

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

© Мельник В.А., 2011

Зроблено огляд особливостей побудови та оцінено технічні характеристики сучасних суперкомп'ютерів, виділено проблемні питання та сформовано основні тенденції їх розвитку. Показано перспективність створення персональних суперкомп'ютерів, зокрема, побудованих на основі універсальних мікропроцесорів та реконфігуровних апаратних прискорювачів.

Ключові слова: високопродуктивні обчислення, суперкомп'ютер, прискорювач.

An overview of modern high-performance computer systems design features is done in the paper, estimated their technical characteristics, highlighted their issues and outlined their major development trends. The perspectives of the personal supercomputers, particularly based on the mainstream microprocessors and reconfigurable hardware accelerators, are shown.

Key words: high-performance computing, supercomputer, accelerator.

Вступ

Склад високопродуктивних обчислювальних систем протягом останніх років зазнав істотних змін. Зміни ці почалися з появою “реконфігуровних обчислень”, тобто обчислень, які виконуються спеціалізованими процесорами, реалізованими на реконфігуровних кристалах програмовних логічних інтегральних схем [1]. Завдяки розвитку технологій проектування реконфігуровних кристалів, методів і засобів синтезу в них обчислювальних пристроїв, з'явилися реконфігуровні апаратні прискорювачі обчислень [2], які сьогодні широко використовуються для підвищення продуктивності універсальних комп'ютерів. Більше того, створюються високопродуктивні обчислювальні системи на основі універсальних процесорів та реконфігуровних прискорювачів [3].

До того ж спеціалізовані апаратні прискорювачі, які використовуються в універсальних комп'ютерах для виконання визначених алгоритмів і наборів алгоритмів (наприклад, прискорювачі обробки відеозображень, які ще називають графічними процесорами, що використовуються в відеокартах універсальних комп'ютерів), також досягли рівня, коли багато реальних завдань можна виконувати за їх допомогою набагато швидше ніж на системах на основі багатоядерних універсальних мікропроцесорів. Наприклад, сучасний графічний процесор *Tesla S1070* фірми *NVIDIA* [4], лідера з виробництва графічних процесорів, підтримує технологію *GPGPU*-обчислень *NVIDIA CUDA*. *GPGPU* [5] (англ. *General-Purpose computing on Graphics Processing Units*) – це технологія використання графічного процесора відеокарти для здійснення загальних обчислень, які зазвичай виконує центральний процесор. *CUDA* [6] (англ. *Compute Unified Device Architecture*) – це архітектура паралельних обчислень фірми *NVIDIA*, яка дозволяє програмістам реалізовувати обчислювальні алгоритми мовою програмування *C* та виконувати їх на графічних процесорах, що підтримують технологію *GPGPU*. При цьому програміст має доступ до набору інструкцій графічного процесора, керує його пам'яттю, таким способом виконуючи на ньому складні паралельні обчислення.

Розвиток апаратних прискорювачів обчислень та поява реконфігуровних прискорювачів вплинули на галузь високопродуктивних обчислювальних систем, загалом, зокрема й на підходи до побудови найпотужнішої ланки високопродуктивних обчислювальних систем – суперкомп'ютерів, а також сприяли появі нового типу високопродуктивних обчислювальних систем – персональних суперкомп'ютерів.

Аналіз останніх досліджень

Аналіз архітектурних особливостей найпродуктивніших згідно з рейтингом *top500* [7] (станом на червень 2011 р.) суперкомп'ютерів показує, що значна їх частина побудована з використанням спеціалізованих апаратних прискорювачів, причому саме завдяки цьому ними досягнуто таких високих показників продуктивності.

Особливістю персональних суперкомп'ютерів [8, 9, 10, 11] також є поєднання в них універсальних програмованих процесорів та спеціалізованих обчислювальних модулів, що дозволяє істотно підвищити загальну продуктивність.

Суть методу реконфігурувальних обчислень та переваги використання ПЛІС для підвищення продуктивності обчислювальних систем показано в роботі [1]. У працях [2, 3] показано основні архітектурні підходи до побудови реконфігурувальних апаратних прискорювачів та створення на їх основі високопродуктивних обчислювальних систем.

Постановка завдання

Зроблено огляд особливостей побудови сучасних високопродуктивних обчислювальних систем і оцінено технічні характеристики традиційних суперкомп'ютерів та нового класу високопродуктивних обчислювальних систем – персональних суперкомп'ютерів. Виділено проблемні питання побудови суперкомп'ютерів та сформовано основні тенденції розвитку високопродуктивних обчислювальних систем. Показано перспективність створення персональних суперкомп'ютерів та виділено основні напрямки їх архітектурного розвитку.

