

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БІЛЕНКО Анатолій Олександрович

УДК 004.272:004.272.42

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ РЕКОНФІГУРОВАНИХ  
ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗА РАХУНОК НОВОЇ  
СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі комп'ютерних систем Одеського національного політехнічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Ситніков Валерій Степанович**,  
Одеський національний політехнічний університет,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Харченко В'ячеслав Сергійович**,  
Національний аерокосмічний університет  
«Харківський авіаційний інститут»,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж;

доктор технічних наук, професор  
**Дрозд Олександр Валентинович**,  
Одеський національний політехнічний університет,  
професор кафедри комп'ютерних інтелектуальних  
систем та мереж.

Захист відбудеться «22» листопада 2012 р. о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01 при Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, ауд. 400-А.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий «17» жовтня 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О. Є. Колесніков

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Для розв'язання сучасних наукових і технічних завдань потрібні високопродуктивні обчислювальні потужності, оскільки швидкодії традиційних обчислювальних засобів на основі процесорів загального призначення вже недостатньо для ефективного вирішення великих за об'ємом завдань. У зв'язку з цим, в комп'ютерній техніці активно розвиваються теоретичні засади побудови систем з високою продуктивністю, в основу яких покладено методи паралельного програмування і методи спеціалізації архітектури для окремого розв'язуваного завдання. Під час вирішування задач на паралельних комп'ютерних системах продуктивність оброблення даних суттєво менше пікової продуктивності, що спричинено витратами на реалізацію паралельного програмування.

Проблему великої витратності реалізації паралельного програмування і комунікаційної складності сьогодні вирішують шляхом побудови спеціалізованих архітектур, які структурно найкраще відповідають алгоритмові розв'язуваного завдання.

Проте, створення спеціалізованого обчислювального пристрою для кожної конкретної обчислювальної задачі є досить коштовним і тривалим процесом.

Інший підхід до реалізації обчислень, що дає змогу досягти високих показників продуктивності обчислювальної системи без побудови великої кількості спеціалізованих пристроїв, полягає у створенні реконфігурованих обчислювальних пристроїв (РОП) однорідних обчислювальних систем (ООС).

Але, під час роботи із сучасними РОП ООС, у яких введення спеціалізації можливе лише в кожен комірок ООС, ефективне відображення графа алгоритму зі спеціалізацією не можна здійснити, оскільки у графі алгоритму, який є стандартним методом опису обчислень, звичайно існує не більш як 10–15% спеціалізованих вершин. Іншими словами, 85–90% комірок РОП ООС працюють без використання додаткових апаратних засобів, витрачених на їхню спеціалізацію.

Отже, сучасні РОП ООС вже не здатні впоратися з вимогами до реконфігурованих систем, які суттєво зросли, з точки зору швидкодії та апаратних витрат.

У зв'язку з цим, актуальною постає науково-технічна задача розробки нових видів РОП ООС, швидкодію яких можливо підвищити за рахунок часткової спеціалізації комірок системи, що забезпечить при цьому прийнятні апаратні витрати.

### **Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційну роботу проведено у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету кафедри комп'ютерних систем «Структурний синтез багатовхідних засобів систем аналогової та цифрової обробки сигналів» (номер державної реєстрації 0105U002176) та держбюджетної науково-дослідної роботи «Частотно-залежні компоненти цифрових систем, які перебудовуються» (номер державної реєстрації 0109U008467).

**Мета дисертаційної роботи** полягає у підвищенні швидкодії обчислень у реконфігурованих обчислювальних засобах за рахунок аналізу обчислень та нової організації їхніх компонентів.

Для досягнення зазначеної мети потрібно вирішити такі завдання:

- проаналізувати стан розвитку реконфігурованих обчислювальних систем та однорідних обчислювальних систем, методів структурного створення подібних систем;
- запропонувати методи та алгоритми реалізації схем обчислень для однорідних обчислювальних систем;
- запропонувати методи розміщення комірок та трасування їх зв'язків для реконфігурованих однорідних обчислювальних систем;
- розробити методи формування спеціалізованих макрооперацій комірок та методи оптимального включення їх до загальної структури однорідних обчислювальних систем;
- провести експериментальні дослідження та впровадити реконфігуровані комп'ютерні системи.

*Об'єктом дослідження* є процеси обчислення у реконфігурованій обчислювальній системі.

*Предметом дослідження* є моделі та методи швидкодіючих обчислень у реконфігурованій обчислювальній системі.

**Методи дослідження.** Теоретичні результати дисертації базуються: на теорії цифрових автоматів, для розроблювання структури поля реконфігурованих комірок; на теорії графів для розроблення та аналізу моделей обчислень; на теорії трансляції мов програмування для опису і реалізації функційної мови програмування із заданими властивостями для перетворення програм у моделі обчислень; на теорії методів оптимізації, що передбачає застосування методів оптимального використання спеціалізованих комірок у реконфігурованих обчислювальних пристроях на основі однорідних обчислювальних систем. Оцінювання результатів виконано на підставі комп'ютерних експериментів.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- вперше розроблено метод реалізації схем обчислень, який полягає в заміні опису обчислення графом на структурно-алгоритмічний опис, що дозволило спростити та автоматизувати організацію схем обчислень з великою кількістю компонентів;
- одержав подальший розвиток метод розміщення комірок для реконфігурованих однорідних обчислювальних систем, який полягає у комплексному використанні алгоритмів імітації відпалення і розбиття розміщенням, що дозволяє зменшити довжину сконфігурованих комутаційних з'єднань топології реконфігурованої системи;
- одержав подальший розвиток метод трасування комірок реконфігурованої системи, заснований на використанні графового алгоритму трасування Дейкстри із перевизначенням ваг ребер графа моделі обчислень, що дозволило скоротити довжину комутаційних з'єднань структури реконфігурованої системи;
- вперше розроблено метод комутації спеціалізованих блоків апаратних засобів, на базі яких будується реконфігурована система, який полягає у використанні алгоритмів критичного шляху та максимального потоку графа моделі обчислень для оцінювання швидкодії варіантів включення спеціалізованих

арифметико-логічних пристроїв (АЛП), що знизило кількість варіантів їх включення, що перевіряються;

- вперше розроблено модель реконфігурованої системи із спеціалізованими арифметико-логічними пристроями на основі критичного шляху графа затримок зі спеціалізованими вершинами, що дозволяє враховувати присутність спеціалізованих арифметико-логічних пристроїв для оцінювання швидкодії реконфігурованої системи в цілому.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

Розроблені у дисертаційній роботі алгоритми і методи приблизно на 11% підвищують швидкодію обчислень на реконфігурованих обчислювальних пристроях (РОП) однорідних обчислювальних системах (ООС) для обраного класу алгоритмів за рахунок спеціалізації структури РОП ООС та автоматизованого вибору варіанта спеціалізації.

Запропонований програмний комплекс дає можливість скоротити час на розроблення програмного забезпечення (ПЗ) для РОП ООС, спрощує роботу розробникам ПЗ, зменшує апаратні витрати на реалізацію обчислень шляхом спеціалізації структури ООС та шляхом покращення алгоритмів розміщення і трасування РОП ООС, дозволяє інтегрувати раніше написане ПЗ для РОП ООС у спеціалізовані ООС.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Основні результати дисертаційного дослідження здобувач отримав самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: побудова одного з методів аналіз реконфігурованих обчислень [1], структура системи кодування багатомірних сигналів [2], принципи організації програмного забезпечення для компонентних систем [3], аналіз апаратних видатків на реалізацію фільтрів [4], класифікація деяких вейвлет-функцій [5].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження доповідались: на VII міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2011» (12-14 жовтня 2011р., м. Одеса, Україна); на V міжнародній науково-технічній конференції «Гарантоздатні (надійні та безпечні) системи, сервіси, технології» (12-15 травня 2010 р., м. Кіровоград, Україна); на XVI міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика – 2009» (23-26 вересня 2009 р., м. Одеса, Україна); на X міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (18-22 травня 2009 р., м. Одеса, Україна); на XV міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика – 2008» (23-26 вересня 2008 р., м. Одеса, Україна); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (19-23 травня 2008 р., м. Одеса, Україна).

