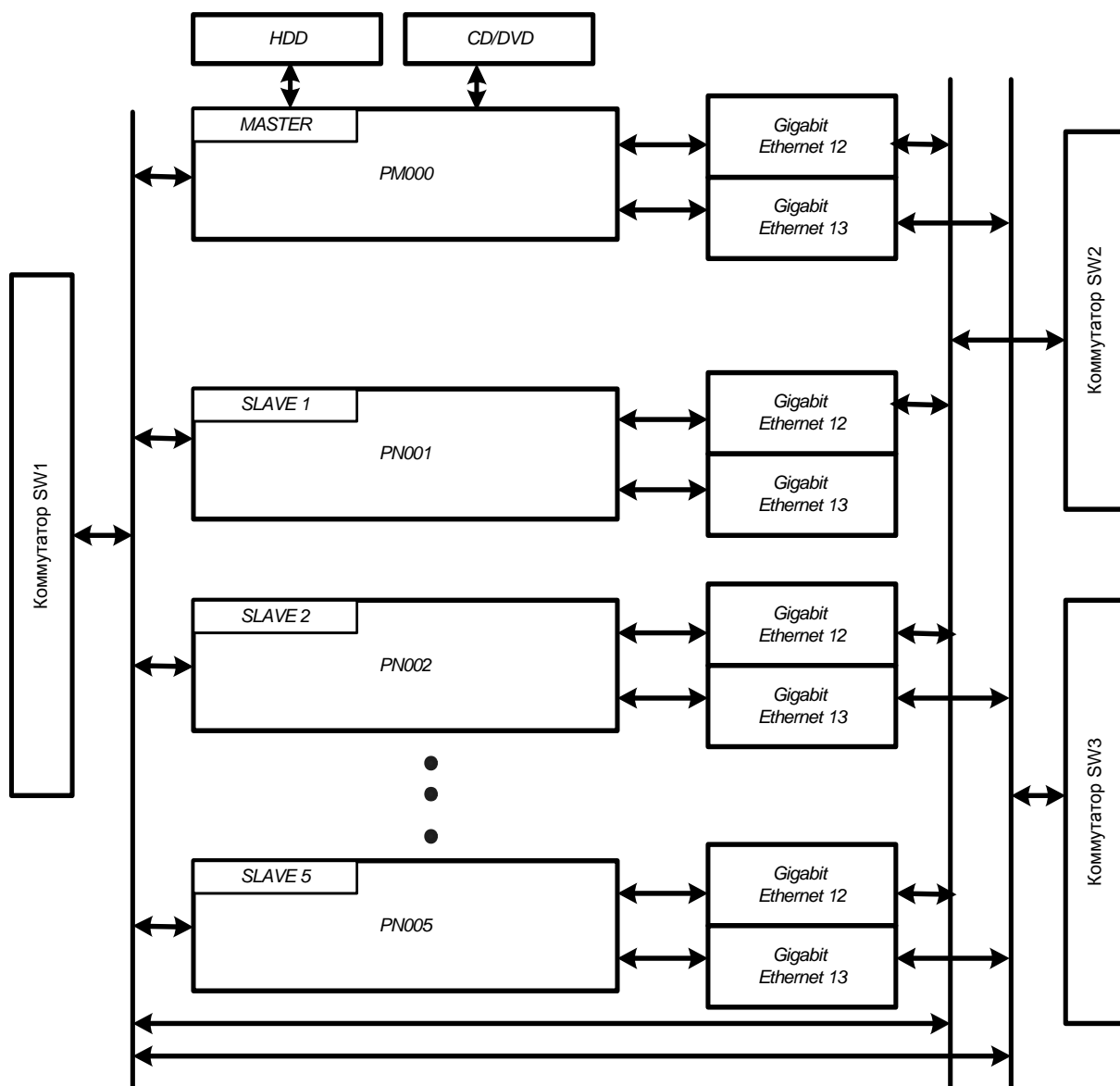


Рисунок 1 – Структура багатопроцесорної системи

Виклад основного матеріалу досліджень

Отже, розглядаємо задачу зменшення часу розрахунків шляхом збільшення кількості вузлів кластерної системи. При цьому область обчислень рівномірно розподіляється між вузлами кластерної системи. Для зручності досліджень

уважатимемо, що форма області, на якій проводяться обчислення, є квадратною.

У даному класі задач усі обчислення виконують на базі різничевої сітки. До того ж для аналізу ефективності багатопроцесорної системи найважливішим параметром буде час рахунку однієї ітерації T_{it} стосовно області обчислень. Тоді в умовах застосування багатопроцесорної

системи загальний час рахунку однієї ітерації визначатиметься на підставі такого співвідношення:

$$T = T_n + T_{ex}, \quad (1)$$

тут $T_n = \frac{T_n}{N}$ – час рахунку однієї ітерації при

використанні N обчислювальних вузлів, T_{ex} – час граничного обміну між вузлами кластера, с. Принагідно зауважимо, що коли час рахунку ітерації залежить лише від потужності процесора, то час граничного обміну диктується розміром різничевої сітки, кількістю вузлів кластерної системи і пропускну здатністю обчислювальної мережі.