1. Характеристики та особливості сучасних суперкомп'ютерів

До класу суперкомп'ютерів належать комп'ютери, що мають велику порівняно з іншими існуючими комп'ютерами продуктивність, а також основну і зовнішню пам'яті великої ємності [12]. Вони асоціюються з великими розмірами, складними задачами, гранично високими характеристиками. Розглянемо характеристики найпотужніших сучасних суперкомп'ютерів.

Найпродуктивнішим сьогодні згідно з рейтингом *top500* [7] є представлений на 26-й Міжнародній конференції з суперобчислень (*International Supercomputing Conference*), що відбулась в м. Гамбург (Німеччина) в червні 2011 р., суперкомп'ютер під назвою *K Computer* виробництва японської компанії *Fujitsu*, який встановлено в 2011 р. в Інституті фізико-хімічних досліджень *RIKEN Advanced Institute for Computational Science* в м. Кобе (Японія). Назва суперкомп'ютера походить від японського слова “*Kei*” (Кей), що означає 10 пета (10×10^{15}). За результатами тесту *LINPACK*, показник продуктивності *K Computer* становив $8,16 \times 10^{15}$ операцій з рухомою комою за секунду, або 8,16 PFLOPS (петафлопе).

Станом на червень 2011 р. система складалась із 672 комп'ютерних стійок і налічувала 68544 восьмиядерних процесори *SPARC64 VIIIfx* (що в сумі становить 548352 обчислювальних ядра), виготовлених за 45-нанометровим технологічним процесом компанією *Fujitsu*. Продуктивність одного такого процесора 128 GFLOPS. Важливо відзначити, що обчислювальна ефективність (відношення середньої продуктивності до пікової продуктивності) суперкомп'ютера становила 93% [13].

Суперкомп'ютер використовує водяне охолодження, що дозволяє знизити споживання електроенергії. Зазначимо, що загальна споживана потужність суперкомп'ютера становить 9.89 МВт, у той час як середня споживана потужність десяти найпродуктивніших суперкомп'ютерів за версією *top500* – 4.3 МВт. Разом з тим відношення продуктивності суперкомп'ютера до споживаної потужності робить його одним з найбільш енергоефективних суперкомп'ютерів у світі (шосте місце у рейтингу <http://www.green500.org>).

Закінчити роботи над створенням суперкомп'ютера *K Computer* планується до листопада 2012 р. У готовому вигляді система буде складатися більше ніж з 800 стійок і міститиме 81600 процесорів. Проектна фінальна продуктивність суперкомп'ютера становитиме 10 петафлопс. Вартість проекту *K Computer* становить приблизно 1.4 млрд. доларів США. Після завершення всіх модифікацій система *K Computer* буде використовуватися для виконання наукових розрахунків у таких сферах, як фармацевтика, створення нових матеріалів, кліматичні дослідження, метеорологія, попередження про стихійні лиха, автомобілебудування й астрономія.

У період з листопада 2010 р. до червня 2011 р. рейтинг найпродуктивніших суперкомп'ютерів світу *top500* очолював китайський суперкомп'ютер *Tianhe-1A*. Згідно з тестами *LINPACK*, продуктивність цього комп'ютера становила 2,507 PFLOPS. Суперкомп'ютер *Tianhe-1A* спроектований в Національному університеті оборонних технологій Китаю і знаходиться в Національному суперкомп'ютерному центрі в Тяньцзіні.

В основу *Tianhe-1A* покладено сучасну парадигму гетерогенних обчислень – суперкомп'ютер включає 7168 паралельно працюючих графічних процесорів *NVIDIA Tesla M2050* і 14366 центральних процесорів *Intel Xeon*. Якби *Tianhe-1A* використовував тільки центральні процесори без графічних, то йому б знадобилося для досягнення такої ж продуктивності понад 50 тис. процесорів, при цьому площа займаного комп'ютером простору збільшилася б удвічі. Більше того, без графічних процесорів 2,5-петафлопсний комп'ютер характеризувався б величезною споживаною потужністю – не менше ніж 12 МВт. Завдяки використанню гетерогенної архітектури розробникам вдалося знизити енергоспоживання втричі – до 4,04 МВт.

Серед інших сучасних суперкомп'ютерів варто згадати *IBM Roadrunner* та *Jaguar XT5*, обидва виготовлені у США.

Суперкомп'ютер *IBM Roadrunner* був створений фахівцями компанії *IBM* і Лос-Аламоської національної лабораторії США у 2008 р. Система *Roadrunner*, у якій використовуються процесори *Cell* і *AMD Opteron*, продемонструвала сталу продуктивність 1,026 PFLOPS в липні 2008 р. і 1,105 PFLOPS в листопаді 2008 р.

