УДК 004.27

КЛИМЕНКО І.А.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ТА ДОДАТКАМИ В РЕКОНФІГУРОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Виконана оцінка ефективності засобів управління реконфігурованими ресурсами та додатками в реконфігурованих обчислювальних системах. Запропоновані нові перспективні рівні реалізації управління реконфігурацією, що дозволяють використовувати відомі технології динамічного планування та розподілу задач на рівні операційної систем широкого застосування та локалізувати їх специфічні функції, забезпечуючи апаратне прискорення реконфігурації, мобільність засобів реалізації, підвищення ефективності розподілу динамічного набору задач на гнучку фізичну структуру. Визначені вимоги до засобів управління реконфігурацією, спрямовані на збільшення ефективності реконфігурації і загального збільшення швидкодії обчислень.

The effectiveness of resources management in reconfigurable computer systems is evaluated. The new promising levels of implementation of reconfigurable resources management, allowing to use known technology of dynamic scheduling and mapping of the widely used operating system and their specific functions, providing hardware rapid configuration, increased mobility tools and efficient allocation for dynamic task sets to flexible physical structure, is proposed. The requirements for reconfigurable resources management, aimed at increasing the efficiency reconfiguration and overall performance computing is defined.

Вступ

Розвиток реконфігурованих обчислювальних систем (РОС) на протязі довгих років зводився до апаратного прискорення критичних до часу виконання функцій в класі обчислювальних систем широкого застосування або розширення можливостей суто апаратних задаче-орієнтованих пристроїв. На сьогодні РОС претендують на перехід із традиційного класу задаче-орієнтованих цифрових пристроїв в клас високопродуктивних обчислювальних систем загального призначення і носять назву реконфігурованих суперкомп’ютерів або високопродуктивних реконфігурованих комп'ютерів (*High-Performance Reconfigurable Computers, HPRC*) [1, 2, 3]. На сьогодні це найбільш актуальна, конкурентоспроможна і затребувана галузь досліджень в області високопродуктивних обчислень (*HPC, Height Performance Computing*), яка дозволяє отримати надвисоку продуктивність обчислень і дійсно багатозадачний режим роботи [2, 4], забезпечуючи обчислювальні системи широкого застосування властивістю динамічної адаптації до вимог вирішуваних задач.

Значний підйом в розвитку РОС обумовлений сучасними технологіями, що надають можливість виконувати реконфігурацію архітектури в динамічному режимі, зокрема технологією часткової динамічної реконфігурації. Використання часткової динамічної реконфігурації часу виконання забезпечує додаткову гнучкість архітектури високопродуктивних суперкомп’ютерів і лежить в основі концепції підвищення їх продуктивності [1-5]. Ця технологія дозволяє здійснити реконфігурацію окремих частин обчислювального модуля, не перериваючи виконання поточних задач, фізично змінюючи його архітектуру. Часткова реконфігурація природньо сприяє вирішенню відомої проблеми непродуктивних витрат часу та енергії на виконання реконфігурації [1, 5-7].

На ряді з підвищенням продуктивності обчислень динамічна реконфігурація архітектури обчислювальних систем обумовлює ряд проблем, пов’язаних з розміщенням задач на гнучку реконфігуровану область в динамічному режимі. Рішення таких проблем зазвичай покладається на засоби управління динамічним плануванням та розміщенням задач, які в реконфігурованих обчислювальних системах мають певні функціональні особливості. Основною особливістю є необхідність врахування параметрів фізичного рівня реалізації реконфігурованих об’єктів управління, що додатково ускладнюється застосуванням часткової реконфігурації. Це обумовлює неможливість застосування відомих засобів планування та розподілу задач, які ефективні для традиційних паралельних систем, необхідність їх модифікації в контексті врахування фізичної складової реконфігурації, або розробки нових спеціальних засобів.

Постановка задачі

Динамічна реконфігурація це можливість в автономному режимі, без участі зовнішніх впливів, під управлінням внутрішніх алгоритмів реконфігурувати архітектуру обчислювальної системи під вимоги динамічно надходжуваного потоку задач [5].

Процес управління реконфігурацією в загальному випадку зводиться до проблеми планування та розподілу задач на реконфігуровану архітектуру. Динамічно і статично реконфігуровані обчислювальні системи в загальному випадку визначаються місцем знаходження засобів управління реконфігурацією, відповідно цьому статична реконфігурація здійснюється під управлінням зовнішніх управляючих засобів, в той час як управління логічною та фізичною послідовністю реконфігурації в динамічному режимі цілком покладається на внутрішні засоби управління [5]. Задача внутрішніх засобів управління динамічно реконфігурованих обчислювальних систем є реконфігурація архітектури обчислювальної системи під впливом внутрішніх факторів функціонування.

Ціллю статті є огляд відомих реконфігурованих обчислювальних систем з точки зору реалізації засобів управління реконфігурацією, визначення проблем реалізації фізичної складової реконфігурації, визначення основних напрямків вдосконалення існуючих та розробки нових ефективних методів та засобів планування та розподілу задач в реконфігурованих обчислювальних системах.

Обґрунтування рівнів управління реконфігурацією

Основним параметром для систематизації динамічно реконфігурованих обчислювальних систем обраний спосіб реалізації засобів управління. На підставі огляду відомих реалізацій реконфігурованих обчислювальних систем на рис. 1 узагальнена архітектура реконфігурованих обчислювальних систем, відносно рівнів реалізації засобів управління, які відрізняються степенем абстракції від фізичної послідовності реконфігурації. Відповідно до цього, засоби управління реконфігурацією мають абстрактну та структурну складові, які в реконфігурованих обчислювальних системах тісно взаємозв'язані і зазвичай не мають чітко вираженої границі. Загальне призначення засобів управління реконфігурованими ресурсами включає в себе: планування, розміщення, зупинку, призупинку, відновлення і всі види реорганізації та переміщення завантажуваних, виконуваних та закінчених задач.