**Публікації.** За результатами дослідження опубліковано 9 наукових праць, у тому числі 5 статей у фахових виданнях та 4 доповіді у вигляді тез на наукових конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який нараховує 103 найменування, і 6 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 120 сторінок. Дисертація містить 60 рисунків і 5 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність наряду дослідження, висвітлено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, показано наукову новизну, практичне значення одержаних результатів та особистий внесок здобувача. Наведено відомості про апробацію, публікації та впровадження результатів дослідження.

**У першому розділі** викладено відомості про головні передумови до створення систем на основі реконфігурації. Наведено дані, які підтверджують факт, що питома продуктивність традиційних видів обчислювальної техніки стабільно знижується протягом тривалого історичного періоду. Описано кілька варіантів обчислювальних пристроїв, за допомогою яких можна підвищити показник питомої продуктивності через покращення відповідності між їх архітектурою та розв'язуваними на них завданнями, а також вказано на особливості реконфігурованих обчислювальних пристроїв.

Показано, що вагомий вплив на розвиток реконфігурованих обчислень було надано вітчизняними та зарубіжними вченими, такими як А. О. Мельник, В. С. Харченко, В. Н. Опанасенко, І. А. Каляєв, Ж. Ж. Естрін, С. К. Хок, Д. Ж. Паттерсон.

Запропоновано методи апаратної реалізації реконфігурованих обчислень на основі однорідних обчислювальних систем. Підкреслено, що структура типової реконфігурованої системи (рис. 1) складається з двох частин: нереконфігурованої керувальної (або «фіксованої») частини  $F$  на базі комп'ютера з архітектурою загального призначення і змінною частиною  $V$  – так званого «реконфігурованого» обладнання, яке можна об'єднати у різні конфігурації.

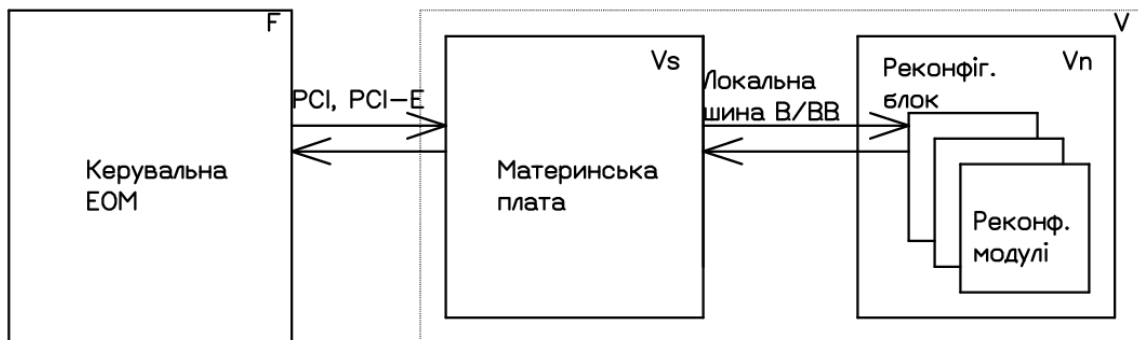


Рис. 1. Типова реконфігурована система

Реконфігурована частина, своєю чергою, складається з набору реконфігурованих модулів  $V_n$ , підключених до материнської плати  $V_s$  через локальну шину вводу/виводу. Одну з можливих реалізацій архітектури реконфігурованого модуля подано на рис. 2 а. До складу модуля входять такі апаратні ресурси, як-от: інтерфейс локальної шини вводу/виводу; контекст обчислення; конфігураційна пам'ять; контролери вводу/виводу реконфігурованого обчислювального пристрою; комутатор виводу РОП; набір черг FIFO; РОП на основі ООС.

На рис. 2 б наведено структуру елементарного обчислювального і комутаційного блока – комірки ООС. Крім того, розроблено засади побудови спеціалізованих ООС, призначених для зменшення апаратних витрат, збільшення продуктивності обчислень загалом та ефективного застосування спеціалізованих ресурсів мікросхем, на базі яких будується ООС.

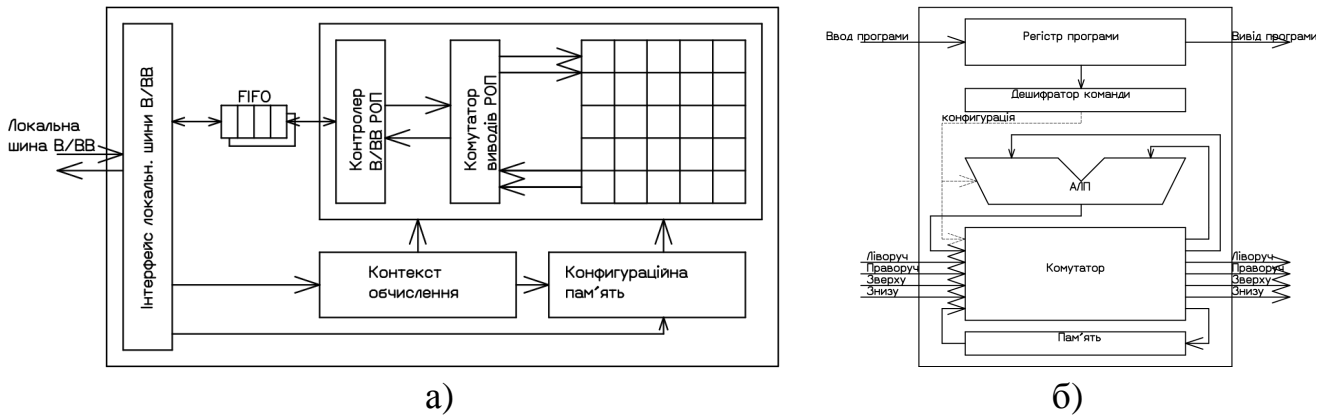


Рис. 2. Архітектура реконфігурованого блоку: а – модуль на основі ООС, б – комірка матричної ООС

У роботі визначено провідні засади процесу програмних компонентів (ПК) для РОП ООС. Розроблювання ПК для РОП – складний ітеративний процес, у якому розробник починає опис обчислювальної задачі у будь-якому з можливих видів опису алгоритмів, після чого виконуються такі фази, як визначення та аналіз обчислення; розподіл на реконфігуровану та фіксовану частини обчислення; підготовка та генерування специфікацій реконфігурованої апаратної частини; оцінювання продуктивності обчислень на РОП.

Для реалізації процесу розроблювання для РОП необхідно сформувати набір інструментів, до складу якого мають входити такі утиліти: компілятор програмного коду для фіксованої частини реконфігурованої системи і набір бібліотек для реалізації конфігурування; профілювальник програмного коду фіксованої частини системи; трасувальник і програма розміщення та відображення програмного опису алгоритму на структуру ООС; симулятор реконфігурованої системи, який дає змогу згенерувати інформацію про швидкодію здійснюваних обчислень. Структуру взаємозв'язків інструментів подано на рис. 3.

