УДК 681.3

Ляпандра А. С., к.т.н. *(Тернопільський національний економічний університет)*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПРОЕКТУВАННЯ НАВЧАЛЬНИХ РЕКОНФІГУРОВАНИХ КЛАСТЕРНИХ СИСТЕМ

Ляпандра А. С. Постановка задач проектування навчальних реконфігурованих кластерних систем. У статті виокремлено задачі, які необхідно розв'язати для проектування кластерних систем на базі програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) з метою їх застосування у навчальному процесі. Ці системи набувають все більшого застосування, а тому вивчення методів та засобів їх проектування є актуальним. Показано, що для проектування керуючого та обчислювального вузлів необхідно провести аналіз, обґрунтування та вибір архітектури процесора, типу ПЛІС, структури, об'єму та швидкості оперативної пам'яті, існуючих плат та інструментальних засобів.

Ключові слова: НАВЧАЛЬНА РЕКОНФІГУРОВАНА КЛАСТЕРНА СИСТЕМА, ПЛІС

Ляпандра А. С. Постановка задач проектирования учебных реконфигурируемых кластерных систем. В статье выделены задачи, которые необходимо решить для проектирования кластерных систем на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с целью их применения в учебном процессе. Эти системы приобретают все большее применение, а потому изучение методов и средств их проектирования является актуальным. Показано, что для проектирования управляющего и вычислительного узлов необходимо провести анализ, обоснование и выбор архитектуры процессора, типа ПЛИС, структуры, объема и скорости оперативной памяти, существующих плат и инструментальных средств.

Ключевые слова: УЧЕБНАЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ КЛАСТЕРНАЯ СИСТЕМА, ПЛИС

Liapandra A. S. Statement of the problems of designing educational reconfigurable cluster systems. Tasks which must be untied for design of the cluster systems on a base PLD to their application in educational process are distinguished in the article. These systems are becoming increasingly using, and therefore the study of methods and tools for their design is important. It is shown that for the design of control and computing nodes it is necessary to conduct an analysis, ground and choice of architecture of processor, as the programmable logical integrated circuits, structure, volume and speed of main memory, existing boards and tools.

Keywords: EDUCATIONAL RECONFIGURABLE CLUSTER SYSTEM, PLD

Вступ. Розроблення математичних методів та побудова на їх основі високоефективних алгоритмів створило умови для широкого їх застосування з метою розрахунку параметрів складних систем, що вимагає значних обчислювальних потужностей: від декількох петафлопс для розв'язання задач аеродинаміки до 10 екзафлопс для обчислювальної космології [1]. Потужності таких рівнів найбільш ефективно можуть бути отримані на комп'ютерних системах класу MIMD, які застосовують для прогнозування погоди, клімату і глобальних змін в атмосфері, покращення екологічного стану довкілля, розвідування корисних копалин, створення нових матеріалів, побудови напівпровідникових приладів, розроблення фармацевтичних препаратів, розшифрування генетичних кодів, розпізнавання зображень та мови [2].

Починаючи з 90-х років минулого сторіччя відбувся якісний скачок в області електроніки, внаслідок чого появилися обчислювальні елементи та комунікаційні пристрої з високими показниками продуктивності та відносно низькою вартістю. Оскільки розроблення, впровадження та експлуатація систем класу MIMD вимагає значних фінансових ресурсів, то поява потужних комп'ютерів серійного виробництва викликала широке використання кластерних систем – об'єднаних в одну мережу обчислювальних структур для виконання певної задачі. Підтвердженням є результат аналізу 38-го рейтингу (червень 2012 року) 500 найпотужніших суперкомп'ютерів світу, на основі якого виявлено, що серед 500 комп'ютерних систем 407 становлять кластерні системи (82,2 %), в першій десятці є п'ять кластерних систем, а на другому місці – кластерна система «K computer», яка побудована на 88128 восьми-ядерних процесорах SPARC64 VIIIfx. Пікова продуктивність системи «K computer» – 11,28 пікофлопс/с, продуктивність в тесті Linpack – 10,51 пікофлопс/с, що становить 93,17% ефективності обчислювальних ресурсів системи. В освітньому секторі використовується 98 комп'ютерних систем, з них 73 – кластерних [3].