У конфігурацію *Roadrunner* входить 6948 двоядерних процесорів *AMD Opteron* і 12960 процесорів *Cell*, 80 ТБ оперативної пам'яті. Зазначене обладнання розміщено в 288 шафах і з'єднано сотнею кілометрів оптичного волокна. Споживана потужність *Roadrunner* становить 3,9 МВт, що в 2008 р. робило цю систему найбільш енергетично ефективною в світі – вона виконувала 376 млн. обчислень в розрахунку на один Вт електроенергії. Вартість *IBM Roadrunner* перевищувала 100 млн. доларів.

У подальшому компанія *IBM* оголосила про свій намір підкорити наступну висоту – один ексафлоп (exa-FLOP). Анонсувалось, що відповідна система буде створена в Дубліні в межах співпраці з агентством з промислового розвитку Ірландії. Ексафлоп – величина, що дорівнює мільйону трильйонів обчислень з рухомою комою в секунду, що в 1000 разів більше ніж досягнуте зараз значення петафлопа.

Суперкомп'ютер *Jaguar XT5* компанії *Cray* був найпродуктивнішим з листопада 2009 р. до листопада 2010 р., випередивши *IBM Roadrunner*. Його продуктивність становить 1,75 PFLOPS. Він належить до класу систем масового паралелізму і складається з множини автономних обчислювальних вузлів. Кожен обчислювальний вузол містить 2 чотирьохядерних процесори *AMD Opteron 2356* з внутрішньою частотою 2,3 ГГц і 16 ГБ оперативної пам'яті. Всього суперкомп'ютер містить 149504 обчислювальних ядра, більше 300 ТБ оперативної пам'яті та більше 6 ПБ зовнішньої пам'яті.

Якщо проаналізувати архітектурні особливості найпродуктивніших згідно з рейтингом *top500* (станом на червень 2011 року) суперкомп'ютерів, то можна побачити, що значна їх частина побудована з використанням спеціалізованих апаратних прискорювачів, причому саме завдяки цьому ними досягнуто таких високих показників продуктивності. Зокрема, це стосується згаданих вище суперкомп'ютерів *Tianhe-1A* та *Roadrunner*, а також суперкомп'ютерів *Nebulae* та *Tsubame 2.0*, що входять до п'ятірки найпродуктивніших.

Суперкомп'ютери використовують для виконання складних інженерних і наукових розрахунків та інших ресурсоємних завдань. Високі показники продуктивності таких комп'ютерів досягаються шляхом введення до їх складу великої кількості паралельно працюючих і тісно зв'язаних між собою процесорних блоків та модулів пам'яті. До інших ознак суперкомп'ютерів, крім їх надвисокої продуктивності, слід віднести впровадження останніх досягнень мікроелектронної технології та скеровані на забезпечення максимальної продуктивності архітектурні рішення. Однак у суперкомп'ютерів є й серйозні недоліки, серед яких варто в першу чергу назвати такі:

- величезна споживана потужність;
- дуже висока вартість розробки;

- висока вартість експлуатації;
- складність доступу до ресурсів суперкомп'ютера;
- складність забезпечення ефективного використання потенційної обчислювальної потужності, якою володіє суперкомп'ютер;
- висока ціна, яка зазвичай перевищує мільйон доларів США.

2. Персональні суперкомп'ютери

Зважаючи на згадані вище недоліки суперкомп'ютерів, на сучасному етапі розвитку галузі високопродуктивних обчислювальних систем значна увага почала приділятися створенню так званих “персональних суперкомп'ютерів”, які, будучи у розпорядженні одного користувача, могли б порівнятися за продуктивністю з кластерами суперкомп'ютерів, мали б помірне енергоспоживання і невеликі габарити.

Перші персональні суперкомп'ютери з'явилися в 2008 р., і сьогодні пропонуються лише кількома фірмами, які, проте, належать до лідерів у виробництві високопродуктивних обчислювальних систем – *Cray*, *NVIDIA* та *Silicon Graphics International*. Особливістю цих персональних суперкомп'ютерів є поєднання в них універсальних програмованих процесорів та спеціалізованих обчислювальних модулів, що дозволяє істотно підвищити загальну продуктивність.

