

*КЛИМЕНКО І.А.,
ЖАБІНА В.В.,
ЗВОЛИНСЬКИЙ В.В.*

МОДЕЛЮВАННЯ ВІДМОВОСТІЙКОЇ ПОТОКОВОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ПЛІС

Розглянуто можливу реалізацію та виконано аналіз характеристик відмовостійкої потокової обчислювальної системи, що реалізована за технологією система-на-кристалі. Показано, що застосування методу автоматичної реконфігурації дозволяє виконувати відновлення системи при відмові обчислювальних модулів без суттєвого збільшення часу обчислень.

The possible implementation was considered and the analysis of fault tolerant characteristics was performed for the stream computing system implemented by the technology system-on-chip. It is shown that application of the method of automatic reconfiguration allows to recovery the system by the failure of computational modules without significantly increase of the computation time.

Вступ

Для систем управління в реальному часі важливими характеристиками є швидкість, надійність і достовірність одержаних результатів. Можливим підходом до прискорення обробки інформації є розпаралелювання обчислювальних процесів на різних рівнях. У системах реального часу виникає необхідність реалізації алгоритмів із дрібнозернистою структурою. Ефективним підходом до прискорення реалізації таких алгоритмів є використання динамічних засобів розподілу операцій між обчислювальними вузлами, заснованих на потоковій моделі обчислень [1]. Відповідно до цієї моделі під час підготовки завдання немає необхідності в прямій формі описувати процедури синхронізації процесів і розподілу пам'яті. Програмування задач не потребує врахування числа обчислювальних модулів у системі та опису послідовності обчислень. Програми при цьому менш громіздкі і більш прості в налагодженні. Усе це створює передумови для прискорення обробки інформації.

Ефективним підходом до проблеми підвищення надійності систем та достовірності результатів обробки інформації є забезпечення відмовостійкості систем шляхом введення різного роду надмірності (апаратної, інформаційної та часової). Для систем реального часу ефективними є програмно-апаратні методи динамічної реконфігурації систем при відмові обладнання [1].

Вдосконалювання елементної бази завжди було одним з ефективних методів підвищення продуктивності обчислювальних систем. Тех-

нологія систем-на-кристалі, в першу чергу, сприяє значному підвищенню продуктивності, зменшенню вартості цифрових пристроїв, виконаних на одному кристалі, швидкості розробки та гнучкості проектування.

Таким чином, задача підвищення продуктивності і забезпечення відмовостійкості обчислювальних поточкових систем, в яких забезпечується динамічний розподіл завдань між обчислювальними вузлами і динамічна реконфігурація під час відмов обладнання є актуальною. Для досягнення цього необхідна розробка нових методів виконання операцій і організації систем з використанням сучасної елементної бази – програмованих логічних інтегральних схем.

Постановка задачі

У роботі [2] запропоновані методи автоматичної реконфігурації обчислювальних систем, що управляються потоком даних, з різною архітектурою середовищ розподілу команд. Показана можливість реконфігурації системи на апаратному рівні без додаткових витрат команд. В поточкових системах підготування команд здійснюється без врахування кількості обчислювальних модулів (ОМ). Це створює передумови у випадку відмови ОМ продовжувати обчислення доки в системі не залишиться хоча б один дієздатний ОМ. Для зберігання команди, що може бути загублена під час відмови ОМ використовується додатковий регістр команд, де протягом всього циклу виконання зберігається копія команди. У випадку відмови ОМ команда повторно виконується у іншому праце-

здатному ОМ. У формат кожної команди запропоновано [2, 3] ввести поле максимального часу очікування виконання даної команди. Визначений час виконання команди завантажується в блок таймеру, який запускається завантаженням слова команди у ОМ. Це дозволяє зменшити час затримки під час реконфігурації системи за рахунок індивідуального налаштування блоків таймерів для кожної операції.