Обчислювальна потужність кластерної системи суттєво залежить від її відповідності класу задач, які на цій системі розв'язуються. Для уможливлення зміни конфігурації

кластерних систем їх проектування здійснюють на реконфігурованих елементах – програмованих логічних інтегральних схемах (ПЛІС).

При цьому дослідження таких систем шляхом зміни компонент та їх взаємозв'язку, порівняння продуктивностей систем за результатами розв'язання певних задач має вагомий теоретичний та прикладний аспект і створює передумови для покращення теоретичних знань та практичних навиків студентів технічних спеціальностей, в тому числі за напрямом «Комп'ютерна інженерія».

Постановка задачі. Проектування кластерних систем на базі ПЛІС є складним багатоетапним та багатофакторним завданням. В книжці В. В. Воєводіна та С. А. Жуматого «Вычислительное дело и кластерные системы» написано: «дуже важливо продумати весь ланцюжок в цілому, щоб сформувати майбутнє рішення на основі ціленаправленого вибору та аналізу» (переклад Ляпандри А. С.) [4]. Тому метою цієї роботи є виокремлення тих задач, які виникають при проектуванні кластерних систем на базі ПЛІС з врахуванням застосування цих систем у навчальному процесі.

Результати даної роботи можуть бути використані в курсах «Комп'ютерні системи» та «Проектування комп'ютерних систем на програмованих логічних мікросхемах».

Кластерні системи на базі ПЛІС. Одними з критеріїв оцінювання кластерних систем є показники ефективності (співвідношення «реальна продуктивність/піковая продуктивність»), компактності («реальна продуктивність/об'єм»), співвідношення «продуктивність/вартість».

На продуктивність кластерних систем чинять вплив швидкість процедур міжпроцесорного обміну, яка є функцією швидкості синхронізації взаємозв'язаних послідовних процесів, кожен з яких виконується на окремому процесорі; пропускної здатності мережі передачі даних та інших факторів. Враховуючи вказані фактори впливу важливою є задача визначення оптимальної кількості процесорних вузлів в системі за критерієм продуктивності, оскільки при збільшенні їх кількості понад граничне значення тривалість обміну даними буде більшою від тривалості виконання обчислювальних процедур, що зменшує продуктивність системи.

Дія фактора швидкості процедур міжпроцесорного обміну на продуктивність кластерних систем виявляється в тому, що при розв'язанні "сильнозв'язаних" задач, тобто таких, які не вимагають інтенсивного обміну даними між керуючим комп'ютером та вузлами, максимальна продуктивність системи становить 5-10% від її теоретичної пікової продуктивності [5]. Тому для отримання високої реальної продуктивності кластерних систем із "жорсткою" архітектурою завдання повинні бути "слабозв'язані".

Проте для систем з реконфігурованою архітектурою таких обмежень немає, оскільки архітектура таких систем може бути гнучко адаптована згідно з вимогами конкретної задачі. Це підтверджується даними досліджень на основі яких було доведено, що ефективність застосування системи з реконфігурованою архітектурою характеризуються високим значенням ефективності (тобто реальна продуктивність багатопроцесорної обчислювальної системи близька до пікової, в тому числі при розв'язанні "сильнозв'язаних" задач), а динаміка продуктивності є близька до лінійної при збільшенні кількості процесорів в системі [1].

Таким чином застосування ПЛІС дало можливість створювати реконфігуровані обчислювальні структури, що істотно випереджаючі багатопроцесорні системи з традиційною "жорсткою" архітектурою. Проте розвиток таких систем характеризується деякими особливостями. Так історично склалося, що реконфігуровані обчислювальні системи на пост-радянському просторі побудовані як однорідні обчислювальні середовища та багатопроцесорні обчислювальні системи з програмованою архітектурою. При цьому однорідне обчислювальне середовище, як правило, утворене сукупністю простих однобітних процесорів, що виконують послідовне опрацювання розрядів даних і сполучених з чотирма сусідніми такими процесорами. Їх функції задаються програмно. В багатопроцесорних обчислювальних системах з програмованою архітектурою елементарні процесори є багаторозрядними та всі об'єднані між собою комутаційною структурою [1].