Отже, величину T_{ex} можна визначити з такого співвідношення:

$$T_{ex} = \frac{E}{V}. \quad (2)$$

У виразі (2) E – обсяг даних в області граничного обміну, Гбіт, V – пропускну здатність мережі кластера (Гбіт/с). В умовах, коли область обчислень максимально завантажена і рівномірно розподілена між вузлами кластера, можна визначити формулу для обчислення обсягу даних граничного обміну. Ця формула матиме такий вигляд:

$$E = m \cdot (N - 1) \sqrt{R}, \quad (3)$$

де N – кількість вузлів кластера, R – обсяг оперативної пам'яті вузла кластера. Відзначимо, що коли $N = 1$, то значення величини E перетвориться на нуль, що є цілком очевидним. Значення m може дорівнювати одиниці для одностороннього режиму граничного обміну даними, або двом для двостороннього.

У зазначених умовах можна оцінити час розрахунку однієї ітерації, до складу якого буде входити, власне, час рахунку однієї ітерації при використанні N вузлів кластерної системи і час граничного обміну даними залежно від кількості вузлів кластера N , тобто

$$T = \frac{T_{it}}{N} + \frac{m \cdot (N - 1) \cdot \sqrt{R}}{V}. \quad (4)$$

Аналіз співвідношення (4) показує, що розподіляючи область обчислень між вузлами кластера, зменшуємо обсяг обчислень кожним його лезом. Внаслідок того, що вузли багатопроесорної системи працюють паралельно, то й загальний час рахунку ітерації стає меншим. У той же час, із збільшенням кількості вузлів кластера збільшується також обсяг граничних даних і відповідно час обміну даними між вузлами.

Реалізуючи режим агрегації каналів обчислювальної мережі кластера, можна збільшити швидкість обміну даними у мережі в k разів, при цьому величина k відповідає кількості каналів, які працюють паралельно, тоді продуктивність мережі буде визначатись таким чином:

$$V = k \cdot d \cdot V_n, \quad (5)$$

де V_n – пропускну здатність мережі кластера, Гбіт/с, k – кількість каналів зв'язку обчислювальної мережі, які працюють одночасно (кількість обчислювальних мереж), d – напівдуплексний ($d = 1$), або дуплексний ($d = 2$) режим роботи обчислювальної мережі кластерної системи.

Для розрахунку прискорення й ефективності кластера за основу були взяті загальноприйняті в теорії паралельних обчислень формули. Так, ефективність розпаралелювання

$$Q = \frac{S}{N}, \quad (6)$$

при цьому

$$S = \frac{t_1}{t_n}, \quad (7)$$

де S – прискорення; t_1 – час виконання задачі на одному процесорі; t_n – час виконання задачі на n процесорах.

Оцінювання ефективності кластерної системи можна здійснити через основні параметри персонального обчислювального кластера, зокрема через часові параметри обчислювального процесу, а саме:

$$\eta = \frac{T_n}{T}, \quad (8)$$

Тоді з урахуванням співвідношення (1) формулу (8) можна записати таким чином:

$$\eta = \frac{\frac{T_i}{N}}{\frac{T_i}{N} + T_{ex}}. \quad (9)$$

Беручи до уваги вирази (2), (3), (5), отримуємо остаточну оцінку ефективності кластерної системи через її параметри, тобто

$$\eta = \frac{T_i \cdot k \cdot d \cdot V_n \cdot N}{T_i \cdot k \cdot d \cdot V_n \cdot N + N^2 \cdot m \cdot (N - 1) \cdot \sqrt{R}}. \quad (10)$$

Розрахунки ефективності кластерної системи, які проводилися за формулами (6) і (10), дозволяють відзначити збіг результатів з точністю до одного знака, що пояснюється характером обчислень.

Відповідно до цих співвідношень було проведено обчислювальні експерименти для багатопроцесорної кластерної системи, блок-схему якої зображено на рис. 1. Тут вихідними було прийнято такі характеристики класу розв'язуваних задач і самої кластерної системи:

$$T_{it} = 100 \text{ с}, V_n = 1 \text{ Гбіт/с}, R = 8 \text{ Гбіт}.$$

На першому етапі для відображення повної картини процесів, що відбуваються в багатопроцесорній обчислювальній системі, були проведені суто теоретичні дослідження. Так, у межах напівдуплексного програмованого режиму передачі даних в обчислювальній системі було розглянуто режими одностороннього та двостороннього пересилання даних між її сусідніми вузлами.

Зауважимо, що напівдуплексний режим дозволяє передавати інформацію каналами зв'язку по черзі в різні моменти часу. Схему реалізації такого режиму зображено на рис. 2.