Інформація про те, що фірма *Cray* представила персональний суперкомп'ютер *CX1*, що вмикається до стандартної мережі живлення і має габарити, які дозволяють його розмістити під робочим столом, з'явилася у 2008 р. У тому ж році компанія *NVIDIA* заявила про те, що їй вдалося “перетворити персональні суперобчислення в реальність”. Новий продукт, що отримав назву *Tesla Personal Supercomputer*, використовує для обчислень графічні процесори і, за словами розробників, забезпечує порівнянну з сучасними кластерами суперкомп'ютерів продуктивність, маючи при цьому в сто разів меншу вартість і габарити стандартних настільних робочих станцій. Анонс відеокартки *Tesla C1060*, що лежить в основі суперкомп'ютера, відбувся влітку 2008 р. Восени 2009 р. компанія *Silicon Graphics International* поширила інформацію про свій персональний суперкомп'ютер *Octane III*, побудований на базі чотирьохядерних (серії 5500) або шестиядерних (серії 5600) мікропроцесорів *Intel Xeon* та графічних процесорів *NVIDIA Tesla C1060*. Розглянемо детальніше особливості названих персональних суперкомп'ютерів.

Персональний суперкомп'ютер *Tesla Personal Supercomputer* фірми *NVIDIA* побудовано на основі потужної відеокартки *Tesla C1060*, що підтримує технологію *GPGPU*-обчислень *NVIDIA CUDA*. Суперкомп'ютер може містити три або чотири відеокартки *Tesla C1060* і в максимальній комплектації об'єднує 960 паралельно працюючих обчислювальних ядер (при встановлених чотирьох відеокартках) та забезпечує продуктивність 3,732 TFLOPS. Основні характеристики відеокартки *Tesla C1060* наведено нижче [8]:

- кількість потокових процесорних ядер: 240;
- тактова частота ядер: 1,296 ГГц;
- продуктивність виконання операцій з рухомою комою над даними у форматі з одинарною точністю: 933 GFLOPS;
- продуктивність виконання операцій з рухомою комою над даними у форматі з подвійною точністю: 78 GFLOPS;
- об'єм пам'яті: 4 ГБ;
- пропускна спроможність пам'яті: 102 ГБ/с;
- інтерфейс: *PCI Express 2.0×16*;
- споживана потужність: 160 Вт (пікова 200 Вт).

Суперкомп'ютер підтримує платформи *Microsoft Windows XP* (64-бітову та 32-бітову), *Linux* 64-бітову та 32-бітову (рекомендовано 64-бітову), *Red Hat Enterprise Linux* 4 і 5, *SUSE* 10.1, 10.2 та 10.3.

Персональний суперкомп'ютер *CX1* фірми *Cray* побудований як шасі з вісьмома роз'ємами, у які можна встановити до восьми плат (вузлів). Конфігурація цього суперкомп'ютера підбирається під потреби замовника шляхом комбінування декількох типів вузлів. Вузли є одно- та двороз'ємними і базуються на двохядерних або чотирьохядерних процесорах *Intel Xeon*. На однороз'ємному вузлі

розміщують до 16 таких процесорів, отримуючи таким чином до 64 паралельно працюючих ядер [9]. Пропонується чотири основні типи вузлів: обчислювальний, візуалізації, *GPGPU* та зберігання даних. У табл. 1 наведено основні характеристики цих вузлів [10].

Таблиця 1

Основні характеристики вузлів персонального суперкомп'ютера *CXI* фірми *Cray*

Тип вузла	Обчислювальний вузол	Вузол візуалізації	Вузол <i>GPGPU</i>	Вузол зберігання даних
Кількість займаних слотів	1 слот	2 слоти		
Процесор	2 × <i>Intel Xeon 55XX</i>			
Оперативна пам'ять	48 ГБ (за іншими даними 64 ГБ)	96 ГБ (за іншими даними 128 ГБ)		
Зовнішня пам'ять	1 <i>SATA / SSD</i> (ємність змінна, за даними різних джерел від 80 до 320 ГБ)			4 / 8 <i>SATA / SSD</i> (2 / 4 ТБ)
Інтерфейси розширення	<i>PCI Express 2.0×16</i>	<i>PCI Express 2.0×16</i> (зарезервований для графічної карти)	<i>PCI Express 2.0×16</i> (зарезервований для <i>GPGPU</i>)	<i>PCI Express 2.0×16</i>
Зовнішні інтерфейси	<i>Gigabit Ethernet</i> та <i>InfiniBand</i>			

Обчислювальні задачі можна виконувати на кожному вузлі окремо, або розподіляти по вузлах комп'ютера. Передбачається можливість нарощення потужності шляхом об'єднання двох або трьох таких комп'ютерів в одну систему без додаткового обладнання. Подальше нарощення можливе за використанням додаткового комунікаційного обладнання.