Світові лідери проектування комп'ютерних систем, такі як Cray, Alpha Data Systems, Annapolis Micro System, Aptix, Nallatech, Virtual Computer Corporation, як правило, на ПЛІС покладають функцію співпроцесорів операцій, реалізація яких за допомогою стандартних обчислювальних засобів є нераціональна. Цікаве рішення запропоноване компанією Stretch для реконфігурованого процесора S5000: частини програмного коду, що характеризуються значною обчислювальною складністю, автоматично реалізуються за допомогою ПЛІС. Системи на кристалах ПЛІС є представленими в компанії Star Bridge Systems та у дослідницькому центрі Berkeley Wireless Research Center [1].

Останніми роками ПЛІС набули широкого застосування у цифрових системах і використовуються у багатьох областях для розв'язання різноманітних задач, таких як:

– забезпечення необхідної пропускної здатності комунікаційних каналів за умови збільшення кількості даних [6], які передаються мережею шляхом застосування ПЛІС у комунікаційному обладнанні з функцією оптимізації мережевого трафіку [7];

– підвищення швидкодії обчислень порівняно з системами на основі мікроконтролерів, наприклад, для визначення інформативних параметрів біоелектромагнітних сигналів у біотехнічних системах, що дає змогу збільшити тривалість повноцінного життя людини [8];

– виявлення несанкціонованого запозичення матеріалів чужих робіт шляхом реалізації технології ієрархічного адаптивного порівняння інформаційних об'єктів [9];

– побудови модульної ЕОМ на базі гібриду позиційного числення з основою p=10 та числення в залишкових класах [10] та багатьох інших.

Виокремлення задач проектування кластерних систем на ПЛІС для навчального процесу. Основними базовими компонентами кластерної системи є керуючий вузол, обчислювальні вузли, мережева інфраструктура.

Керуючий вузол через комунікаційне середовище розподіляє завдання на обчислювальні вузли. Реконфігурацію їх структури проводять згідно з класом задач, які необхідно розв'язати. Отриманий внаслідок обчислень результат передається на керуючий вузол. При цьому організація проведення обчислювальних процесів на кластерних системах полягає у формуванні та раціональному використанні необхідного обчислювального ресурсу [11]. Для цього при проектуванні кластерної системи необхідно врахувати фактори, які впливають на її продуктивність [12]: *особливість* класу задач, які необхідно розв'язати; *необхідність* подальшого розширення кластерної системи; *можливість* асинхронної передачі повідомлень; *латентність*; *пропускна* здатність мережі; *ступінь* рівномірності завантаження процесорів; *реальна* продуктивність процесорів; *фінансові* ресурси.

На основі структури кластерної системи та факторів, які впливають на її продуктивність означимо основні задачі її побудови [4]:

– розробити керуючий та обчислювальні вузли. Для цього необхідно провести аналіз, обґрунтування та вибір: *архітектури* процесора (блоків, шинної архітектури, структури кешу, ступінь деталізації конвеєра, спосіб реконфігурування зв'язків між конвеєрами); *типу програмованих* логічних інтегральних схем зважаючи на наявність апаратних і програмних вбудованих ядер (hard, soft core), логічних ресурсів [13]; *структури,* об'єму та швидкості оперативної пам'яті; *існуючих* плат та інструментальних засобів.

– провести вибір мережевої інфраструктури за пераметрами латентності та пропускної здатності.

Можливість реконфігурованості ПЛІС дає змогу швидко адаптувати кластерну систему для досягнення високих технічних показників. З метою порівняння побудованих кластерних систем, виявлення впливу структури систем на ефективність розв'язування певного класу задач доцільно оцінити ефективність застосування цих систем для розв'язання складних задач, наприклад, в області криптографії. Прикладом можуть бути такі проекти, як «distributed.net RC5» – відшукання ключа повідомлення методом повного перебору, яке зашифровано алгоритмом RC5 [14]; «M4» – дешифрування з використанням розподілених обчислень трьох повідомлень, які, ймовірно, зашифровані за допомогою чотирьох роторів Енігми M4 [15]; проекти «Free Rainbow Tables», «SHA-1 Collision Search Graz», «A5/1

Security Project», «gi john». Метою інших проектів, де застосовано розподілені обчислення, є розв'язок задач з області математики, природничих та точних наук [16].

Імітаційна модель кластерної системи. Для дослідження кластерних систем в навчальному процесі пропронується застосувати імітаційну модель [17] з модифікацією її шляхом застосування математичного апарату мереж Петрі. Вона відображає основні суттєві властивості та динамічні процеси.