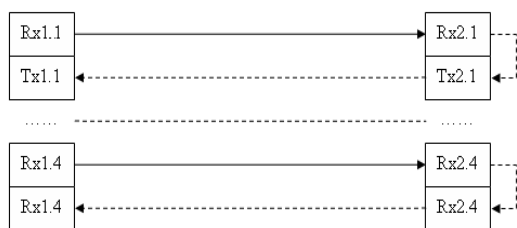


Рисунок 2 – Схема напівдуплексного режиму передачі даних в обчислювальній системі

На рис. 2 пунктирними лініями показано процес узгодження прийому й передачі даних.

Дослідження особливостей організації граничного обміну даних

При розв'язуванні встановленого типу задач протягом кожної ітерації процесори обмінюються даними на стиках блоків, використовуючи актуальні значення змінних. На першому етапі особливості пересилання даних між сусідніми вузлами багатопроцесорної системи досліджуються в одному напрямку.

Вихідні дані для дослідження перелічено в табл. 1.

Отримані результати моделювання відображено в табл. 2.

Результати моделювання подаємо також у вигляді графічних залежностей (рис. 3, 4).

Як бачимо, на рис. 3, час рахунку однієї ітерації при збільшенні числа вузлів багатопроцесорної системи зменшується за

гіперболічною залежністю (крива 1). Поряд з цим час граничного обміну при збільшенні числа вузлів багатопроцесорної системи збільшується за лінійним законом (лінія 2). Загальну картину зміни значення часу рахунку однієї ітерації в багатопроцесорній системі ілюструє залежність, відображена кривою 3. Аналіз такої кривої показує, що час розрахунків на першому етапі зменшується при збільшенні кількості вузлів кластера. Подібний результат, здавалось, і був передбачений.

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку характеристик системи при односторонньому режимі обміну інформацією

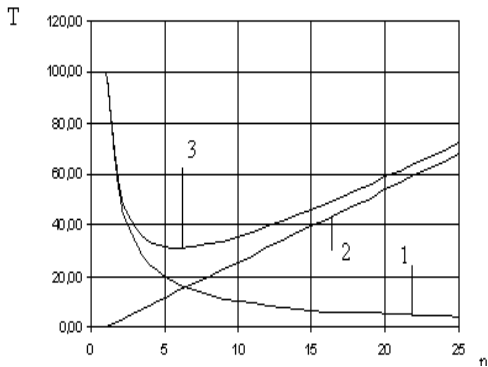
V_n	1 Гбіт/с
T_{it}	100 с
R	8 Гбіт
m	1
d	1
k	1

Таблиця 2. Результати розрахунку основних характеристик системи при односторонньому режимі обміну інформацією

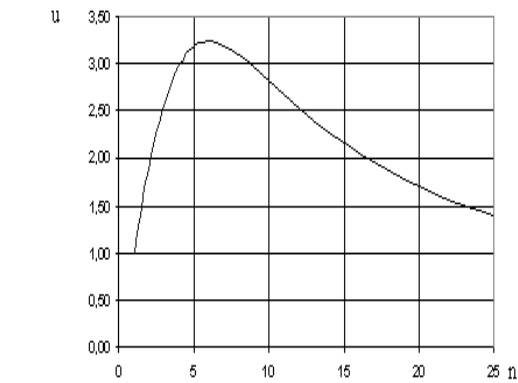
кільк. вузлів	T_n	T_{ex}	T	USK	EF
1	100,00	0,00	100,00	1,00	1,00
2	50,00	2,83	52,83	1,89	0,95
3	33,33	5,66	38,99	2,56	0,85
4	25,00	8,49	33,49	2,99	0,75
5	20,00	11,31	31,31	3,19	0,64
6	16,67	14,14	30,81	3,25	0,54
7	14,29	16,97	31,26	3,20	0,46
8	12,50	19,80	32,30	3,10	0,39
9	11,11	22,63	33,74	2,96	0,33
10	10,00	25,46	35,46	2,82	0,28
11	9,09	28,28	37,38	2,68	0,24
12	8,33	31,11	39,45	2,54	0,21
13	7,69	33,94	41,63	2,40	0,18
14	7,14	36,77	43,91	2,28	0,16
15	6,67	39,60	46,26	2,16	0,14

Проте зменшення такого часу відбувається до певної межі. Якщо, наприклад, кількість вузлів перевищує шість, то загальний час розрахунків починає зростати. Відбувається це на тлі збільшення обсягу даних, які пересилаються між вузлами. Таким чином, можна відзначити, що в умовах описаної задачі, при постійному розмірі сітки немає сенсу, щоб кількість лез у кластері була більшою шести. Порівняно невисоку ефективність обчислень (54 %) за мінімального часу рахунку однієї ітерації при використанні шести вузлів

обчислювальної системи можна пояснити тим, що ресурси кластера використовуються не в повному обсязі.