На зовнішньому прошарку абстрактного рівня, засобами операційної системи, вирішуються загальні проблеми управління реконфігурованою обчислювальною системою, в тому числі надання доступу користувачам, організація інтерфейсів вводу програм та даних, доступ до загальних ресурсів, зокрема бібліотеки конфігураційних файлів, розробка й управління паралельними додаткам, зокрема планування та розподіл задач між вузлами внутрішнього прошарку абстрактного рівня. Цей прошарок має саму високу степінь абстракції від проблем безпосереднього управління процесом реконфігурації і може бути взагалі відсутнім, а його задачі виконує наступний прошарок абстрактного рівня.

Внутрішній прошарок абстрактного рівня також функціонує під управлінням загальної операційної системи, а система спеціальних засобів для управління реконфігурованими ресурсами представляє собою деяку розподілену надбудову операційної системи, яка в більші й або меншій степені враховує вплив фізичного процесу реконфігурації.

Таке прошарування принадно всім оглянутим РОС і з точки зору рішення проблеми планування та розподілу задач на реконфігуровану обчислювальну структуру, дозволяє розвантажити центральний процесор і до певної степені позбавити операційну систему від необхідності рішення неспецифічних для неї задач.

На рис. 2. наведена взаємодія основних рівнів управління реконфігурацією, в контексті рішення проблеми планування та розподілу задач на реконфігуровану архітектуру. На абстрактному рівні видима укрупнена архітектура обчислювальної системи і обчислювального модуля. Планувальники та розподільники задач виконують класичну задачу створення розкладів та розподілу задач між обчислювальними вузлами. При цьому на абстрактному рівні реконфігурації можливо лише до деякої степені розглядати структурні об'єкти в укрупненому вигляді, абстрагуючись від їх фізичного структури. Реконфігуровані обчислювальні вузли, не мають фіксованої архітектури і явно виражених обчислювальних параметрів. Фізичні та технічні властивості реконфігурованих обчислювальних вузлів налаштовуються сумісно з процесом

планування та розподілу задач. При цьому враховується ряд обмежень та умов, які накладає фізична та просторова структура реконфігурованої області. Таким чином, абстрактні засоби планування та розподілу дедалі поглиблюються у деталізацію реконфігурованої структури, враховуючи її фізичні параметри. На структурному рівні враховують технологічні особливості елементної бази, способи розміщення апаратних задач, що обумовлені моделлю реконфігурованого простору; апаратні та просторові обмеження реконфігурованої структури; фізичні властивості апаратної задачі – просторові параметри, розмір конфігураційного файлу; часові та енергоспоживні параметри фізичної послідовності реконфігурації.