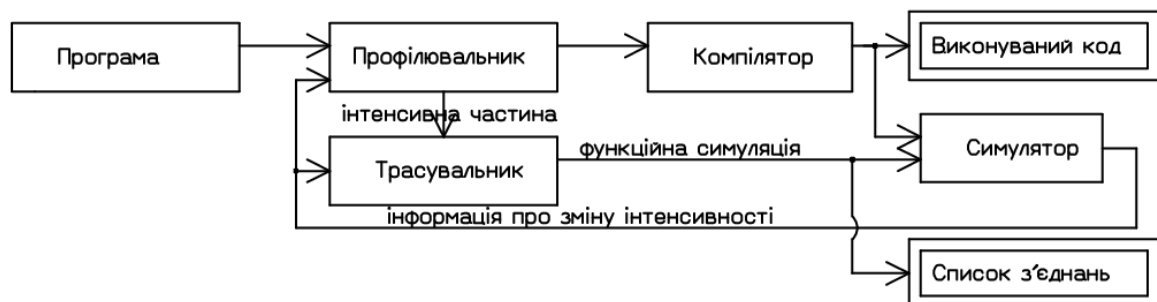


Рис. 3. Система інструментів організації РОП

У роботі запропоновано методи організації обчислень на ООС, а також їх спеціалізації. Показано, що основним методом специфікації обчислювальних задач для реконфігурованих систем є граф моделі обчислення, який відображується на структуру РОП ООС, та параметри спеціалізації моделі. Розроблено обмеження на реалізацію структури спеціалізованої ООС.

Одним із методів організації обчислень на РОП ООС є структурно-процедурна організація обчислень, тобто така робота РОП ООС, коли обчислення здійснюються шляхом оброблення масиву завчасно підготовлених підграфів моделі обчислення, які називають кадрами. Проміжні обчислення оброблення підграфів передаються в наступні стадії для їхнього оброблення.

Для спеціалізації складових частин РОП ООС проаналізовано алгоритми, для яких будується реконфігурована система. Виділено типові операції, які є обчислювально інтенсивними частинами у розглянутих алгоритмах.

Під час спеціалізації за умов апаратних обмежень виникає задача вибору того, які блоки РОП ООС спеціалізувати. Розглянуто головні види спеціалізації, а саме: загально спеціалізована, частково спеціалізована, неспеціалізована універсальна.

**У другому розділі** розроблено нові, а також показано та адаптовано відомі методи та алгоритми реалізації схем обчислень у РОП ООС.

Визначення вручну графа моделі обчислення  $G(V, E)$ , де  $V$  – множина вершин,  $E$  – множина ребер, який нараховує 20-30 вершин, є процесом непрактичним і таким, що може містити велику кількість помилок. Все це спричинено зростанням кількості вершин  $V$ , яке, своєю чергою, впливає на збільшення кількості ребер графа моделі обчислення за законом  $E = O(V^2)$ . До певної межі проблему швидкого розростання графа моделі обчислення можна розв'язати шляхом використання спеціальних інструментів.

Однак за умови опису обчислення будь-якої складності і гнучкішого представлення обчислень постає завдання – знайти спосіб ефективнішого опису обчислень для реконфігурованих систем порівняно з прямим способом опису графом моделі обчислення. Через велике поширення мов програмування стає очевидним, що найзручнішим інструментом опису обчислень для більшості спеціалістів у галузі ком'ютерних систем є мова програмування.

З цією метою розроблено нову функційну мову обчислювальних топологій (ФАОТ) для опису обчислень у РОП ООС. Основна схема обчислення мови ФАОТ не відрізняється від схеми, запропонованої чистими функційними мовами. Отже, підхід до побудови ФАОТ, як і функційний підхід, характеризується такими особливостями:

- функційні програми не мають операторів присвоєння, тому змінні, яким було присвоєно значення, ніколи більше його не змінюють;
- будь-який виклик функції не може не повертати результату свого обчислення, тобто будь-яка функція має повертати значення. Це сприяє зменшенню помилок у програмуванні, а також робить незначним порядок обчислення незалежних функцій;
- будь-який вираз або змінна обчислюється лише у міру необхідності.

У дослідженні показано, що запропонований підхід до створення мови програмування дає змогу: автоматично виокремлювати паралельні обчислювальні



фрагменти схем обчислень без їх явного зазначення; не вводити обмеження на структуру обчислювальних пристроїв, для яких мова розроблена; оптимізувати обчислення «за місцем» та оптимізувати структуру програми загалом без змін синтаксису мови, шляхом її розширення; розробити максимально простий й одночасно виразний синтаксис, який мають легко освоїти розробники програм, а також подати звичний набір парадигм і шаблонів програмування.

Далі розроблено нові й адаптовано відомі методи розбиття графів на підграфи. Розбиття графа алгоритмів на неперетинні підграфи є частиною алгоритму підготовки графа моделі обчислення для оброблення на РОП ООС. Збалансоване застосування обчислювальних ресурсів, а саме: паралельне обчислення незалежних ділянок графа моделі обчислення і мінімізація інформаційних вершин, безпосередньо впливає на кількість звернень до зовнішньої пам'яті, залежить від використаного алгоритму розбиття графа на підграфи. Показано особливості настроювання алгоритмів розбиття графів для характеристики структури РОП ООС.

З метою формулювання задачі щодо розбивання графів використано такі визначення:

- $E = \{e_{ij} = (i, j) \mid \forall v_i, v_j, adj(v_i, v_j)\}$ , де  $adj(v_i, v_j) = \begin{cases} \text{істина, } v_i \text{ з'єднана з } v_j \\ \text{хибність, } v_i \text{ не з'єднана з } v_j \end{cases}$ ;
- вершини та ребра мають такі ваги:  
 $W_E = \{w_e(e_{ij}) \in N \mid e_{ij} \in E\}$  і  $W_V = \{w_v(v_i) \in N \mid v_i \in V\}$ ;
- ваги є додатними цілими числами, що належать множині  $N_+$ .

Прикладом служить таке розбивання графа, у якого вага ребер і вершин дорівнює 1, на два підграфи, причому такі, що вершини  $V$  цього графа розбиваються на дві неперетинні множини  $V_1$  і  $V_2$  приблизно однакового розміру, а кількість ребер, що з'єднують вершини  $v_i \in V_1$  і  $v_j \in V_2$ , мінімальна:

$$\begin{cases} V = V_1 \cup V_2 \text{ у } V_1 \cap V_2 = \emptyset \\ |V_1| - |V_2| \rightarrow \min \\ \left| \{e_{ij} \in E \mid v_i \in V_1 \text{ у } v_j \in V_2\} \right| \rightarrow \min \end{cases} . \quad (1)$$

У загальному вигляді задачу формулюють з урахуванням ребер і вершин графа та  $k$ -незв'язаних підмножин вершин. У такому випадку, суми ваг вершин усіх під графів  $\omega_i$  мають бути рівними та сума ваг ребер між розділеними множинами вершин – мінімальною:

$$\begin{cases} V = \bigcup_{i=1}^k V_i \text{ у } V_i \cap V_j = \emptyset, \forall i, j, i \neq j \\ \omega_j = \sum_{v_i \in V_j} w_v(v_i) \text{ у } \omega_p - \omega_q \rightarrow \min \text{ у } p, q \in \{1, 2, \dots, k\} \text{ у } p \neq q . \\ \sum_{e_{ij} \in E, v_i \in V_p, v_j \in V_q, q \neq p} w_e(e_{ij}) \rightarrow \min \end{cases} . \quad (2)$$

Наведено та адаптовано для матричних РОП ООС алгоритми розбивання неспрямованих графів на підграфи. Алгоритми відрізняються оцінками якості розбиття та оцінками швидкості виконання, тому вони застосовуються разом для здобуття необхідної швидкодії та якості.