Рисунки 3 – Криві залежності часу рахунку однієї ітерації від кількості вузлів багатопроцесорної системи при односторонньому граничному обміні даними



Рисунки 4 – Крива залежності прискорення обчислень від кількості вузлів багатопроцесорної системи при односторонньому граничному обміні даними

За інших рівних умов розглянемо найбільш типовий варіант пересилання даних між сусідніми вузлами системи – двосторонній. Вихідні дані для дослідження такого режиму роботи обчислювальної системи перелічено в табл. 3.

Таблиця 3. Вихідні дані для розрахунку характеристик системи при двосторонньому режимі обміну інформацією

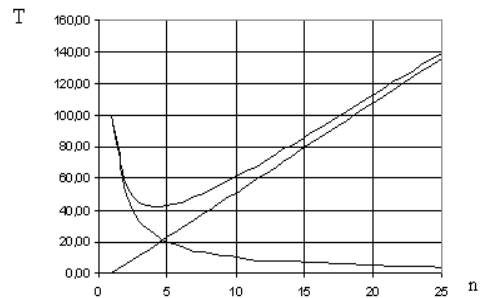
V_n	1 Гбіт/с
T_{it}	100 с
R	8 Гбіт
m	2
d	1
k	1

Отримані результати моделювання зведено в табл. 4.

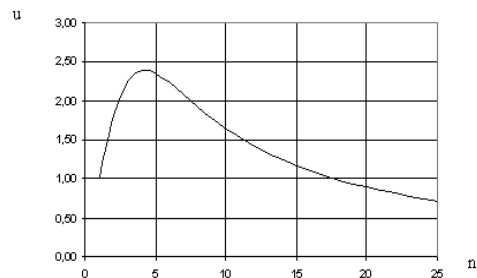
Результати моделювання подаємо також у вигляді графічних залежностей (рис. 5 і 6).

Таблиця 4. Результати розрахунку основних характеристик системи при двосторонньому режимі обміну інформацією

кільк. вузлів	T_n	T_{ex}	T	USK	EF
1	100,00	0,00	100,00	1,00	1,00
2	50,00	5,66	55,66	1,80	0,90
3	33,33	11,31	44,65	2,24	0,75
4	25,00	16,97	41,97	2,38	0,60
5	20,00	22,63	42,63	2,35	0,47
6	16,67	28,28	44,95	2,22	0,37
7	14,29	33,94	48,23	2,07	0,30
8	12,50	39,60	52,10	1,92	0,24
9	11,11	45,25	56,37	1,77	0,20
10	10,00	50,91	60,91	1,64	0,16
11	9,09	56,57	65,66	1,52	0,14
12	8,33	62,23	70,56	1,42	0,12
13	7,69	67,88	75,57	1,32	0,10
14	7,14	73,54	80,68	1,24	0,09
15	6,67	79,20	85,86	1,16	0,08



Рисунки 5 – Криві залежності часу рахунку однієї ітерації від кількості вузлів багатопроцесорної системи при двосторонньому граничному обміні даними



Рисунки 6 – Крива залежності прискорення обчислень від кількості вузлів багатопроцесорної системи при двосторонньому граничному обміні даними

Отже, маємо передумови для підбиття проміжних підсумків досліджень. З одного боку,

двосторонній режим обміну даними, за інших рівних умов, дозволяє при оптимальному варіанті функціонування кластерної системи зменшити кількість вузлів до чотирьох (рис. 6) і, що очевидно, підвищити ефективність обчислень до 60 %. Однак, з іншого боку, як і очікувалося, при двосторонньому режимі обміну даними зменшиться прискорення обчислень за рахунок збільшення часу граничного обміну даними (рис. 4, 6). Очевидно, щоб збільшити прискорення обчислень, необхідно окремо досліджувати вплив способу передачі даних між вузлами кластерної системи. На вирішення цієї проблеми й спрямовано подальші дослідження.

Дослідження особливостей реалізації дуплексного режиму роботи системи

У спроектованій кластерній системі, блок-схему якої зображено на рис. 1, для з'єднання зовнішніх пристроїв використовується шина PCI (англ. Peripheral Component Interconnect, що дослівно перекладається, як взаємозв'язок периферійних компонентів). І тут належить відзначити важливе нововведення: після фізичного підключення зовнішнього пристрою до розніжного з'єднання шини PCI відбувається автоматичне встановлення конфігурації цього пристрою. Між іншим, шина PCI – це один із основних засобів для підключення найрізноманітніших периферійних пристроїв до системної плати кластера. Серед причин успіху PCI – набагато більша швидкість і режим динамічної конфігурації підключених до неї периферійних пристроїв.

Крім того, ця шина передбачає дуплексний режим передачі даних. У режимі "дуплексе" пристрої можуть передавати і приймати інформацію або дані одночасно двома каналами зв'язку, розділеними (рознесеними) фізично. Схему організації такого режиму зображено на рис. 7.