Персональний суперкомп'ютер *Octane III* фірми *SGI* може містити від двох до десяти автономних комірок. Архітектура комірки залежить від моделі суперкомп'ютера. *SGI* пропонує дві моделі суперкомп'ютерів: *OC3-10TY9* (кластерне робоче місце – *Deskside Cluster*), до складу якої може входити до десяти автономних комірок, та *OC3-2TY12* (графічна робоча станція – *Graphics Workstation*), яка містить дві автономні комірки. Характеристики комірки наведено нижче [11]:

- кількість універсальних процесорів: 2, *Intel Xeon* серії 5500 або 5600;
- кількість потокових процесорних ядер: 8 або 12, залежно від серії процесорів;
- продуктивність: 726 GFLOPS;
- об'єм пам'яті: 96 ГБ;
- зовнішній інтерфейс: *Gigabit Ethernet* та *InfiniBand*.

Споживана потужність суперкомп'ютера становить 2000 Вт. Цікаво, що автономна комірка суперкомп'ютера моделі *OC3-10TY9* побудована винятково на основі універсальних мікропроцесорів *Intel Xeon*, а комірка моделі *OC3-2TY12* додатково містить дві відеокартки *NVIDIA Tesla C1060*, що використовуються як графічні процесори загального призначення. Кожна з них під'єднана через окремий інтерфейс розширення *PCI Express 2.0×16*.

Перелік підтримуваних операційних систем включає *Microsoft Windows HPC Server 2008*, *SUSE Linux Enterprise Server* та *Red Hat Enterprise Linux*. Конфігурації на базі *Linux* постачаються в комплекті з системним програмним забезпеченням *SGI ProPack*, *SGI Isle Cluster Manager* та *Altair PBS Professional Scheduler*, що дозволяє додатково прискорити роботу суперкомп'ютера.

3. Високопродуктивні обчислювальні системи на основі універсальних комп'ютерів та реконфігурованих прискорювачів

Наступним етапом розвитку високопродуктивних обчислювальних систем та альтернативою високопотужним і дуже дорогим комп'ютерам є обчислювальні системи на базі універсальних (зокрема й персональних) комп'ютерів і апаратних реконфігурованих прискорювачів [3]. Цей напрям теж з'явився недавно і сьогодні в ньому активно ведуться наукові дослідження та інженерні роботи, що зумовлено, по-перше, здатністю реконфігурованих прискорювачів змінювати конфігурацію і апаратно виконувати заданий користувачем обчислювальний алгоритм, по друге, доступністю

обладнання і технологій і, по-третє, помірною ціною таких обчислювальних систем та достатньо високою їх продуктивністю.

Практично всі сучасні суперкомп'ютери побудовані на основі паралельно включених універсальних мікропроцесорів. Разом з тим відомо, що за рахунок спеціалізації та апаратної адаптації обчислювальних засобів можна досягти прискорення виконання завдань на 1-3 порядки, або ж зменшити габарити та споживану потужність на ту ж величину. Остання особливість говорить про те, що використовуючи спеціалізовані апаратні засоби в суперкомп'ютері, можна на 1-3 порядки зменшити його габарити, споживану потужність, вартість, забезпечивши при цьому таку саму продуктивність як і суперкомп'ютера, побудованого на базі універсальних мікропроцесорів. Можна навести багато прикладів спеціалізованих процесорів, які на задачах, на які вони орієнтовані, переважають за продуктивністю не лише звичайні, а часто й суперкомп'ютери [14, 15, 16]. У зв'язку з цим часто поєднують ці два підходи та створюють універсальні високопродуктивні системи на основі універсальних мікропроцесорів та спеціалізованих процесорів. Зрозуміло, що такий підхід дає можливість отримувати високі показники продуктивності систем при виконанні завдань, основою яких є алгоритми, на які орієнтований спеціалізований процесор. Наприклад, сучасні графічні процесори, як вже згадувалось, розвинулися до того рівня, коли багато реальних завдань можна на них виконувати набагато швидше ніж на багатопроцесорних кластерних системах на основі універсальних мікропроцесорів. Тому і з'явилось рішення об'єднати в одній системі графічні процесори з багатоядерними центральними процесорами, що забезпечує універсальність таких систем та високу продуктивність при виконанні завдань певного класу. Разом з тим потрібно забезпечити універсальність і необхідну продуктивність виконання довільного обчислювального завдання.

Постає питання, як ефективно поєднати універсальні мікропроцесори та апаратну орієнтацію на виконуваних алгоритми? Відповіддю на це питання є використання підходу до побудови високопродуктивних обчислювальних систем на основі універсальних мікропроцесорів та реконфігурованих апаратних прискорювачів, який є альтернативою розглянутим.