Алгоритми розбивання неспрямованих графів не дають змоги видалити циклічні залежності між підграфами графа моделі обчислення, тому розроблено алгоритм, який розбиває на підграфи і видаляє такі залежності.

Розроблено нові та адаптовано відомі методи розміщування комірок РОП ООС. За етапом розбиття графа моделі обчислення на кадри підграфів надходить етап розміщення операційних та інформаційних вершин моделі обчислення кадру у структурі РОП ООС. Метою розміщення є організація найкращого відображення графа моделі обчислення на структуру РОП ООС відповідно до заданих критеріїв оптимальності.

Задачу щодо розміщення вершин графа моделі обчислення формують так: дано структуру РОП ООС у вигляді графа з'єднань її комірок та списку доступних комірок, на які необхідно відобразити відповідні вершини графа моделі обчислення; дано граф моделі обчислення алгоритму, що складається з інформаційних та операційних вершин. Кожна операційна вершина відповідає АЛП комірки РОП ООС, а інформаційна – відповідному каналу пам'яті РОП ООС.

Потрібно знайти таке розміщення комірок, щоб одержаному розміщенню множини вершин відповідали певні критерії оптимальності. Як критерій оптимальності розміщення комірок РОП ООС вибирають довжину комутаційних ланцюгів, кількість задіяних комірок.

Розроблено нові та адаптовано відомі методи трасування комірок РОП ООС. Трасування комірок – останній етап реалізації моделі обчислень, здійснюваних на РОП ООС. Задача трасування полягає у пошуку найкращої схеми з'єднань комірок для відображеної моделі обчислень на структуру РОП ООС за допомогою заданих критеріїв оптимальності.

Задачу щодо трасування комірок РОП ООС формують так: дано структуру РОП ООС у вигляді графа з'єднань її комірок та списку комірок; дано граф моделі обчислення, що складається з інформаційних та операційних вершин, а також ребер, що сполучають ці вершини. Потрібно знайти такі з'єднання комірок, з якими отримана схема сполучень відповідала би ребрам графа кадру та певним критеріям оптимальності, наприклад, таким, як мінімальна довжина з'єднань, трасування всіх з'єднань, мінімальна кількість комірок, що працюють лише у режимі комутації, мінімізація зламів з'єднань і т. п.

За аналогією з розставленням комірок вирішення задачі трасування у загальному вигляді є обчислювально складним, що спричинено великою кількістю варіантів з'єднань. Для розв'язання цієї задачі за кінцевий час застосовують евристичні алгоритми, які відкидають варіанти з'єднань з малою імовірністю успішного трасування, локально-оптимальні методи трасування у сукупності з комбінаторними методами та алгоритмами.

Розроблено новий метод формування спеціалізованих блоків РОП ООС, а також принцип їх оптимального включення до структури.

Зазначене завдання виникає у зв'язку з необхідністю використати додаткові та спеціалізовані апаратні ресурси, на базі яких будують РОП ООС.

Для вирішення цього завдання необхідно розв'язати проблему вибору класів спеціальних операцій та проблему оптимального включення спеціальних операцій у загальну структуру РОП ООС.

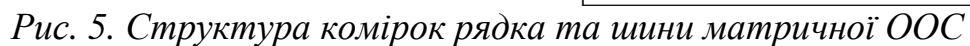
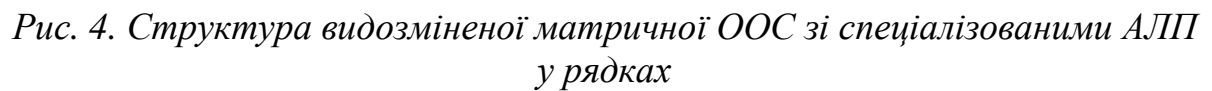
Проблема вибору класів спеціальних операцій не дослідницька, а інженерна, оскільки розробники апаратних ресурсів надають інформацію про внутрішню структуру спеціалізованих блоків, а також приклади їх застосування. Отже, виділити клас спеціальних операцій можна емпіричним способом, тобто виділити набір класів можна шляхом аналізу програми, яка записана мовою опису обчислень графа моделі. Наприклад, якщо для однієї мовної конструкції, яка суб'єктивно використовується частіше за інші, створюється більше вершин графа моделі обчислення порівняно з іншими конструкціями, то ці вершини також можна подати у внутрішній структурі апаратних засобів меншими апаратними витратами, використавши спеціалізовані комірки, ніж за допомогою базових комірок. Для випадку алгоритмів ЦОС такі спеціалізовані комірки завчасно відомі, про що згадано у розділі 1, та доступні із САПР апаратних засобів.

Для детальнішого оцінювання часового внеску у загальне обчислення заданої мовної конструкції використовується підхід, оснований на інструментальному профілюванні алгоритму, що запускається на архітектурі фон Неймана. Результатом процесу профілювання стає список часових внесків кожної значущої програмної конструкції, поданої у вигляді таблиці або діаграми.

Для вирішення проблеми вибору спеціальних операцій з боку апаратного забезпечення запропоновано видозмінити структуру РОП ООС так, щоб задіяти обмежену множину спеціалізованих ресурсів апаратних засобів. Проте спеціалізація не має суттєво вплинути на структуру РОП ООС, а також на розроблені програмні компоненти. Виходячи з перелічених вимог та обмежень, запропоновано модифікувати структуру РОП таким чином: у кожний рядок матричної ООС додається «спеціалізоване АЛП», яке розподіляється між усіма комірками цього рядка. Для реалізації такого розподілу обрано схему із загальною шиною (рис. 4), при цьому у кожену комірку РОП ООС додають схему мультиплексування, що складається із блоків DEMUX1, DEMUX2, MUX1 та шинного буфера, який переключає зовнішній спеціалізований і внутрішній типовий АЛП (рис. 5).

За початковими параметрами комірка конфігурується так, щоб було обрано внутрішнє АЛП, а алгоритми розподілення цього АЛП між комірками рядка потрібно відпрацювати до етапу реконфігурації системи. У процесі проектування складніших схем включення спеціалізованих АЛП необхідно враховувати, що для збереження швидкості обробки всередині системи РОП ООС зі спеціалізацією блоки АЛП мають використовуватися монополярно між кожними періодами реконфігурації, що дасть змогу не очікувати готовності спеціалізованих АЛП, тим самим залишити комірки спеціалізованої системи незалежними одна від одної.

Для розв'язання задачі оптимального включення спеціальних операцій до загальної структури РОП ООС не можна вжити метод прямого вибору з набору варіантів системи, оскільки він передбачає велику часову витрату та вже з порівняно невеликими реконфігурованими системами стає незастосовним на практиці.



Процес знаходження оптимальних варіантів структури РОП ООС має такі етапи:

- визначення допустимої множини варіантів системи, які розрізняються за допустимими характеристиками та допустимими параметрами;
- вибір Парето-оптимальних варіантів системи з використанням сформульованих критеріїв якості;
- аналіз Парето-оптимальних варіантів системи для знаходження малої множини варіантів систем, що задовольняють критеріям якості.

На практиці знаходження найменшого параметра часу обробки даних на структурі РОП ООС  $T_{реш}$  обирають як мету завдання оптимізації за умови спеціалізації структури системи. У РОП ООС параметр  $T_{реш}$  є фундаментальним і визначає продуктивність системи загалом. Час оброблення масиву з  $N$ -даних на РОП ООС зі структурно-процедурною організацією обчислень визначатиметься виразом:

$$T_{реш} = \sum_{i=1}^F ((N + H_{\max}^i - 1) \cdot \Delta T_i + T_{рек}^i), \quad (3)$$

де  $H_{\max}^i$  – довжина критичного шляху в графі моделі обчислення;

$\Delta T_i$  – час виконання найдовшої операції операційної вершини графа моделі обчислення;

$T_{рек}^i$  – час реконфігурації РОП ООС для відбивання графа моделі обчислення;

$F$  – кількість підграфів, на які розбито граф моделі обчислення.