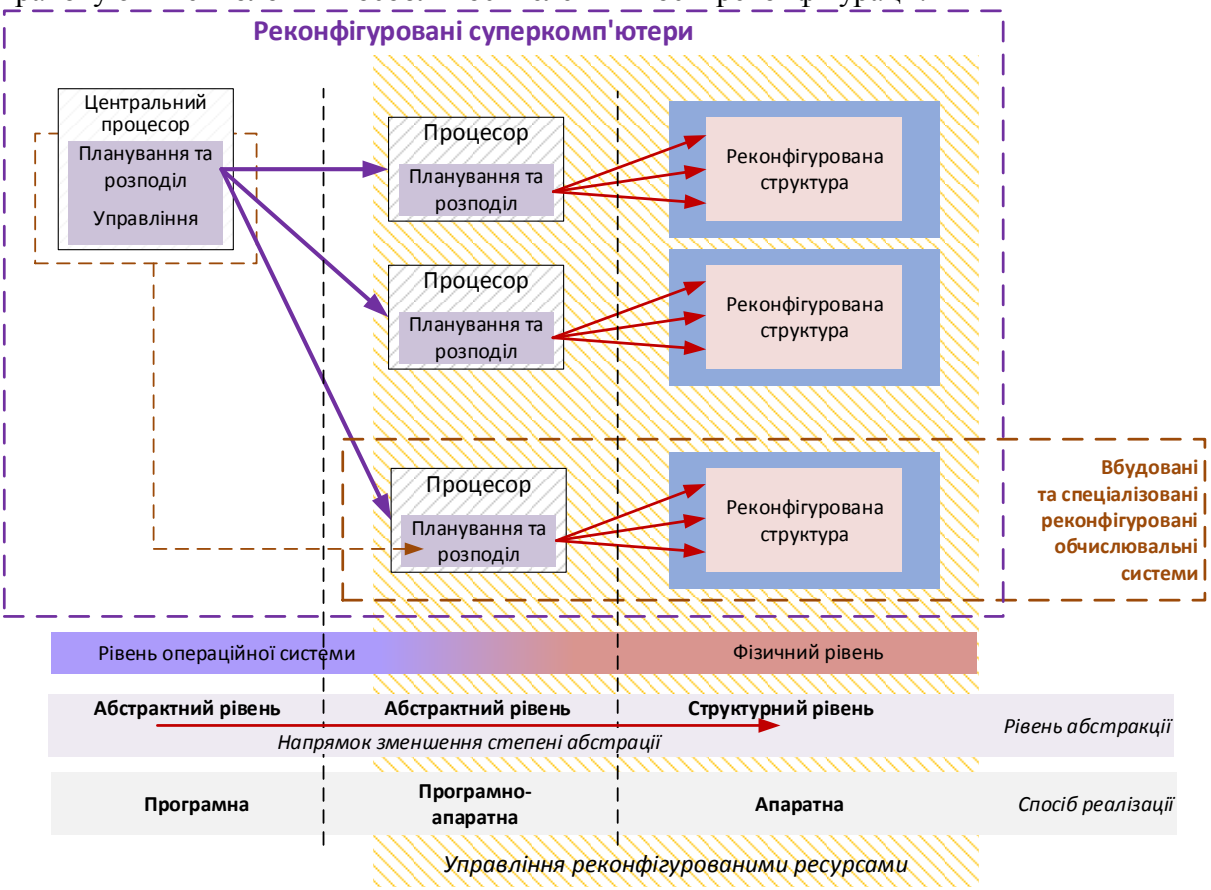


Рис. 1. Рівні управління реконфігурацією

Рис.2. Взаємодія рівнів управління реконфігурацією

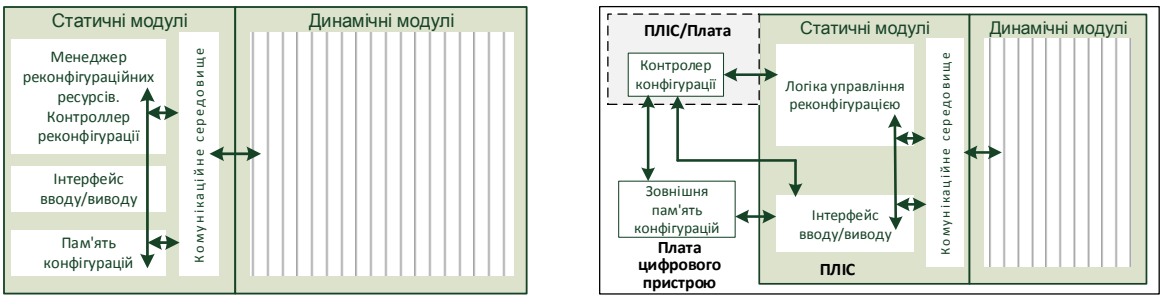
Архітектура абстрактного рівня управління реконфігурацією

На підставі оглянутих літературних джерел можливо розглянути два основних способи реалізації абстрактного рівня управління реконфігурацією, які узагальнюють дві базові архітектури реконфігурованої обчислювального системи. Архітектури РОС відрізняються програмним [3, 8, 9] або апаратним [4, 10] способами реалізації управляючої надбудови операційної системи. Апаратна надбудова операційної системи розміщується в статичній області програмованої структури на ПЛІС. Програмні способи управління зазвичай реалізовані засобами системних процесорів або дискретних процесорних ядер. В роботі [3, 11] наведена аналогічна класифікація РОС, де вони поділяються на два класи відносно реалізації засобів управління реконфігурацією: апаратні РОС (*HW-POC, Reconfigurable Hardware* (*RH*) *Systems*) і реконфігуровані обчислювальні системи (*Reconfigurable Computing* (*RC*) *systems*). Основні архітектурні особливості обох способів реалізації управляючої надбудови операційної системи узагальнені в табл. 1.

Апаратні операційні системи і засоби управління реконфігурацією є необхідною складовою убудованих або автономних реконфігурованих обчислювальних пристроїв (РОП) [3, 10-12]. Зазвичай це задаче-орієнтовані та спеціалізовані системи [5]. Їх структурні особливості зображені на рис. 3, *а*, *б*. Мультикристальні архітектури можуть включати декілька реконфігурованих областей (рис. 3, *б*) [3, 7, 11, 13]. Найбільш характерними особливостями управляючих засобів таких систем є автономність від будь-яких зовнішніх впливів та засобів управління. (табл. 1).

Табл. 1. Архітектурні та функціональні особливості способів реалізації управління

Програмна реалізація	Апаратна реалізація
Значний час виконання алгоритмів управління	Прискорення за рахунок апаратної реалізації
Централізовані, використовують ресурси центрального процесора	Можливість децентралізованої реалізації на локальному рівні обчислювального модуля
Широкий клас виконання обчислень	Спеціалізація, орієнтація на класи задач з розширенням можливостей досягнення високої продуктивності
Наявність зовнішніх управляючих засобів	Автономні системи
Висока вартість, але значно нижча за високопродуктивні кластерні ОС	**РОП*:** Дешеві **РС**:** Значні витрати, доцільні тільки за досягнення високої продуктивності
Прості в розробці за рахунок використання серійних процесорів на всіх рівнях реконфігурації	**РОП:** Прості в розробці **РС:** Складні в розробці, потребують спеціальної кваліфікації спеціалістів
Висока гнучкість, широкі функціональні можливості	**РОП:** Обмежені функціональні можливості, алгоритми управління передумовлені цільовою функцією обчислення **РС:** Ціна досягнення широких функціональних можливостей несумірна з витратами
* – Реконфігуровані обчислювальні пристрої, вбудовані, автономні ** – Реконфігуровані суперкомп'ютери	



а *б*

Рис. 3. Архітектура апаратних реконфігурованих систем: а – система-на кристалі, б – система на платі

На сьогодні найбільш ефективний напрямок розвитку реконфігурованих суперкомп'ютерів – застосування стандартизованих операційних систем широкого використання та програмна реалізація управляючої надбудови. Це спрощує процеси розробки, підтримки та експлуатації, розширює функціональні можливості реконфігурованих обчислювальних систем і надає можливість застосування відомих ефективних методів планування та розподілу задач. Частина функціоналу управляючої надбудови, зокрема така що забезпечує структурну складову реконфігурації, може бути реалізована на рівні апаратури обчислювального модуля. Це розвантажує локальний процесор, але вносить певний компонент специфічності засобів управління. Програмні і програмно-апаратні засоби управління реконфігурацією принадні складним реконфігурованим обчислювальним системам, які проявляють риси паралельних обчислювальних систем загального призначення [1-4, 15-18].