Динамічні процеси кластерних систем визначаються формуванням потоку паралельних завдань генератором *Г1* (рис. 1), який направляється користувачами в обчислювальну систему кластера, що працює під керуванням генератора локального завантаження вузлів *Г2*. Відомості генератора *Г1* буферизуються в накопичувачі *Н1* і подаються згідно з чергою по каналі *К0* на підмножину вільних каналів $K_{ов1}$, $K_{ов2}$ ..$K_{ов_m}$.

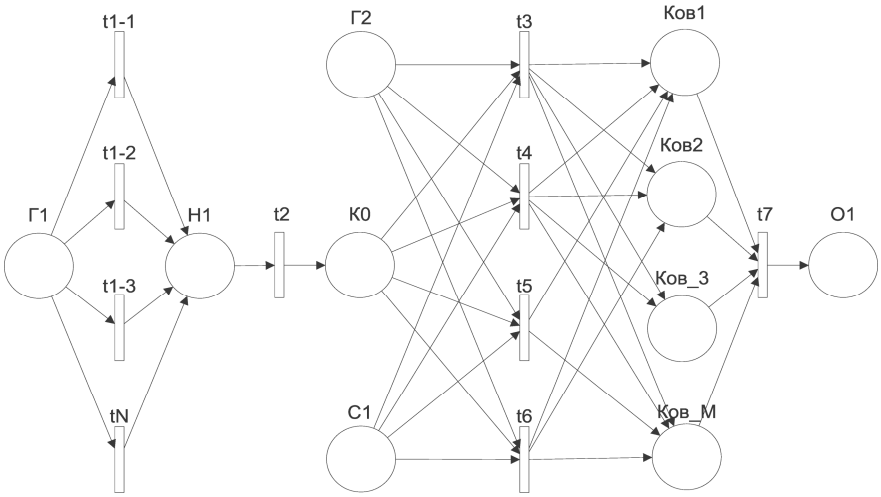

Рис. 1. Імітаційна модель кластерної системи

Канали представлені виділеними керуючими вузлами, що перенаправляють відповідні завдання згідно з визначеним алгоритмом.

Кожен обчислювальний вузол *Ki* має *Mt* байт оперативної пам'яті, *Di* байт дискової пам'яті, характеризується відносною обчислювальною швидкістю *Si*, описується динамічними параметрами: *mt(t)* – значення доступної оперативної пам'яті, *dt(t)* – значення доступної дискової пам'яті, *ut(t)* – значення завантаженості процесора *i*-го вузла у момент часу *t*. Така модель дає можливість розробити модель обчислювального завантаження кластера, на основі якої визначають необхідну кількість процесорів, реальний час виконання завдання, інтервали часу між надходженням завдань в чергу, вимоги до об'єму оперативної та дискової пам'яті вузлів; дослідити алгоритми планування завдань; мінімізувати множину альтернативних структур.

Модель кластерної системи побудована на основі мереж Петрі, які в загальному випадку представлена таким виразом: $PN=(P,T,I,O),$ (1)

де $P=\{p_1, p_2,...,p_n\}$ – скінчена множина позицій, $n\geq 0$; $T=\{t_1, t_2,...,t_m\}$ – скінчена множина переходів, $m\geq 0$; $I: T \rightarrow P^*$ – вхідна функція, яка співставляє переходу мультимножину його вхідних позицій (графічно представляється вхідними дугами переходу); $O: T \rightarrow P^*$ – вихідна функція, яка співставляє переходу мультимножину його вихідних позицій (графічно представляється вихідними дугами переходу). Позиція $p \in P$ є входом для переходу $t \in T$, якщо $p \in I(t)$. Позиція $p \in P$ називається виходом для переходу $t \in T$, якщо $p \in O(t)$. Структура мережі Петрі визначається її позиціями, переходами, вхідною і вихідною функціями.

Для того, щоб теоретично оцінити необхідну кількість процесорів, реальний час виконання завдання модель необхідно модифікувати з врахуванням шуканих параметрів.