Апаратний прискорювач [2] призначений для виконання на апаратному рівні складних алгоритмів обробки великих масивів даних, що вимагає багато часу та ресурсів для їх виконання програмним чином на універсальному комп'ютері. Він входить до складу універсального комп'ютера з метою прискорення виконання алгоритмів виконання конкретних завдань. Існує два базових підходи до реалізації апаратних прискорювачів. Перший полягає у створенні спеціалізованих апаратних прискорювачів, тобто таких, у складі яких міститься спеціалізований процесор, виготовлений як замовна інтегральна схема. Цей підхід забезпечує найвищу продуктивність обчислень прискорювачем, однак, внаслідок високої вартості виготовлення замовних інтегральних схем, є виправданий тільки в разі масового виробництва, що часто не є доцільним через вузьку функціональну спрямованість. Другий підхід передбачає використання в якості бази для реалізації спеціалізованого процесора ПЛІС – програмовної логічної інтегральної схеми (анг. *FPGA – Field Programmable Gate Array*), яка є матрицею програмовних логічних комірок універсальної структури. Програмовні логічні комірки ПЛІС дають можливість створення інтегральної схеми спеціалізованого процесора шляхом задіяння потрібних логічних елементів комірки та налаштуванні зв'язків між ними. Внаслідок закладеної універсальності логічних комірок спеціалізовані процесори, реалізовані на базі ПЛІС (або інакше кажучи, синтезовані у ПЛІС), поступаються продуктивністю замовним НВІС, однак дозволяють досягти повної розпаралеленості виконання алгоритму і мають нижчу порівняно з традиційними процесорами споживану потужність. Апаратні прискорювачі на базі ПЛІС отримали назву реконфігурованих. Реконфігурованість апаратного прискорювача означає його здатність змінювати конфігурацію (налаштовувати внутрішню структуру функціональних вузлів та зв'язків між ними) для оптимального відображення особливостей виконуваних ним алгоритмів на апаратному рівні з метою забезпечення максимальної продуктивності їх виконання.

Використання ПЛІС в якості базових елементів для створення апаратних прискорювачів дозволяє:

- Налаштовувати апаратний прискорювач на виконання конкретного алгоритму не під час виготовлення плати прискорювача, а після її виготовлення шляхом створення спеціалізованої НВІС методом синтезу потрібного спеціалізованого програмного процесора у ПЛІС.

▪ Переналаштовувати апаратний прискорювач на виконання іншого алгоритму шляхом повторного прошивання ПЛІС.

▪ Будувати високопродуктивні обчислювальні системи на базі універсальних мікропроцесорів та реконфігурованих прискорювачів і отримувати високі показники продуктивності таких систем при виконанні довільних завдань, оскільки в реконфігурованому прискорювачі можна реалізувати довільний спеціалізований процесор.

Оскільки цей підхід не передбачає використання замовних НВІС, вартість апаратного прискорювача залежить головним чином від вартості кристала ПЛІС. Крім того, оскільки ПЛІС початково не прив'язана до конкретного обчислювального алгоритму, можливості застосування таких апаратних прискорювачів обмежуються лише функціональними та ємнісними характеристиками ПЛІС. Плати прискорювачів можуть комплектуватися кількома кристалами ПЛІС для забезпечення можливості досягнення ними необхідних обчислювальних потужностей, або це можуть бути багатоплатні багатоблокові вузли [17].

Для ілюстрації доцільності застосування ПЛІС в апаратних прискорювачах обчислень наведемо декілька порівнянь. У табл. 2 наведено дані фірми *Xilinx* з результатами порівняння ПЛІС *Virtex 2VP100* цієї фірми і універсального процесора *Itanium 2* фірми *Intel* за деякими характеристиками. Незважаючи на істотно вищу тактову частоту роботи процесора *Intel Itanium 2*, ПЛІС *Virtex 2VP100* випереджає його за сумарною продуктивністю і має значно меншу споживану потужність.

Таблиця 2

Порівняння характеристик ПЛІС *Virtex 2VP100* і процесора *Itanium 2*

Характеристика	Процесор <i>Itanium 2</i>	ПЛІС <i>Virtex2VP100</i>
Технологія	0,13 мікрон	0,13 мікрон
Тактова частота	1,6 ГГц	180 МГц
Продуктивність обміну даними з внутрішньою пам'яттю	102 ГБ / с	7500 ГБ / с
Споживана потужність	130 Вт	15 Вт
Пікова продуктивність	8 GFLOPS	38 GFLOPS
Середня продуктивність	~ 2 GFLOPS	~ 19 GFLOPS
Продуктивність обміну даними з зовнішньою пам'яттю / пристроями введення-виведення	6,4 ГБ / с	67 ГБ / с

У табл. 3 наведено дані фірми *Xilinx* з результатами порівняння швидкості виконання деяких поширених прикладних алгоритмів на існуючих сьогодні ПЛІС і на програмованих процесорах. Також видно істотну перевагу ПЛІС.