Надалі узагальнимо архітектуру реконфігурованих суперкомп'ютерів, як модульну архітектуру відкритого типу, що представляється централізованими засобами управління та високошвидкісним мережевим комунікаційним середовищем, до яких під'єднані один або декілька обчислювальних модулів на базі однієї, або набору ПЛІС (рис. 2). Центральний процесор забезпечує централізацію управління. Зв'язок між реконфігурованим середовищем та центральним процесом здійснюється засобами локального процесора, що функціонує під управлінням загальної операційної системи. Засоби управління реконфігурацією реалізовані у вигляді надбудови операційної системи, при цьому основна частина їх функціоналу покладена на локальний процесор, або частково реалізована апаратно на базі обчислювального модуля (рис.1). В літературних джерелах така архітектора визначається, як кластероподібна [8].

Застосування однієї і тієї самої елементної бази для реалізації реконфігурованої структури, як автономних РОП так і реконфігурованих суперкомп'ютерів обумовлює загальні проблеми реалізації структурної компоненти управління реконфігурацією.

Реалізація управління апаратними засобами максимально вкладається в парадигму задачеорієнтованих обчислень. При цьому апаратне прискорення дозволяє забезпечити додатковий приріст продуктивності, а розміщення апаратних засобів управління на одному рівні з об'єктами управління реконфігурацією дозволяє максимально зменшити витрати продуктивності на їх реалізацію, тобто забезпечення структурного рівня управління досягається мінімальними обчислювальними ресурсами.

Всі переваги застосування апаратної реалізації, що вкладаються в парадигму задачеорієнтованих систем, є значними недоліками для обчислювальних систем широкого застосування, але оглянуті вище властивості апаратних засобів для додаткового збільшення продуктивності можуть оказатися вагомими противагами програмному способу реалізації саме структурної компоненти управління реконфігурованими суперкомп'ютерами. Надалі наведена порівняльна оцінка програмного та апаратного способу реалізації управління реконфігурацією за параметрами, що впливають на ефективність її структурної складової.

Для оцінки вибрані наступні параметри:

1. реалізації апаратного прискорення обчислень;
2. складність реалізації структурної складової управління;
3. перехід на вищий рівень для реалізації структурної складової управляння, що тягне додаткові витрати продуктивності;
4. степінь гнучкості управляючих засобів відповідно фізичній структурі об'єктів управління, що обумовлює складність зміни алгоритмів управління відповідно зміні структури реконфігурованої області, зокрема з причини технологічних вдосконалень елементної бази;
5. обчислювальна складність реалізації алгоритмів управління реконфігурацією, зокрема задач планування та розподілу задач на реконфігуровану структуру; (4)
6. використання ресурсу ОС;
7. складність, трудомісткість розробки та експлуатації;
8. специфічність розробки.

Для оцінки вибрана п'ятибальна абстрактна шкала оцінки ефективності реалізації структурної складової: 0 – абсолютно ефективно (100%), з практичної точки зору недосяжно; 1 – ефективно, досягається незначними зусиллями або надає значний приріст швидкодії (90% – 70%); 2 – припустимо (60% – 40%); 3 – нижче припустимого, досягається значними зусиллями або витратами часу (30% – 20%); 4 – неможливо або абсолютно неефективно (0%).

Оцінка I. Виконується за попередніх установок, що визначені найбільш ефективною реалізацією управляючих засобів на підставі огляду відомих сучасних РОС – використання засо-

бів стандартизованих ОС широкого застосування для реалізації управління реконфігурованою обчислювальною системою, суміщення абстрактного та структурного рівнів управління реконфігурацією, програмні способи реалізації алгоритмів управління на рівні розподіленої надбудови ОС.

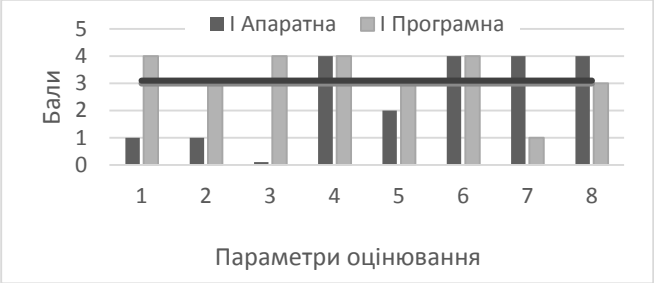


Рис. 4. Оцінка ефективності розповсюджених реалізації управляючих засобів

Підхід повного апаратного прискорення засобів управління за суміщення абстрактного та структурного рівнів тягне за собою значні ускладнення реалізації, підтримки, експлуатації, обумовлені зокрема необхідністю апаратної реалізації певних функцій операційної системи. В реальних системах такий підхід вважається як неефективний. Відомі системи такого рівня були розроблені та надалі досліджуються, але в контексті сучасної парадигми РОС подальшого розвитку не мають [13-15]. З іншого боку, програмна реалізація має значну обчислювальну складність на реалізацію управляючих алгоритмів, непродуктивно витрачаючи продуктивність системи, і базується на засобах ОС, включаючи традиційні технології планування та розподілу задач [16-19]. Необхідність врахування специфіки управління реконфігурованими об'єктами на фізичному рівні ще більше ускладнює реалізацію управління. На підставі цього, а також вагомих переваг апаратного прискорення і безпосередньої близькості апаратних засобів до фізичного рівня системи, доцільно розглянути інші границі розподілу рівнів управляючих засобів, а також можливість підвищення ефективності їх реалізації.