Як видно з (3), довжина критичного шляху у графі є вільним параметром, за яким можна здійснювати оптимізацію з фіксованими параметрами. Однак обчислення параметра  $H_{\max}^i$  безпосередньо призведе до розв'язання, що характеризуватиметься незадовільно тривалим часом роботи.

Все вищевикладене пов'язано з тим, що для знаходження спеціалізованих замін звичайних комірок РОП ООС необхідно послідовно зробити всі заміни операційних вершин графа, для яких можлива спеціалізація. Ось чому потрібно вводити такі критерії оптимальності системи, за допомогою яких можна було б оцінити оптимальність системи без комбінаторної множини замін в графі моделі обчислення алгоритму.

Оскільки  $H_{\max}^i$  фактично моделює швидкість проходження інформаційних потоків через граф моделі обчислення, то критерієм оптимальності обираємо функцію максимального потоку графа  $\Phi$ . За цією функцією можна роботи висновки про довжину критичного шляху спеціалізованого графа моделі обчислення, а також отримати числове значення цієї оцінки.

Другим критерієм оптимальності системи обирають функцію критичного шляху спеціалізованого графа моделі обчислення  $\Psi$ , одержаного через підставлення спеціалізованих комірок залежно від розглянутого варіанта системи. Цей параметр безпосередньо визначає продуктивність системи, як впливає з (3).

Значущість кожного з перелічених критеріїв відносно один одного визначають експериментально. Вона залежить від виду графа моделі обчислення, виду замін його інформаційних вершин, а також від способу відображення моделі обчислення на РОП ООС.

Спеціалізація структури РОП ООС є багатостадійним процесом, що складається з таких етапів:

- виділення в графі моделі обчислення підграфів, які відповідають операціям, що зазнали спеціалізації;
- призначення для ребер, що сполучають вершини одержаних підграфів, ваг, які змінюватимуться протягом процесу оптимізації; решті ребер призначають фіксовану вагу;
- формулювання законів розподілу ваг ребер підграфів для знаходження Парето-оптимальних варіантів розв'язання задачі оптимізації;
- вирішення задачі оптимізації та здобуття значень ваг ребер графа моделі обчислення;
- формування множини допустимих заміन комірок на основі ваг ребер графа моделі обчислення.

Закони розподілу ваг ребер спеціалізованих підграфів мають рівномірно покривати комбінаторну множину варіантів їх розподілення. Ваги можна розташувати за лінійним (4) або експоненціальним (5) законом:

$$\begin{cases} w = [x \mid x \leftarrow [0, S_{III}, \dots], x \in [0, 1]] \\ w_0(w) = N_c \cdot w \\ w_1(w) = N_c \cdot (1 - w_0) \end{cases}, \quad (4)$$

або

$$\begin{cases} w = [x \mid x \leftarrow [0, S_{III}, \dots], x \in [0, 1]] \\ w_0(w) = N_c \cdot \gamma_1 e^{-\gamma_2 w}, \gamma_i = const \\ w_1(w) = N_c \cdot (1 - w_0) \end{cases}, \quad (5)$$

де  $S_{III}$  – крок змінення ваги ребер;  $N_c$  – кількість спеціалізованих комірок.

Якщо відомо, що якась із ваг  $w_i$  домінує або заміна підграфа з цією вагою має перевагу, то закони розподілу ваги можна записати з урахуванням визначеної переваги.

Через те що кількість спеціалізованих комірок  $N_c$  обмежена, то це обмеження потрібно відобразити на математичну модель оптимізованої системи, що можна досягти шляхом установлення обмежень на сумарну вагу ребер спеціалізованих підграфів графа моделі обчислення, які мають відповідати:

$$\sum_{i=1}^{N_c} w_i = N_c \cdot w_6, \quad (6)$$

де  $w_6$  – базова вага ребра графа моделі обчислення.

Згідно з вимогами теорії розв'язання завдань оптимізації необхідно нормалізувати критерії оптимальності, тобто звести до одного діапазону:

$$\Phi_n(w) = \Phi(w) / \max_{w \in W_a}(\Phi(w))$$

$$\Psi_n(w) = \frac{1}{\Psi(w) \cdot \max_{w \in W_a} \left( \frac{1}{\Psi(w)} \right)} . \quad (7)$$

Варто помітити, що значення критичного шляху графа моделі обчислення має задовольняти обмеженню  $\Psi(w) > 0$ , що, своєю чергою, зумовлено методом нормалізації функції  $\Psi_n(w)$ . На практиці це обмеження завжди виконується, оскільки  $\Psi(w) = 0$  для графів, що складаються з однієї вершини, яка не має вхідних та вихідних ребер, тобто  $\forall G(V, E) \wedge E \neq \emptyset, |V| > 1 \wedge \exists e_{ij} \in E, i \neq j \Rightarrow \Psi > 0$ .

Завдання оптимізації для знаходження значень максимального потоку та критичного шляху графа моделі обчислення репрезентовано такими виразами:

$$\begin{cases} \max_{w \in W_a} (\lambda_1 \cdot \Phi_n(w) + \lambda_2 \cdot \Psi_n(w)) \\ \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \\ 0 < \lambda_1 < 1, \quad 0 < \lambda_2 < 1, \\ w_i \in W_a, i = 1, N_c \end{cases} , \quad (8)$$

де  $W_a$  – множина ваг ребер графа моделі обчислення.

Розв’язання задачі оптимізації (8) дає змогу однозначно виявити найкращий варіант спеціалізації РОП ООС.

**Третій розділ** присвячений розробленню методів оцінювання швидкодії за допомогою методів, запропонованих у другому розділі. Параметром ефективності для оцінювання швидкодії РОП є час лічби у циклах основного сигналу синхронізації. Для знаходження цього параметра у РОП ООС використовують результати розставлення і трасування, на підставі яких складають граф затримок, вершини якого відповідають задіяним коміркам. Метод урахування часу обробки ґрунтується на засадах роботи ООС, за якими відомо, що найдовший провідник комутаційної топології комірок визначає час оброблення даних ООС. Відповідно, за критичним шляхом графа затримок і визначають час обробки даних в ООС. Для оцінювання швидкодії ООС зі спеціалізацією використовують такий самий метод. Наприклад, для варіанта трасування, поданого на рис. 6 а, генерується граф затримок, що показано на рис. 6 б. Для порівняльної оцінки швидкодії РОП ООС запропоновано варіант архітектури процесора, побудованого на підставі засад машини фон Неймана. У зв’язку з особливостями створення функційної мови ФАОТ алгоритмічно легко реалізувати процес компіляції ПЗ із ФАОТ в асемблер архітектури SECD з такими самими типами даних, які підтримують і АЛП комірок ООС. Після «поциклової» симуляції команд генерується звіт про доцільність здійснення обчислень з урахуванням розмірностей матриці ООС. На рис. 7 показано час виконання обчислень на ООС різного розміру зі спеціалізацією та без неї, для графу моделі обчислення, поданого на рис. 8, без врахування часу реконфігурації.