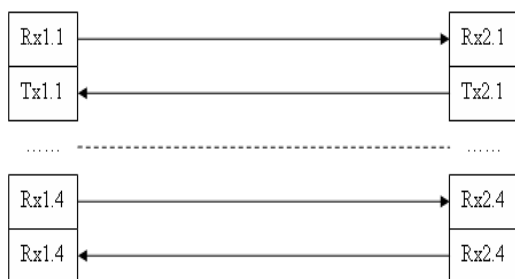


Рисунок 7 – Схема дуплексного режиму передачі даних в обчислювальній системі

Зауважимо, що дуплексний режим – найбільш швидкісний у роботі обчислювальних систем. Він дозволяє ефективно використовувати обчислювальні можливості кластерних

комплексів у поєднанні з високою швидкістю передачі даних каналами зв'язку. Враховуючи описані обставини, підкреслимо актуальність дослідження характеристик ефективності багатопроцесорної системи при реалізації дуплексного режиму роботи.

Вихідні дані для цього дослідження перелічено в табл. 5. Результати моделювання подаємо також у вигляді графічних залежностей (рис. 8, 9). Отримані результати моделювання зведено в табл. 6.

Порівняльний аналіз напівдуплексного (табл. 4) і дуплексного (табл. 6) режимів роботи системи показує, що в режимі "дуплексе" істотно зменшився час обчислень (рис. 4, 8), крім того, значно зросло прискорення обчислень (див. рис. 5, 9). Проте, одночасно необхідно відзначити деяке зниження ефективності обчислень (54 % проти 60 %).

Таблиця 5. Вихідні дані для розрахунку характеристик системи при реалізації дуплексного режиму роботи кластера

V_n	1 Гбіт/с
T_{it}	100 с
R	8 Гбіт
m	2
d	2
k	1

Таблиця 6. Результати розрахунку основних характеристик системи при реалізації дуплексного режиму роботи кластера

кільк. вузлів	T_n	T_{ex}	T	USK	EF
1	100,00	0,00	100,00	1,00	1,00
2	50,00	2,83	52,83	1,89	0,95
3	33,33	5,66	38,99	2,56	0,85
4	25,00	8,49	33,49	2,99	0,75
5	20,00	11,31	31,31	3,19	0,64
6	16,67	14,14	30,81	3,25	0,54
7	14,29	16,97	31,26	3,20	0,46
8	12,50	19,80	32,30	3,10	0,39
9	11,11	22,63	33,74	2,96	0,33
10	10,00	25,46	35,46	2,82	0,28
11	9,09	28,28	37,38	2,68	0,24
12	8,33	31,11	39,45	2,54	0,21
13	7,69	33,94	41,63	2,40	0,18
14	7,14	36,77	43,91	2,28	0,16
15	6,67	39,60	46,26	2,16	0,14

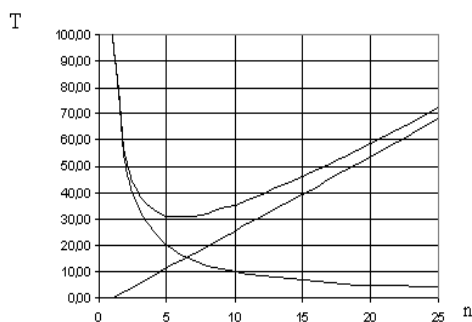


Рисунок 8 – Криві залежності часу рахунку однієї ітерації від кількості вузлів багатопроцесорної системи при дуплексному режимі роботи

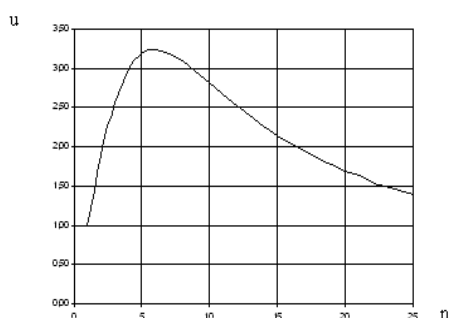


Рисунок 9 – Криві залежності прискорення обчислень від кількості вузлів багатопроцесорної системи при дуплексному режимі роботи

Очевидно, що для підвищення ефективності обчислень необхідно замість однієї комутаційної мережі, де відбувався обмін даними, вводити другу, яка працює паралельно з першою, що дозволить зменшити час граничного обміну даними. Отже, подальші дослідження будуть спрямовані на реалізацію процедури удосконалення обміну даними між вузлами кластерної системи на мережевому рівні.

Дослідження особливостей формування обчислювальної мережі кластерної системи

Основна особливість кластерної системи, яка розглядається в цій роботі (рис. 1), полягає в тому, що обмін даними між обчислювальними вузлами винесено в окрему мережу, яка працює на каналному (другому) рівні з використанням механізмів *channel bonding*, а це забезпечило підвищення швидкості обміну даними і знизило завантаження каналу, який з'єднує вузли кластера. Така реалізація механізму *channel bonding* кластерної обчислювальної системи дозволяє підвищити її ефективність. Подальші дослідження спрямовуються на реалізацію процедури підвищення ефективності

розпаралелювання за допомогою введення додаткових обчислювальних мереж.