Таблиця 3

Результати порівняння ПЛІС з системами на основі програмованих процесорів

Тестовий алгоритм	Характеристики виконання на прискорювачі з ПЛІС	Характеристики виконання на системі з програмованим процесором
Пряме і зворотне перетворення Х'ю (<i>Hough transform</i>)	2 с. на частоті 20 МГц (швидше в 370 разів)	12 хв. на процесорі <i>Pentium</i> , 3 ГГц
Шифрування масиву 1 МБ даних алгоритмом <i>AES</i>	424 мс. / 19,7 МБ / с. (швидше в 13 разів)	5558 мс. / 1,51 МБ / с.
Алгоритм Сміта-Вотермана (<i>Smith-Waterman</i>)	100 с. (швидше в 64 рази)	6461 с. на процесорі <i>Opteron</i> 2,2 ГГц.
Аналіз Монте-Карло 64000 шляхів	10 с. на частоті 200 МГц. (швидше в 10 разів)	100 с. на процесорі <i>Opteron</i> 2,4 ГГц.
Аналіз Блека-Шоулза (<i>Black-Scholes</i>)	18 мс. на частоті 110 МГц. на ПЛІС <i>Virtex4</i> (швидше в 203 рази)	3,7 с. на процесорі <i>Opteron</i> 2,2 ГГц.

4. Тенденції розвитку високопродуктивних обчислювальних систем

Підвищення продуктивності високопродуктивних комп'ютерів традиційно досягають нарощуванням обчислювальних потужностей їх вузлів – кількості процесорів, об'ємів пам'яті і покращенням їх характеристик, що забезпечується розвитком інтегральних технологій, загалом. Разом з тим реальна продуктивність суперкомп'ютерів, які орієнтовані на традиційні методи організації паралельних обчислень і побудовані на основі серійних мікропроцесорів, часто не перевищує 10 – 15% від їх пікової продуктивності, причиною чого є необхідність реалізації великої кількості процедур міжпроцесорного обміну, а також синхронізації послідовних процесів. Як сучасну тенденцію, слід відмітити підвищення продуктивності шляхом використання спеціалізованих обчислювальних модулів на зразок згаданих вище графічних процесорів. Необхідно зазначити, що такий підхід дає можливість прискорити виконання далеко не всіх завдань, а лише тих, для виконання яких призначені спеціалізовані обчислювальні модулі.

Персональні суперкомп'ютери, що є новим напрямком розвитку високопродуктивних обчислювальних систем, з'явилися в останні роки в результаті стрімкого розвитку технологій мікроелектронного виробництва. Звичайно, вони не можуть зрівнятися за продуктивністю з традиційними суперкомп'ютерами, однак мають переваги за надзвичайно важливими характеристиками, такими як доступність користувачеві, вартість виготовлення та експлуатації, споживана потужність, ціна.

Майже всі існуючі персональні суперкомп'ютери будуються на основі універсальних мікропроцесорів та спеціалізованих процесорних модулів, що дозволяє істотно підняти їх продуктивність при виконанні визначеного кола завдань. З іншого боку, суперкомп'ютер повинен бути універсальним і забезпечувати необхідну продуктивність виконання довільного обчислювального завдання. Досягти високих показників продуктивності при виконанні довільних завдань можна, використовуючи підхід до побудови високопродуктивних систем на основі універсальних мікропроцесорів та реконфігурованих апаратних прискорювачів. Беручи до уваги те, що сучасні універсальні мікропроцесори є багатоядерними і паралельними, а також враховуючи різноманіття реконфігурованих прискорювачів (сьогодні існують багатоплатні прискорювачі, що містять більше сотні кристалів ПЛІС і забезпечують надзвичайно високу продуктивність [17]), такі системи можна сміливо віднести до класу персональних суперкомп'ютерів.