Оцінка II. Найбільші проблеми за попередньою оцінкою виникають з причини суміщення абстрактного та структурного рівня управління. Розглянемо можливість відокремленої реалізації цих рівнів управління. Це звільнить операційну систему від участі в управління реконфігурацією, дозволить використовувати відомі ефективні методи планування та розподілу задач без будь-якої модифікації. Тоді абстрактний рівень виконується засобами ОС, і не розглядається в контексті реалізації як логічної так і фізичної послідовності управління реконфігурацією. В цьому варіанті реалізації управління стає задача розробки спеціальних засобів управління, як логічною [1-4, 20-24] так і фізичною послідовностями реконфігурації, що відповідають структурному рівню її реалізації, програмне виконання яких покладається на локальні процесори обчислювального модуля.

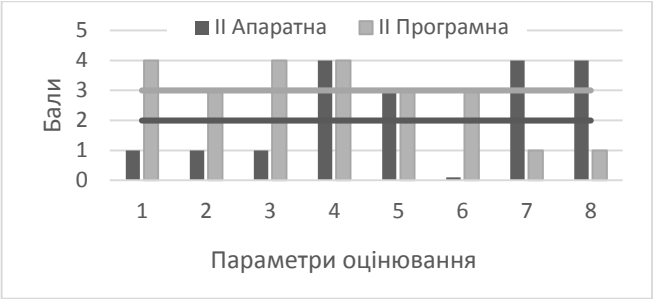


Рис. 5. Оцінка ефективності розділеної реалізації абстрактного та структурного рівнів управляючих засобів

Слід зазначити, що переважно всі оглянуті в межах цієї оцінки системи належать до класу автономних або спеціалізованих реконфігурованих обчислювальних систем. В загальному випадку, всі проблеми програмної реалізації попередньої оцінки відображуються на нижчому рівні реалізації. Збільшення ефективності апаратної реалізації досягається за рахунок ізоляції апаратних засобів управління від рівня операційної системи.

Оцінка III. Для межі розподілу вибрано границю між логічною та фізичною послідовностями реконфігурації. При цьому доцільно реалізувати спеціальні засоби [6, 7], які реалізують логічну послідовність реконфігурації, абстрагуючись задач операційної системи з підтримки загального системного управління. Видимими об'єктами для такої реалізації є укрупнена логічна структура реконфігурованої області. В той час коли реалізація фізичної послідовності реконфігурації покладається на найближчий до фізичного рівень – апаратний рівень обчислювального модуля.

Таким чином, визначимо нові ефективні рівні управління реконфігурованими суперкомп'ютерами і способи їх реалізації:

1. Абстрактний рівень операційної системи – здійснює загальне управління реконфігурованою обчислювальною системою (програмна реалізація на рівні ОС).

2. Абстрактний рівень управління логічною послідовністю реконфігурації (програмна реалізація на рівні локальних процесорів, апаратна реалізація на рівні апаратури обчислювального модуля).

3. Структурний рівень реалізації фізичної послідовності реконфігурації (апаратні засоби обчислювального модуля).

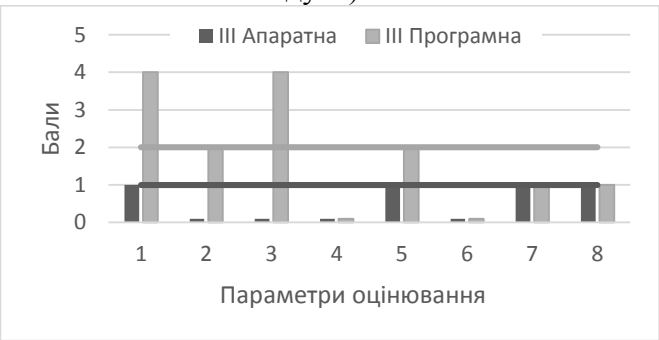


Рис. 6. Оцінка ефективності перспективної реалізації управляючих засобів

З діаграми видно, що апаратна реалізація надає значне збільшення ефективності в безпосередній близькості до фізичного рівня реконфігурованого модуля. На абстрактному рівні логічної послідовності реконфігурації апаратна реалізація зменшує навантаження на локальний процесор і прискорює реалізацію логічних алгоритмів управління. Абстрагування логічної послідовності управління реконфігурацією від системних задач обумовлює звуження їх специфічності, що в певній мірі спрощує їх розробку і застосування. В такому контексті перенос на апаратну структуру управляючих засобів принесе максимальний ефект від їх застосування.

Наприкінці слід зазначити, що для оцінки I і оцінки II обрані властивості ряду відомих реконфігурованих обчислювальних систем, в той час, як реалізації відповідних властивостям, обраним для оцінки III, серед відомих систем не знайдено.

Систематизація засобів управління реконфігурованих обчислювальних систем

На діаграмі (рис. 7) представлена систематизація відомих РОС за способами реалізації засобів управління реконфігурацією в контексті співвідношення програмної та апаратної складової, врахування структурної компоненти, реалізації часткової реконфігурації, забезпечення динамічних алгоритмів управління.

Систематизація також упорядковує відомі реалізацій РОС за історичним рівнем досягнення продуктивності обчислень і властивістю динамічної адаптації до класів вирішуваних задач. Видно, що лише сучасні реконфігуровані суперкомп'ютери реконфігурація яких заснована на технології часткової реконфігурації часу виконання забезпечують дійсний режим динамічної реконфігурації.