Вихідні дані для вивчення згаданого режиму роботи багатопроцесорної системи перелічено в табл. 7. Отримані результати моделювання зведено в табл. 8. Результати моделювання подаємо також у вигляді графічних залежностей (рис. 10, 11).

Таблиця 7. Вихідні дані для розрахунку характеристик системи при двоканальному режимі функціонування обчислювальної мережі кластера

V_n	1 Гбіт/с
T_{it}	100 с
R	8 Гбіт
m	2
d	2
k	2

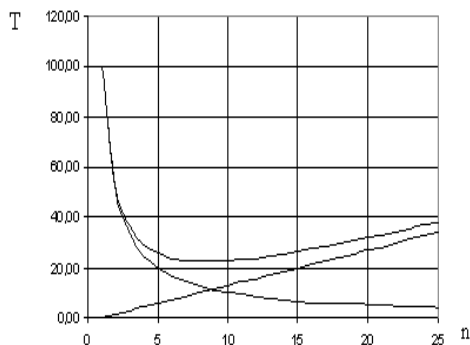
Таблиця 8. Результати розрахунку основних характеристик системи при реалізації двоканального режиму функціонування обчислювальної мережі кластера

кільк. вузлів	T_n	T_{ex}	T	USK	EF
1	100,00	0,00	100,00	1,00	1,00
2	50,00	1,41	51,41	1,94	0,97
3	33,33	2,83	36,16	2,77	0,92
4	25,00	4,24	29,24	3,42	0,85
5	20,00	5,66	25,66	3,90	0,78
6	16,67	7,07	23,74	4,21	0,70
7	14,29	8,49	22,77	4,39	0,63
8	12,50	9,90	22,40	4,46	0,56
9	11,11	11,31	22,42	4,46	0,50
10	10,00	12,73	22,73	4,40	0,44
11	9,09	14,14	23,23	4,30	0,39
12	8,33	15,56	23,89	4,19	0,35
13	7,69	16,97	24,66	4,05	0,31
14	7,14	18,38	25,53	3,92	0,28
15	6,67	19,80	26,47	3,78	0,25

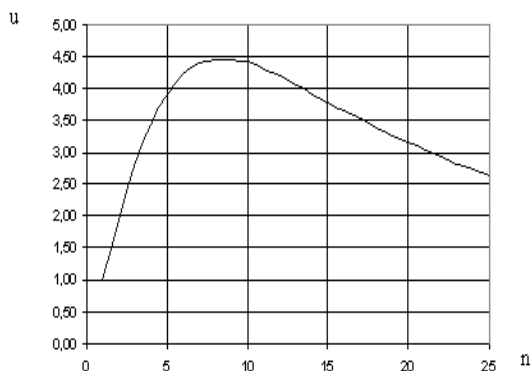
Отже, маємо передумови для кількісної оцінки ефективності багатопроцесорної системи при реалізації двоканального режиму функціонування обчислювальної мережі кластера ($k = 2$). Як показують розрахункові дані (табл. 8), такий режим роботи кластера дозволив не тільки підвищити ефективність системи (в оптимальному режимі це більше 70 %), але й суттєво скоротити час обчислень (див. рис. 8, 10), а також прискорити обчислення (див. рис. 9, 11).

Таких результатів вдалося досягти за рахунок зменшення часу граничного обміну даних між обчислювальними вузлами кластерної системи. Зауважимо, що саме такий режим роботи

обчислювальної системи і запроваджено для кластера, блок-схему якого бачимо на рис.1. Проте, в ході досліджень виникло питання: яким чином зміняться оцінки ефективності кластерної системи при подальшому розширенні режиму *channel bonding*. Наприклад, якщо $k = 4$. Відповідь на це питання можна отримати, провівши додаткові дослідження.



Рисунки 10 – Криві залежності часу рахунку однієї ітерації від кількості вузлів багатопроцесорної системи при реалізації двоканального режиму функціонування обчислювальної мережі кластера



Рисунки 11 – Криві залежності прискорення обчислень від кількості вузлів багатопроцесорної системи при реалізації двоканального режиму функціонування обчислювальної мережі кластера

Вихідні дані для зазначеного режиму роботи багатопроцесорної системи перелічено в табл. 9. Отримані результати моделювання зводимо в табл. 10. Результати моделювання подаємо також у вигляді графічних залежностей (рис. 12, 13).