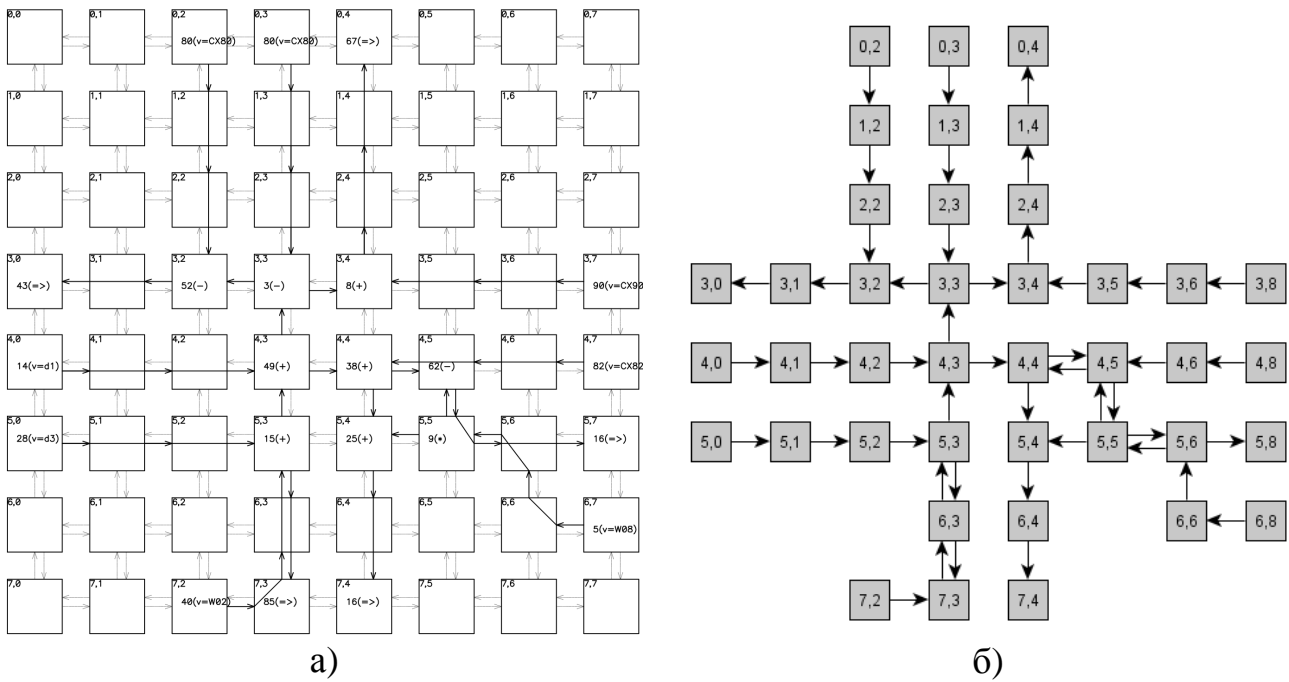


Рис. 6. Структури для аналізу швидкодії ООС: а – варіант трасування з'єднань ООС; б – граф затримок варіанта трасування з'єднань

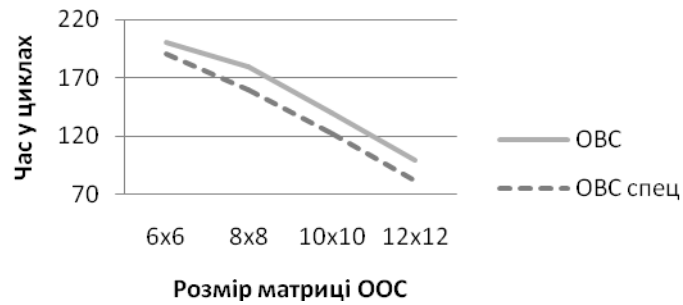


Рис. 7. Експериментальні залежності часу оброблення для різних варіантів ООС

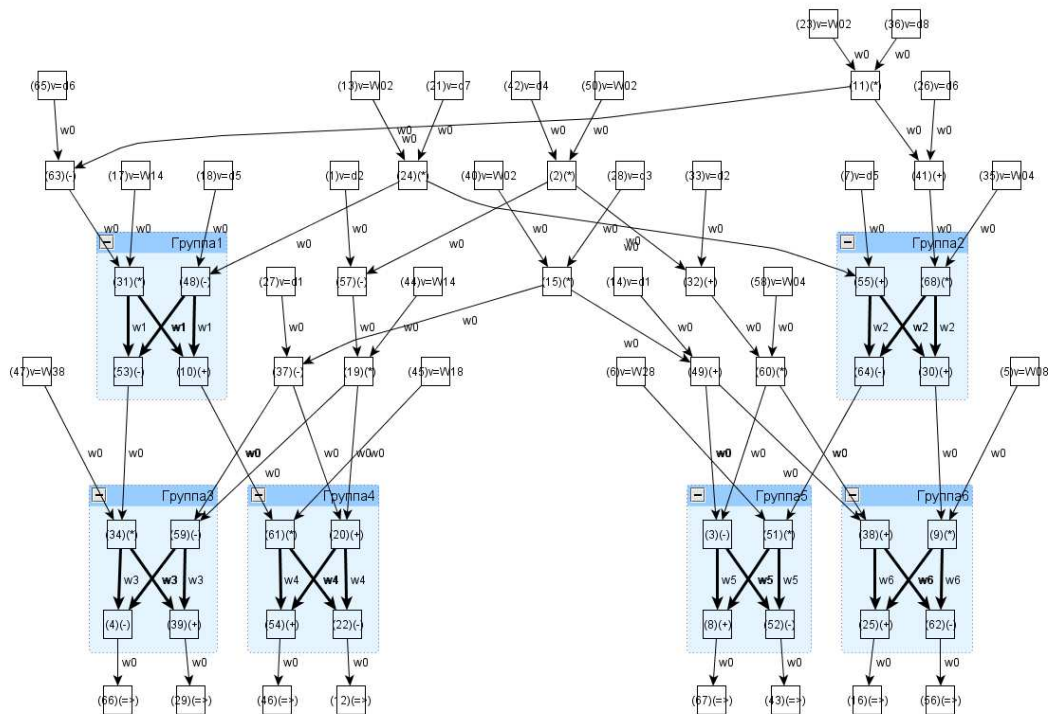


Рис. 8. Граф моделі обчислення та його оптимізовані комірки



Як встановлено з експериментальних залежностей, поданих на рис. 7, пропонується у другому розділі дисертації метод спеціалізації структури РОП ООС дає змогу підвищити швидкодію системи загалом до 11%.

У четвертому розділі на ґрунті розроблених у попередніх розділах методів реалізовано ПЗ для побудови обчислень на РОП ООС із матричною структурою. Наведено приклади обчислень, які відбуваються на кожному кроці підготовки обчислювальних алгоритмів до реалізації на РОП ООС.

Наведено задачу стосовно розпізнавання образів, на підставі якої показано приклади ПК для розв'язання цієї задачі у РОП ООС розробленою мовою програмування, абстрактно-синтаксичні дерева (АСД), які є внутрішніми структурами транслятора зазначеної мови, приклади перетворення АСД на графи моделі обчислення. Продемонстровано приклади та особливості роботи алгоритмів розбивання графів моделей обчислення на підграфи разом з описом проміжних варіантів обчислень та проходженням через усі інваріанти алгоритмів. Показано всі стадії алгоритмів трасування та розставляння комірок РОП ООС із наданням інформації про внутрішні структури та особливості роботи. Детально описаний приклад спеціалізації структури РОП ООС, сформульовані рекомендації щодо настроювання алгоритму спеціалізації. Показано залежності, на підставі яких обирають оптимальні варіанти структури РОП ООС.