Важливим фактором, що забезпечує реалізацію засобів управління є архітектора обчислювального модуля. На ряду з суто апаратною реалізацією обчислювальної структури розглядають гібридні обчислювальні архітектури. За оглядом літературних джерел [3, 4, 8] видно, що відносно принципу загального застосування це найбільш ефективна реалізація, яка передбачає наявність як програмного так і апаратного обчислювального ресурсу для рішення потоку паралельних задач, забезпечуючи багатозадачність та реалізацію різних рівнів розпаралелювання. Гібридна архітектура принадна всім сучасним реконфігурований суперкомп'ютерам (рис. 7, II, III). Такі системи в свою чергу поділяються на дві категорії в залежності від взаємовідношень між реконфігурованими обчислювальними модулями та управляючим процесором: такі коли процесор виконує лише функції управління реконфігурацією і такі, коли процесор бере на себе частину обчислень. Ряд джерел розглядають гібридні архітектури за наявності дискретного процесора в структурі обчислювального модуля [4, 8], або навіть декількох процесорів [2, 3], між якими розподіляються функцій управління і обчислення, при цьому УП звільнюється від внутримодульного управління (рис. 7, II). Є рішення, коли фізичний процес управління реконфігурацією покладається на спеціальні засоби апаратних контролерів реконфігурації, що звільнює локальний процесор для виконання задач більш високого рівня (рис. 7, II) [4, 25]. Авторами робіт [3, 11] представлена класична апаратна РОС з гібридною архітектурою обчислювальної структури, до складу якої окрім реконфігурованих модулів, входять процесорні ядра. Система функціонує автономно від засобів зовнішнього управління, для забезпечення вхідного потоку задач реалізована пам'ять задач, яка зберігає їх заздалегідь передумовлений набір (рис. 7, VIII). Теоретично, описана архітектура може бути масштабована для екстремального об'єму обчислень загального класу, це вкладається в розроблену вище концепцію підвищення ефективності засобів управління. Але відомих реальних розробок такого рівня в літературних джерелах не

знайдено (рис. 7, IV). На підставі досвіду розробок, які не мали подальшого розвитку, розробка повнофункціональної апаратної операційної системи для реконфігурованих суперкомп'ютерів не має сенсу з причини складності її розробки та підтримки, не зважаючи на очікуване прискорення швидкодії (рис. 7, VII). Класи систем (рис. 7, V, VI) повністю засновані на програмних засобах управління на базі операційної системи [16-19]. Ці системи вирішують задачі апаратного прискорення критичних до часу виконання функціональних ядер в класі обчислювальних систем широкого застосування, характеризуються, окрім того, обмеженими функціональними можливостями, на сьогодні підтримуються, але не мають подальшого розвитку.

На підставі розробленої систематизації а також виконаних вище оцінок ефективності, визначені перспективні напрямки розвитку засобів управління реконфігурованими суперкомп'ютерами, які характеризуються відокремленням централізованого управління від безпосередньо управління реконфігурацією (рис. 7, I, II, III) і збільшення її апаратної складової, що дозволить прискорити процес реконфігурації (Рис. 7, I).

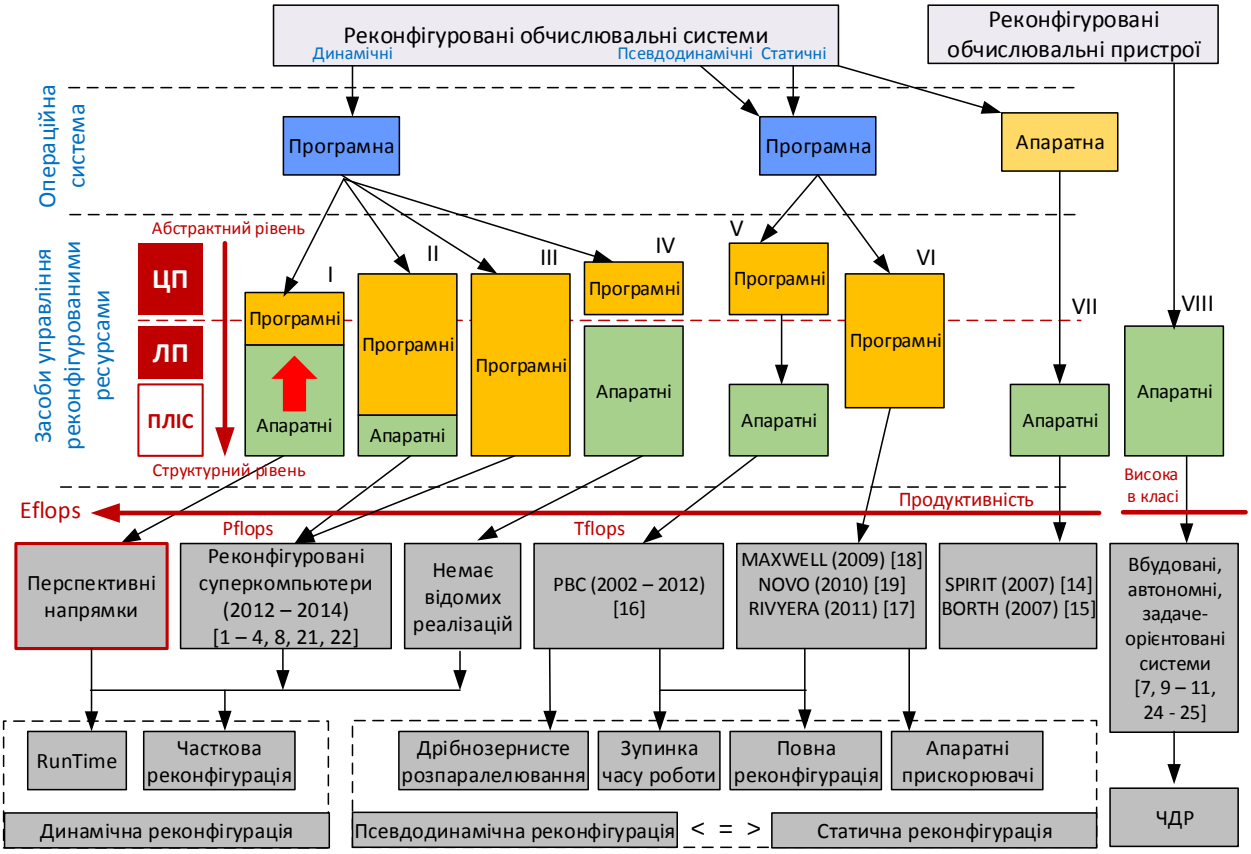


Рис. 7. Систематизація засобів управління в реконфігурованих обчислювальних системах