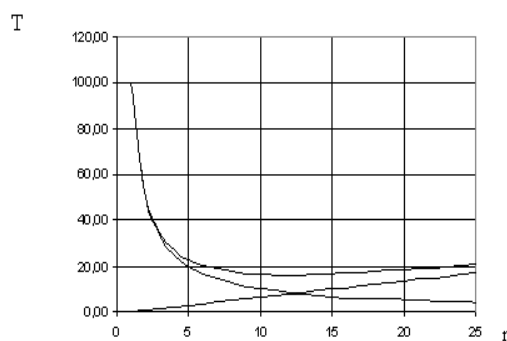
Таким чином, порівняльний аналіз реалізації режиму *channel bonding* кластерної системи, коли $k = 2$ і $k = 4$, показує, що за порівняно однакової ефективності розпаралелювання дещо зменшується час обчислень (приблизно на 5 с) і значно зростає прискорення обчислень (див. рис. 11, 13).

Таблиця 9. Вихідні дані для розрахунку характеристик системи при чотириканальному режимі функціонування обчислювальної мережі кластера

V_n	1 Гбіт/с
T_{it}	100 с
R	8 Гбіт
m	2
d	2
k	4

Таблиця 10. Результати розрахунку основних характеристик системи при реалізації чотириканального режиму функціонування обчислювальної мережі кластера

кільк. вузлів	T_n	T_{ex}	T	USK	EF
1	100,00	0,00	100,00	1,00	1,00
2	50,00	0,71	50,71	1,97	0,99
3	33,33	1,41	34,75	2,88	0,96
4	25,00	2,12	27,12	3,69	0,92
5	20,00	2,83	22,83	4,38	0,88
6	16,67	3,54	20,20	4,95	0,82
7	14,29	4,24	18,53	5,40	0,77
8	12,50	4,95	17,45	5,73	0,72
9	11,11	5,66	16,77	5,96	0,66
10	10,00	6,36	16,36	6,11	0,61
11	9,09	7,07	16,16	6,19	0,56
12	8,33	7,78	16,11	6,21	0,52
13	7,69	8,49	16,18	6,18	0,48
14	7,14	9,19	16,34	6,12	0,44
15	6,67	9,90	16,57	6,04	0,40



Рисунки 12 – Криві залежності часу рахунку однієї ітерації від кількості вузлів багатопроцесорної системи при реалізації чотириканального режиму функціонування обчислювальної мережі кластера

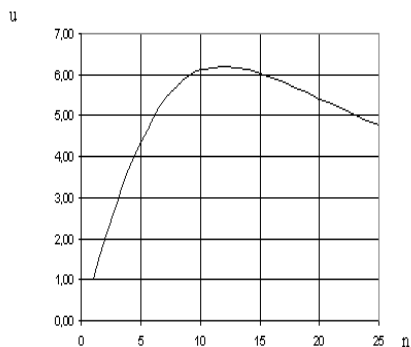


Рисунок 13 – Крива залежності прискорення обчислень від кількості вузлів багатопроцесорної системи при реалізації чотириканального режиму функціонування обчислювальної мережі кластера

У практичній роботі кластерної системи з режимом формування обчислювальної мережі, коли $k = 4$, дослідникові доведеться шукати відповідь на питання: чи буде виправданим зменшення часу обчислень на 5 с і збільшення прискорення обчислень за умови вкладання порівняно серйозних матеріальних засобів в ускладнення конструкції кластерної системи? Певною мірою відповідь на поставлене питання можна отримати, якщо провести дослідження коефіцієнта завантаженості ліній зв'язку кластерної системи.

Дослідження завантаженості ліній зв'язку кластерної системи

Отже, розглянемо характеристику коефіцієнта завантаженості ліній зв'язку кластерної системи ξ . З цією метою введемо співвідношення для коефіцієнта завантаженості ліній зв'язку ξ через параметри кластерної системи, а саме:

$$\xi = \frac{T_{ex}}{T} \quad (11)$$

Беручи до уваги вирази (2) – (5), остаточне значення коефіцієнта завантаженості ліній зв'язку можна записати у вигляді аналітичного співвідношення, вираженого через параметри обчислювального кластера, тобто

$$\xi = \frac{m \cdot N \cdot (N-1) \cdot \sqrt{R}}{T_i \cdot k \cdot d \cdot V_n + N \cdot m \cdot (N-1) \cdot \sqrt{R}} \quad (12)$$

Результати розрахунку коефіцієнта завантаженості ліній зв'язку для дуплексного режиму роботи багатопроцесорної системи без використання режиму *channel bonding* (КЗС1), а

також з його використанням, коли $k = 2$ (КЗС2) і $k = 4$ (КЗС3), наведено в табл. 11.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що, як і очікувалося, при збільшенні числа вузлів кластерної системи значення коефіцієнта завантаженості ліній зв'язку буде зростати. З іншого боку відомо, що коли $\xi = 50\%$, то оперативна пам'ять комутатора буде використовуватися приблизно на 70%. Запас цієї пам'яті (до 30%) резервується для усунення колізій, які можуть виникати внаслідок завантаженості обчислювальної мережі кластера.