Результати розв'язання задачі спеціалізації для одного з видів графа моделі обчислень (рис. 8), спроектованого на РОП ООС, подано на рис. 9, 10:

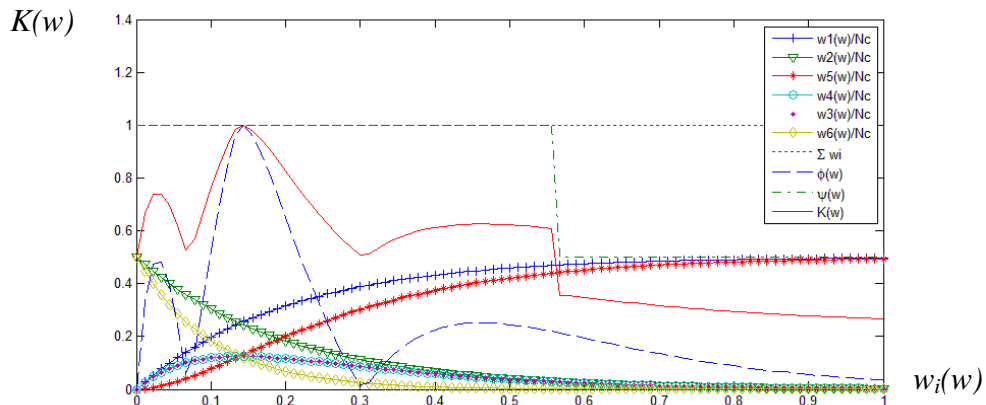


Рис. 9. Залежності  $K(w)$ ,  $\Phi_n(w)$ ,  $\Psi_n(w)$  та розподіл ваг  $w_i(w)$ , комбінація 1

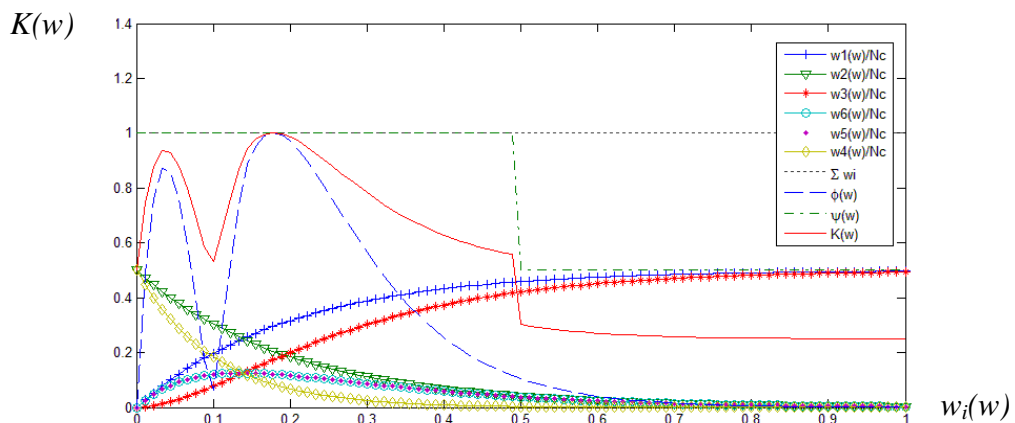


Рис. 10. Залежності  $K(w)$ ,  $\Phi_n(w)$ ,  $\Psi_n(w)$  та розподіл ваг  $w_i(w)$ , комбінація 2

За наведеними на рис. 9, 10 залежностями однозначно встановлюють оптимальний варіант спеціалізації системи РОП ООС.

Впровадження отриманих у роботі результатів дає змогу без доопрацювання реалізувати створену РОП ООС на різних варіантах апаратних засобів, спеціалізованих для вирішення конкретної задачі.

Результати дисертації впроваджено у науково-виробничому об'єднанні медичних технологій ЮЖ-УКРМЕДТЕХ (м. Одеса, Україна), у науково-виробничому ОКД «Елемент» (м. Одеса, Україна), у навчальний процесі в Одеському національному політехнічному університеті.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання: теоретично обґрунтовано та створено засади проектування програмних компонентів і методів спеціалізації РОП ООС, що дає змогу побудувати більш ефективну структурно-алгоритмічну організацію ООС і спеціалізованих ООС без зміни програмних компонентів, що існують.

1. Показано, що сучасні РОП ООС мають ряд суттєвих недоліків, головними з яких є невідповідності між АЛП комірок ООС і моделями обчислень, відсутність спеціалізованих комірок, що використовують можливості апаратних засобів, на яких реалізовано РОП ООС.
2. Запропоновано нову функційну мову ФАОТ, а також транслятор цієї мови, який дає змогу перетворення програми в граф моделі обчислення, тобто стандартного засобу опису програм для РОП ООС. Використанням транслятора мови ФАОТ, досягається автоматичне розпаралелювання ПЗ для РОП ООС та зменшення складності розробки, за рахунок введення більш простого засобу опису ПЗ. Функційність мови опису обчислень обумовлює заборону глобальних станів змінних на рівні синтаксису мови, що дає змогу використовувати більш прості методи розпаралелювання ПЗ ніж при введенні звичайних імперативних програм.
3. Розроблено комплексний метод розбивання графів моделей обчислень на підграфи для реалізації кадрів на РОП ООС, оснований на алгоритмах Керніган-Ліна і спектральної бісекції. Доведено, що зазначений метод ефективний та універсальний для будь-яких видів графів алгоритмів РОП ООС.
4. Показано, що заснування методу відображення моделей обчислення на РОП ООС за рахунок комбінування алгоритму імітації відпалення, алгоритму розміщення розбиттям та алгоритму трасування найкоротшого шляху Дейкстри, задовольняє потреби швидкодії стадії оброблення моделей обчислення і являється універсальними для довільних топологій і комунікаційних особливостей РОП ООС.
5. Використання методу спеціалізації структур РОП ООС, для задач обробки сигналів, дає змогу без змін програмних компонентів, що існують, підвищити швидкодію ООС до 11%. Такий метод дозволяє використати можливості блоків, спеціально спроектованих для реалізації моделей обчислень, а також оптимально включити ці блоки з урахуванням особливостей апаратних засобів, на яких реалізована система РОП ООС.

6. В рамках запропонованого методу, розроблено модель звичайної та спеціалізованої РОП ООС на основі графа затримки для оцінювання її продуктивності. Використовуючи цю модель, визначають швидкодію звичайної ООС, ООС за умови введення спеціалізації і типової архітектури фон-нейманівського типу, за допомогою чого можна оцінити ефективність спеціалізації ООС.

Результати експериментів стали тим ґрунтом, який дає змогу розв'язувати поставлені завдання та окреслити шляхи подальших перспективних досліджень:

- використання та впровадження результатів дослідження дисертаційної роботи під час модернізації системи оброблення медичних томографічних зображень загалом збільшило швидкодію підсистеми оброблення до 8%;
- результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес кафедри комп'ютерних систем ОНПУ.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

1. Биленко, А. А. Анализ построения вычислений на основе реконфигурируемых компьютерных систем [Текст] / А. А. Биленко, В. С. Ситников // Радіоелекторні та комп'ютерні системи: наук.-техн. сб. – Харків: Вид-во Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського "Харківського авіаційного інституту", 2010. – Вип. 7(48). – С. 212.
2. Биленко, А. А. Компьютерная система сжатия и восстановления многомерных сигналов на основе вейвлет-преобразования [Текст] / В. С. Ситников, А. О. Біленко // Наук. вісник Чернівецького ун-ту: наук.-техн. сб. – Чернівці: Вид-во Черн. нац. ун-ту ім. Ю. Федьковича, 2008. – Вип. 423. – С. 37-42.
3. Биленко, А. А. Событийно-ориентированная компонентная система для встроенных приложений [Текст] / А. А. Биленко, В. С. Ситников // Труды Одесского политехнического университета: научн.-техн. сб. – Одесса: Изд-во Одесского национального политехнического университета, 2009. – Вип. 72. – С. 129-133.
4. Біленко, А. О. Аналіз банків фільтрів при вейвлет-фільтрації [Текст] / В. С. Ситніков, А. О. Біленко, М. А. Кривой // Збірник наукових праць Одеського ордену Леніна Інституту сухопутних військ: научн.-техн. сб. – Одеса: Вид-во Одеського Інституту сухопутних військ, 2007. – Вип. 14. – С. 127-130.
5. Біленко, А. О. Класифікація вейвлет-функцій [Текст] / В. С. Ситніков, А. О. Біленко // Труды Одесского политехнического университета: научн.-техн. сб. – Одесса: Изд-во Одесского национального политехнического университета, 2008. – Вип. 1(29). – С. 168-171.