Наведемо імітаційну модель кластерної системи (рис.1) в аналітичному вигляді:

C={P,T,I,O}; P={Г1,Н1,К0,Г2,С1,Ков_1,Ков_2,Ков_3,Ков_М,О1};

T={t1-2,t2,t3,t4,t5,t6,t7,t1-1,t1-3,t1-N}; I(t1-2) = {Г1}; I(t2) = {Н1}; I(t3) = {К0,С1,Г2}; I(t4) = {К0,С1,Г2}; I(t5) = {К0,С1,Г2}; I(t6) = {К0,С1,Г2}; I(t7) = {Ков_М,Ков_1,Ков_2,Ков_3}; I(t1-1) = {Г1}; I(t1-3) = {Г1}; I(t1-N) = {Г1};

O(t1-2) = {Н1}; O(t2) = {К0}; O(t3) = {Ков_1,Ков_2,Ков_3,Ков_М}; O(t4) = {Ков_2}; O(t5) = {Ков_3}; O(t6) = {Ков_М,Ков_3,Ков_2,Ков_1}; O(t7) = {О1}; O(t1-1) = {Н1}; O(t1-3) = {Н1}; O(t1-N) = {Н1}; M = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}.

Висновки. Проектування кластерних систем на базі ПЛІС є складним завданням, яке охоплює питання побудови та взаємодії керуючого та обчислювальних вузлів, мережевої інфраструктури. Проведений аналіз дав можливість виокремити задачі проектування кластерної системи: проведення аналізу, обґрунтування та вибору архітектури процесорів керуючого та обчислювального вузлів, типу програмованих логічних інтегральних схем, структури, об'єму та швидкості оперативної пам'яті, існуючих плат та інструментальних засобів. На основі виокремлених задач та розробленої моделі планується розробити кластерну систему на базі ПЛІС для її застосування у навчальному процесі з метою закріплення отриманих знань та використання набутих умінь проектування та синтезу кластерних систем і верифікування отриманих результатів у практичній діяльності.

Література

1. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / И.А. Каляев, И.И. Левин, Е.А. Семерников, В.И. Шмойлов. – Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2008 – С. 393

2. PARALLEL.RU – Информационно-аналитический центр по параллельным вычислениям [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.parallel.ru. – Назва з екрана.

3. TOP500 Supercomputing Sites [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.top500.org/lists/2011/06. – Назва з екрана.

4. Воеводин В. В. Вычислительное дело и кластерные системы. Советы и рекомендации по планированию, проектированию и использованию кластеров в вычислительной практике / В. В. Воеводин, С. А. Жуматий. – М.: Издательство Московского университета, 2007. – 149 с.

5. СуперЭВМ: области применения и требования к производительности / Аладышев О.С, Дикарев Н.И., Овсянников А.П. [та ін.] // Известия ВУЗов. Электроника, 2004. – №1. – С. 13–17.

6. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2009–2014 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/ white_paper_ c11-481360_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html. – Назва з екрана.

7. Ляпандра А. С. Параметри функціональної моделі апаратного забезпечення оптимізації мережевого трафіку / А. С. Ляпандра // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2011. – № 1. – С.161–167.

8. Ляпандра А. С. Амплітудно-часові параметри біоелектромагнітних сигналів фазового рівня біотехнічних систем. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 3. – С. 171–175.

9. Клятченко Я. М. Ефективність ПЛІС – реалізацій адаптивного порівняння послідовностей символів / Я. М. Клятченко, В. П. Тарасенко, О. К. Тесленко // Науковий вісник Чернівецького університету. – Комп'ютерні системи та компоненти. – 2009. – Випуск 446. – С. 23–28.

10. Брюхович Е. И. Совокупный продукт научного предвидения предельно развитых форм вычислительной техники. Ч.I. / Е. И. Брюхович // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2010. – № 9. – С. 5–15

11. Мар'яновський В. А. Створення та дослідження гнучких гомогенних архітектур кластерних систем : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : спец. 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти». Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова. – К., 2010 – 20 с.

12. Воеводин В. В. Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.

13. Опанасенко В. М. Формалізація процесу проектування обчислювальних пристроїв та систем на базі ПЛІС / В. М. Опанасенко, О. М. Лісовий // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2009. – № 8. – С. 58–63.

14. Project RC5 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.distributed.net/RC5. – Назва з екрана.

15. M4 Message Breaking Project [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.bytereef.org/m4_project.html. – Назва з екрана.

16. Distributed Computing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://distributedcomputing.info. – Назва з екрана.

17. Полежаев П. Н. Исследование алгоритмов планирования параллельных задач для кластерных вычислительных систем с помощью симулятора // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2010): Труды международной конференции. – Челябинск: ЮУрГУ, 2010 г. – С. 287-298.