Таблиця 11. Результати розрахунку коефіцієнта завантаженості ліній зв'язку кластера при різних режимах функціонування обчислювальної мережі.

кільк. вузлів	КЗС1	КЗС2	КЗС3
1	0,00	0,00	0,00
2	0,05	0,03	0,01
3	0,15	0,08	0,04
4	0,25	0,15	0,08
5	0,36	0,22	0,12
6	0,46	0,30	0,18
7	0,54	0,37	0,23
8	0,61	0,44	0,28
9	0,67	0,50	0,34
10	0,72	0,56	0,39
11	0,76	0,61	0,44
12	0,79	0,65	0,48
13	0,82	0,69	0,52
14	0,84	0,72	0,56
15	0,86	0,75	0,60
16	0,87	0,77	0,63
17	0,88	0,79	0,66
18	0,90	0,81	0,68
19	0,91	0,83	0,71
20	0,91	0,84	0,73
21	0,92	0,86	0,75
22	0,93	0,87	0,77
23	0,93	0,88	0,78
24	0,94	0,89	0,80
25	0,94	0,89	0,81

Отже, можна відзначити, що при першому режимі функціонування кластера можна використовувати не більше шести лез, при другому дев'яти і, нарешті, при третьому – не більше дванадцяти.

Висновки й перспективи подальших досліджень

1. Запропонований персональний обчислювальний кластер *MPP* архітектури, як модульну

багатопроекторну систему створено на базі стандартних обчислювальних вузлів, з'єднаних високошвидкісним комунікаційним середовищем.

2. Визначено оцінки ефективності кластерної системи при організації одностороннього й двостороннього режимів граничного обміну даними. Показано, що двосторонній режим за інших рівних умов, дозволяє в оптимальному варіанті функціонування кластерної системи зменшити кількість вузлів до чотирьох і підвищити ефективність обчислень до 60 %. Однак, з іншого боку, при цьому режимі обміну даними зменшилося прискорення обчислень за рахунок збільшення часу граничного обміну даними.

3. Визначено оцінки ефективності кластерної системи при організації напівдуплексного і дуплексного режимів роботи системи. Доведено, що в режимі "дуплекс" істотно знизився час обчислень і, крім того, значно зросло їхнє прискорення. Проте, одночасно треба підкреслити, що певною мірою знизилася оцінка ефективності обчислень (54 % проти 60 %).

4. Встановлено оцінки ефективності кластерної системи при організації багатоканальних режимів функціонування обчислювальної мережі кластера. Такі режими роботи дозволяють не тільки підвищити ефективність розпаралелювання, але й суттєво зменшити час обчислень, а також значно прискорити обчислення. Таких результатів вдалося досягти за рахунок зменшення часу граничного обміну даними між обчислювальними вузлами кластерної системи.

5. Проведено дослідження, спрямовані на визначення завантаженості ліній зв'язку кластерної системи. Це дозволило встановити оптимальне число вузлів кластерної системи для різних режимів її роботи.

6. Виведено основні аналітичні співвідношення для визначення числових характеристик ефективності кластерної системи через її основні параметри.

7. У своїх подальших дослідженнях автори мають намір висвітлити особливості зв'язку кількох модулів багатопроекторної кластерної системи.

Література

1. Роуч П. Вычислительная гидромеханика / П. Роуч; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
2. Коздоба Л. А. Вычислительная теплофизика / Л.А. Коздоба. – К.: Наук. думка, 1992. – 224 с.
3. Иващенко В.П. Параллельные вычисления и прикладные задачи металлургической теплофизики / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, А.А. Шмукин // Системні технології. Регіональний збірник наукових праць. – 2008. – Т. 1. – Вип. 3(56). – С. 123 – 138.
4. Швачич Г.Г. К вопросу конструирования параллельных вычислений при моделировании задач идентификации параметров окружающей среды / Г.Г. Швачич // Математичне моделювання. – 2006. – № 2 (14). – С. 23 – 34.
5. Швачич Г.Г. О параллельных компьютерных технологиях кластерного типа решения многомерных нестационарных задач / Г.Г. Швачич // Materiály IV mezinárodní vědecko- praktická konference [«Vědecký potenciál světa - 2007»]. – D. 7. – Technické vědy. Matematika. Fyzika. Moderní informační technologie. Výstava a architektura. – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o. – P. 35 – 43.
6. Швачич Г.Г. Математическое моделирование скоростных режимов термической обработки длинномерных изделий / Г.Г. Швачич, В.П. Колпак, М.А. Соболенко // Теория и практика металлургии. Общегосударственный научно-технический журнал. – 2007. – № 4 – 5 (59 – 60). – С. 61 – 67.
7. Иващенко В.П. Персональный вычислительный кластер для моделирования многомерных нестационарных задач / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич // Материалы XVI международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики и механики». – Севастополь, 2008. – С. 235 – 238.

Надійшла до редакції 10.03.2011