### *Наукові праці апробаційного характеру*

6. Биленко, А. А. Анализ построения вычислений на основе реконфигурируемых компьютерных систем [Текст] / А. А. Биленко, В. С. Ситников // Труды V межд.

- научн.-тех. конф. «гарантоспособные (надежные и безопасные) системы, сервисы и технологии»: сб. науч. тр. по материалам V межд. н.-техн. конф. «гарантоспособные системы, сервисы и технологии», 12-15 мая 2010р. – Кировоград, 2010: Реконфигурируемые вычисления и программируемые системы. – С. 14.
7. Биленко, А. А. Событийно-ориентированная компонентная система для встроенных приложений [Текст] / А. А. Биленко, В. С. Ситников // Труды десятой межд. н.-практ. конф. СИЭТ'2009: сб. науч. раб. по мат. межд. н.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии», 18–22 мая 2009 г. – Одесса, 2009: Компьют. сист. и сети. – С. 129.
  8. Біленко, А. А. Банки-фільтрів при вейвлет-фільтрації [Текст] / А. А. Біленко, В. С. Ситніков // Праці дев'ятої міжн. н.-практ. конф. СІЕТ'2008: зб. наук. пр. по матеріалам міжн. н.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та електронні технології», 19–23 березня 2008 г. – Одеса, 2008: Комп'ютерні системи та мережі. – С. 134.
  9. Біленко, А. А. Класифікація вейвлет-функцій [Текст] / А. А. Біленко, В. С. Ситніков // Зб. праць Одеського політех. ун-та: зб. науч. праць по мат. XV міжн. конф. з автомат. управління «Автоматика - 2008», 23-26 вересня 2008 р. – Одеса, 2008: Автоматизація. Програмне забезпечення. – С. 134.

## АНОТАЦІЯ

Біленко А. О. Методи підвищення швидкодії реконфігурованих обчислювальних систем за рахунок нової структурно-алгоритмічної організації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи і компоненти. – Одеський національний політехнічний університет, Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Одеса, 2012.

Дисертація присвячена актуальним питанням підвищення ефективності, оптимізації та застосування реконфігурованих комп'ютерних систем, орієнтованих на різні предметні сфери, зокрема, на розроблення нових моделей, методів проектування реконфігурованих комп'ютерних систем на базі однорідних обчислювальних систем. Пропоновані методи дають змогу суттєво спростити розроблення нових реконфігурованих систем, на базі однорідних обчислювальних систем.

В роботі створено функційну мову програмування для опису обчислень реконфігурованих систем; запропоновані методи автоматичного розбиття графа моделей обчислень на підграфи; розроблено методи розміщення і трасування графів моделей обчислень; опрацьовано метод на підставі вирішення завдання оптимізації, який дає змогу використати додаткові апаратні ресурси електронних пристроїв для спеціалізації структури реконфігурованої системи.

Результати дисертації впроваджено у науково-виробничому об'єднанні медичних технологій ЮЖ-УКРМЕДТЕХ (м. Одеса, Україна), у науково-

виробничому ОКБ «Елемент» (м. Одеса, Україна), у навчальний процес в Одеському національному політехнічному університеті.

**Ключові слова:** однорідні обчислювальні системи, архітектура обчислювальних систем, реконфігурація, спеціалізація.

## АННОТАЦИЯ

Биленко А. А. Методы повышения быстродействия реконфигурируемых вычислительных систем за счет новой структурно-алгоритмической организации. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты. – Одесский национальный политехнический университет, Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины, Одесса, 2012.

Диссертация посвящена актуальным вопросам повышения быстродействия и применения реконфигурируемых компьютерных систем, ориентированных на различные предметные области, в частности, разработке новых моделей и методов проектирования реконфигурируемых компьютерных систем на базе однородных вычислительных систем.

В работе впервые рассмотрена возможность построения специализированных однородных вычислительных систем для ускорения алгоритмов обработки сигналов. Разработанные методы позволяют существенно упростить проектирование специализированных реконфигурированных систем на основе однородных вычислительных систем без внесения существенных изменений в уже существующие.

Разработанный функциональный язык программирования для описания вычислений для реконфигурируемых систем позволяет существенно упростить процесс проектирования программного обеспечения для таких систем и повысить надежность описания вычислений путем отказа от ручного составления графов моделей вычислений.

Разработанные методы автоматического разбиения графа модели вычислений на подграфы позволяют с большой эффективностью производить их разбиение на подграфы с похожими характеристиками, а также убирать циклические зависимости между этими подграфами.

Разработанные методы расстановки и трассировки графов моделей вычислений позволяют автоматически реализовать вычисление любой сложности на основе структуры однородной вычислительной системы, что раньше происходило с участием специалиста по реконфигурируемым вычислениям или вовсе производилось вручную.

В работе разработан метод на основе решения задачи оптимизации, который позволяет использовать дополнительные аппаратные ресурсы электронных устройств для специализации структуры реконфигурируемой системы под решаемые алгоритмы. Данный метод позволяет задействовать дополнительные специализированные мощности прозрачным для программиста образом, что значительно ускоряет вычисления за счет аппаратной специализации, а также делает

возможным значительное упрощение процесса разработки программного обеспечения.

Разработан программный продукт, позволяющий проектировать вычисления для реконфигурируемых вычислительных систем и для их специализации.

Результаты диссертации внедрены в научно-производственном объединении медицинских технологий ЮЖ-УКРМЕДТЕХ (Украина, Одесса), в научно-производственном ОКБ «Элемент» (Украина, Одесса); учебном процессе Одесского национального политехнического университета.

**Ключевые слова:** однородные вычислительные системы, архитектура вычислительных систем, реконфигурация, специализация.

## ABSTRACT

Bilenko A. A. Methods of performance increase in reconfigurable computing systems by means of new algorithmic and structural organization.

Thesis for the candidate degree in technical sciences by specialty 05.13.05 – Computer systems and components. – Odessa National Polytechnic University, Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, Odessa, 2012.

The thesis is devoted to issues of performance optimization and application of reconfigurable computing systems. Computing system for signal processing applications based on specialized reconfigurable cell array is being reviewed. Proposed methods significantly facilitate the cost of new software development without application of essential changes in existing reconfigurable systems based on reconfigurable cell array.

The following system design steps were reviewed: Functional programming language designed for computation description; Automatic graph partitioning methods; Cells placement and netlist tracing methods; Optimization methods, allowing the use of additional hardware resources of electronic devices to integrate specialized computing structures in reconfigurable system.

Results of the thesis were introduced in the research and production programs of JSC YUZH-UKRMEDTECH (Odessa, Ukraine) and JSC "Element" (Odessa, Ukraine), in the training and research programs at Odessa National Polytechnic University.

**Keywords:** reconfigurable cell array, computer architecture, reconfiguration, specialization.