Проблемою високопродуктивних систем на основі універсальних мікропроцесорів та реконфігурованих апаратних прискорювачів є їх недостатня “динамічність” – перед тим, як виконувати обчислювальний алгоритм на реконфігурованому прискорювачі, останній необхідно сконфігурувати, тобто синтезувати в ньому спеціалізований процесор, який реалізує даний алгоритм. Однак, враховуючи активну діяльність багатьох фірм в напрямку створення систем автоматизованого високорівневого синтезу ПЛІС [18], засобів системного проектування ПЛІС з процедурних мов програмування високого рівня [19, 20], очікується поява “самоконфігурованих” прискорювачів [21], а також засобів, які автоматично визначатимуть доцільність апаратної реалізації тих чи інших обчислювальних завдань чи їх частин в апаратному прискорювачі під час їх виконання.

Висновки

1. Проведено огляд сучасних високопродуктивних обчислювальних систем, особливостей їх побудови та оцінено їх технічні характеристики.
2. Виділено проблемні питання побудови суперкомп'ютерів, що дозволило окреслити напрямки діяльності в галузі високопродуктивних обчислювальних систем.
3. Сформовано основні тенденції розвитку високопродуктивних обчислювальних систем, що показало перспективність створення персональних суперкомп'ютерів та дозволило виділити основні напрямки їх архітектурного розвитку.
4. Проведено порівняльний аналіз основних технічних характеристик універсальних мікропроцесорів і програмованих логічних інтегральних схем та показано потенційну перевагу

програмовних логічних інтегральних схем і створених на їх основі апаратних прискорювачів для побудови високопродуктивних обчислювальних систем, що дозволило виявити тенденцію широкого впровадження апаратних прискорювачів в суперкомп'ютерах та перспективних персональних суперкомп'ютерах.

1. Gokhale M.B. and Graham P.S. *Reconfigurable Computing: Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays*, Springer, 2005. 2. Мельник А. О., Хабабсах Мохаммад Аль. Програмні спеціалізовані процесори для реконфігурованих прискорювачів універсальних комп'ютерів // Науковий вісник Чернівецького університету, 2008. – С. 21–29. 3. Мельник А.О., Мельник В.А., Сарайрех Зіяд. Використання реконфігурованих прискорювачів для підвищення продуктивності персональних комп'ютерів // Науковий вісник Чернівецького ун-ту. Комп'ютерні системи та компоненти. – Чернівці: Нац. ун-т імені Юрія Федьковича, 2010. – Т.1. – Вип. 1. – С. 20–25. 4. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nvidia.ru/object/tesla_s1070_ru.html 5. John D. Owens, David Luebke, Naga Govindaraju, Mark Harris, Jens Krüger, Aaron E. Lefohn, Tim Purcell. “A Survey of General-Purpose Computation on Graphics Hardware”. *Computer Graphics Forum*, volume 26, number 1, 2007, pp. 80–113. 6. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://developer.nvidia.com/category/zone/cuda-zone> 7. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.top500.org>. 8. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nvidia.com/docs/IO/43395/NV_DS_Tesla_PSC_US_Mar09_LowRes.pdf 9. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.cray.com/Assets/PDF/products/cx1/CX1_brochure.pdf 10. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.engllobe-tec.com/wp-content/uploads/2010/05/CX1-Brochure.pdf> 11. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sgi.com/pdfs/4177.pdf> 12. Мельник А.О. Архітектура комп'ютера. – Луцьк. Волинська обласна друкарня, 2008. – 470 с. 13. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nsc.riken.jp/K/diary_eng.html. 14. X. Zhang, K. Parhi. “High-speed VLSI architectures for the AES algorithm”. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 12, no. 9, pp. 957–967, 2004. 15. B. M. Baas, “A low-power high-performance 1024-point FFT processor,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 34, pp. 380–387, March 1999. 16. K. Babionitakis, V. A. Chouliaras, K. Manolopoulos, K. Nakos, D. Reisis, N. Vlassopoulos. Fully Systolic FFT Architecture for Giga-sample Applications. *Journal Of Signal Processing Systems. Volume 58, Number 3, 2010*, pp. 281-299. 17. Sandeep Kumar, Christof Paar, Jan Pelzl, Gerd Pfeiffer, Manfred Schimmler, “COPACOBANA A Cost-Optimized Special-Purpose Hardware for Code-Breaking,” *fcsm*, pp.311–312, 14th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM'06), 2006. 18. Мельник А.О., Сало А.М., Клименко В., Цигулик Л., Юрчук А. ХАМЕЛЕОН – система високорівневого синтезу спеціалізованих процесорів // Наук.-техн. журн. Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”. – Харків, № 5, 2009, 189–195 с. 19. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.celoxica.com 20. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.impulsec.com 21. Мельник В., Сарайрех З. Самоконфігуровні апаратні прискорювачі обчислень в комп'ютерах // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Комп'ютерні системи та мережі”. – Львів, 2011.