Висновки

Розглянуті архітектурні особливості засобів управління реконфігурованими ресурсами в відомих реконфігурованих обчислювальних системах в контексті пошуку ефективних рішень щодо планування та розподілу задач на динамічно змінювану архітектуру. Визначено, що основною особливістю, що впливає на складність і специфічність рішення проблеми планування та розподілу задач в даному класі обчислювальних систем є необхідність врахування параметрів фізичного рівня обчислювальної структури на вищих рівнях функціонування обчислювальної системи, що є специфічною особливістю, яку не враховують технології паралельних обчислень в системах з традиційною архітектурою. Це обґрунтовує необхідність розробки спеціальних методів, алгоритмів та засобів управління реконфігурованими ресурсами й додатками в динамічно реконфігурованих обчислювальних системах.

Виконана оцінка ефективності відомих рішень реалізації засобів управління реконфігурованими ресурсами, щодо складності виконання фізичної складової реконфігурації. Визначено, що рівні абстракції, на яких розглядаються всі відомі засоби реалізації управління

реконфігурованими ресурсами, значно ускладнюють рішення проблеми планування та розподілу задач на реконфігуровану архітектуру, негативно впливаючи на загальну продуктивність обчислювальної системи.

Запропоновані нові перспективні рівні абстракцій для реалізації засобів управління реконфігурованими ресурсами, що дозволять застосовувати відомі ефективні методи та алгоритми для рішення проблеми динамічного планування та розподілу задач на рівні операційної системи широкого застосування та локалізувати специфіку логічної послідовності реконфігурації на програмно-апаратному рівні обчислювального модуля прозоро для операційної системи, чим забезпечити їх апаратне прискорення, мобільність та підвищення ефективності розподілу динамічних наборів задач на гнучку фізичну структуру.

Визначені наступні вимоги до засобів управління реконфігурованими ресурсами та додатками, зокрема до засобів планування та розподілу задач на реконфігуровану архітектуру, які дозволять збільшити єфективність реконфігурації і досягнути загального збільшення швидкодії:

– покласти процес управління паралельними додатками на рівень операційної системи, що дозволить в повній мірі забезпечити використання ефективних технологій паралельних обчислень;

– локалізувати управління реконфігурованими ресурсами на рівні обчислювального модуля та забезпечити їх автономність від централізованої системи управління, що дозволить позбавити операційну систему від специфічного процесу управління реконфігурованими ресурсами, та зменшити рух даних на міжмодульному рівні, сприяючи загальному прискоренню реконфігурації та мобільності засобів реконфігурації;

– підвищення апаратної компоненти засобів управління як фізичною так і логічною послідовністю реконфігурації, що дозволить збільшити швидкість реконфігурації за рахунок апаратного прискорення та ефективність забезпечення фізичного рівня реконфігурації;

– розширення функціональних можливостей локальних засобів управління реконфігурацією в межах проблеми спрощення їх розробки, технічної й функціональної підтримки й експлуатації, що сприятиме ефективність їх застосування для рішення широкого класу задач.

На підставі огляду відомих реконфігурованих обчислювальних систем виконана їх систематизація відносно архітектури засобів управління реконфігурованими ресурсами й додатками, враховуючи, як основний параметр, степінь рішення проблеми динамічної реконфігурації архітектури. На підставі виконаної систематизації визначено місце запропонованих перспективних напрямків розвитку реконфігурованих обчислювальних систем в сучасному середовищі високопродуктивних обчислень, та визначено, що жодна з відомих реалізації цілком не відповідає поставленим вимогам.

Список посилань

1. El-Araby E. Exploiting Partial Runtime Reconfiguration for High-Performance Reconfigurable Computing / E. El-Araby, I. Gonzalez, T. El-Ghazawi // ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems (TRETS). – US, NY, New York, ACM, 2009. – Vol. 1, № 4, P 21.1-21.23.
2. Huang M. Reconfiguration and Communication-Aware Task Scheduling for High-Performance Reconfigurable Computing / M. Huang, V.K. Narayana, H. Simmler, O. Serres, T. El-Ghazawi // Transactions on Reconfigurable Technology and Systems (TRETS). – US, NY, New York, ACM, 2010. – Vol. 3, № 4. – P. 20.1-20.25.
3. Bassiri M.M. Mitigating Reconfiguration Overhead In On-Line Task Scheduling For Reconfigurable Computing Systems / M.M. Bassiri, S.H. Shahriar // Proceeding of 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology (ICCET), (China, Chengdu, 16 - 18 April 2010). – IEEE, 2010. – Vol. 4. – P. 397-402.
4. Al-Wattar A. Efficient On-line Hardware/Software Task Scheduling for Dynamic Run-time Reconfigurable Systems / A. Al-Wattar, S. Areibi, F. Saffih // Proceeding in 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum (IPDPSW). – IEEE, 2012. – P 401-406.

5. Клименко І.А. Класифікація реконфігурованих обчислювальних систем / І.А. Клименко, М.В. Рудницький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – №5 (116). – С. 120-128.
6. Danne K. Periodic Real-Time Scheduling for FPGA Computers / K. Danne, M. Platzner // Proceeding of Third International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (Germany, Hamburg, 2005). – IEEE, 2005. – P. 117-127.
7. Panella A. A Design Workflow for Dynamically Reconfigurable Multi-FPGA Systems / A. Panella, F. Redaelli, F. Cancare, D. Sciuto // Proceeding of 18th IEEE/IFIP VLSI System on Chip Conference (VLSI-SoC), (Spain, Madrid, 27 - 29 Sept. 2010). – IEEE, 2010. – P. 114-119.
8. Ahmed W. Adaptive Resource Management for Simultaneous Multitasking in Mixed-Grained Reconfigurable Multi-core Processors /W. Ahmed, M. Shafique, L. Bauer, J. Henkel // Proceedings of the 9th International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS) (Taiwan, Taipei, 9-14 October 2011). – IEEE, 2011. – P. 365-374.
9. Sridharan R. FPGA-based Reconfigurable Computing for Pricing Multi-asset Barrier Options / R. Sridharan, G. Cooke, K. Hill, H. Lam, A. George // Proceedings of Symposium on Application Accelerators in High Performance Computing (SAAHPC) (US, IL, Chicago, 10-11 July 2012). – IEEE, 2012. – P. 34-43.
10. Kalte H. Context Saving and Restoring for Multitasking in Reconfigurable Systems / H. Kalte, M. Porrmann // Proceeding of International Conference on Field Programmable Logic and Applications (Finland, Tampere, 24 - 26 August 2005). – IEEE, 2005. – P. 223-228.
11. Danne K. Executing hardware tasks on dynamically reconfigurable devices under real-time conditions / K. Danne, R Miihlenbernd, M. Platzner // Proceeding of 16-th International Conference on Field Programmable Logic and Applications, FPL'06, (Spain, Madrid, 28 - 30 August 2006). – IEEE, 2006. – P. 1-6.
12. Birla M. Partial Run-time Reconfiguration of FPGA for Computer Vision Applications // M.Birla, K.N.Vikram / Proceeding of IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing (IPDPS) (US, FL, Miami, 14-18 April 2008). – IEEE, 2008. – P. 1-6.
13. Schmidt A.G. An Evaluation of an Integrated On-Chip/Off-Chip Network for High-Performance Reconfigurable Computing / A.G. Schmidt, W.V. Kritikos, S. Gao, R. Sass // International Journal of Reconfigurable Computing. – US, NY, Hindawi Publishing Corp., 2012. – Vol. 2012. – P. 5.1-5.15.
14. Rajasekhar Y. Architecture and Applications for an All-FPGA Parallel Computer / Y. Rajasekhar, R. Sass // Proceeding of 41st International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW), (US, PA, Pittsburgh, 10 - 13 September 2012). – 2012. – P. 157-164.
15. Kwok-Hay So H. Improving usability of fpga-based reconfigurable computers through operating system support / H. Kwok-Hay So, R.W. Brodersen // Proceeding of International Conference Field Programmable Logic and Applications (FPL '06), (Spain, Madrid, 28 - 30 August 2006). – 2006. – P. 1-6.
16. Каляев И. А. Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы на основе плис Virtex-6 и Virtex-7 / И. А. Каляев, А. И. Дордопуло, И. И. Левин, Е. А. Семерников // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ’2012) (Новосибирск, 26-30 марта 2012 г.). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 449-458.
17. Starke C. Optimizing Investment Strategies with the Reconfigurable Hardware Platform RIVYERA /C. Starke, V. Grossmann, L. Wienbrandt, S. Koschnicke, J. Carstens [and all] // International Journal of Reconfigurable Computing. – US, NY, Hindawi Publishing Corp., 2012. – Vol. 2012. – P. 6.1-6.10.
18. Baxter R. Maxwell – a 64 FPGA Supercomputer / R. Baxter, S. Booth, M. Bull, A. Trew [and all]. // Adaptive Hardware and Systems, 2007 (AHS 2007). (Scotland, Edinburgh, 5 - 8 August 2007). – IEEE Computer Society, 2007. – P. 287-294.
19. George A. Novo-G: At the Forefront of Scalable Reconfigurable Supercomputing / A. George, H. Lam, G. Stitt // Computing in Science & Engineering. – IEEE, 2011. – Vol. 3, № 1 – P. 82-86.
20. Taher M. Virtual Configuration Management: A Technique for Partial Runtime Reconfiguration / M. Taher, T. El-Ghazawi // IEEE Transactions on Computers. – IEEE, 2009. – Vol. 58, № 10. – P. 1398-1410.

21. Buell D. High-Performance Reconfigurable Computing // D. Buell, T. El-Ghazawi, K. Gaj, V. Kindratenko // Journal Computer. – Volume 40 Issue 3 – US, CA, IEEE Computer Society Press Los Alamitos, 2007. – P. 23-27.
22. Koch D. Fine-Grained Partial Runtime Reconfiguration on Virtex-5 FPGAs // D. Koch, C. Beckhoff, J. Torrison // Proceeding of 18th IEEE Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM) (NC, Charlotte, 2 – 4 May 2010). – IEEE, 2010. – P. 69-72.
23. Liu S. Minimizing the runtime partial reconfiguration overheads in reconfigurable systems / S. Liu, R.N. Pittman, A. Forin, J.-L. Gaudiot // The Journal of Supercomputing. – 2012. – Vol. 61, № 3. – P. 894-911.
24. Jara-Berrocal A. VAPRES: A Virtual Architecture for Partially Reconfigurable Embedded Systems / A. Jara-Berrocal, A. Gordon-Ross A.// Proceeding of Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), (Germany, Dresden, 8 – 12 March 2010). – IEEE, 2010. – P. 837-842.
25. Liu S. Achieving Energy Efficiency through Runtime Partial Reconfiguration on Reconfigurable Systems / S. Liu, R.N. Pittman, A. Forin, J.-L. Gaudiot // Transactions on Embedded Computing Systems (TECS). – US, NY, New York, ACM, 2013. – Vol. 12, № 3. – P. 72.1-72.21.