У даній роботі авторами поставлена задача проаналізувати функціональні характеристики запропонованої в [2, 3] обчислювальної системи за реалізації її на ПЛІС, проаналізувати час виконання команд та ефективність засобів автоматичної реконфігурації.

Обґрунтування вибору елементної бази та засобів для створення проекту

Для виконання досліджень використовувалась ПЛІС *EP2C35F672C6N* сімейства *Cyclone II* фірми *Altera*. Мікросхема займає значне місце на ринку мікроелектроніки, доступна широкому колу розробників, маючи невисоку вартість разом з високою логічною ємністю та продуктивністю [4]. В табл. 1 зведені основні характеристики мікросхеми.

Табл. 1. Ресурси ПЛІС *Cyclone II EP2C35F672C6N*

Логічна ємність та швидкодія	Кількість логічних елементів	33216
	Обсяг вбудованого ОЗП (Кбіт)	484
	Кількість блоків вбудованого ОЗП М4К (4 Кбіт + 512 бітів парності)	105
Особливості	Кількість вбудованих помножувачів 18 x 18 бітів / 9 x 9 бітів	35/70
	Регістри вводу-виводу в елементах вводу-виводу	+
	Блоки двохпортового ОЗП	+
	Кількість глобальних і локальних ланцюгів тактування	16
Підсистема вводу-виводу	Підтримувані рівні напруги вводу-виводу (В)	1.5, 1.8, 2.5, 3.3
Підтримка інтерфейсів зовнішньої пам'яті	Підтримувані інтерфейси зовнішньої пам'яті	QDRII, DDR2, DDR, SDR

Для проектування, розробки та налагоджування розроблюваних пристроїв на ПЛІС, застосовувалась система автоматизації проектування (САПР) *Qwartus II*, яку компанія *Altera*

поставляє з усіма своїми продуктами. САПР *Qwartus II*, забезпечує повний цикл проектування та розробки електронних пристроїв на кристалах ПЛІС, включаючи розробку проекту, синтез та моделювання, трасування, завантаження в кристал, тестування та налагоджування, в тому числі внутрісистемне. Проект синтезований з використанням мови опису апаратури *VHDL*.

Визначення часу моделювання основних операцій

Структура та алгоритми роботи реалізованої на ПЛІС системи (рис. 1) відповідають обчислювальній системі, що запропонована в роботі [3].

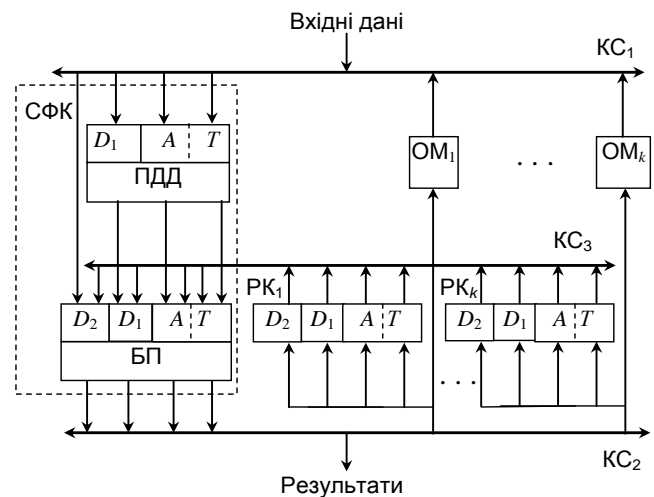


Рис. 1. Організація системи: СФК – схема формування команд, ПДД – пам'ять з довільним доступом, БП – буферна пам'ять, КС – комутаційне середовище, РК – регістр команд, D_1 і D_2 – поля даних, A – поле актора, T – поле таймера

Під час проведення тестового моделювання експериментально визначено період часу, протягом якого всі управляючі сигнали встигають надійти до входів відповідних блоків обчислювальної системи в очікуванні наступного перепаду синхросигнала. Цей час прийнятий в якості тривалості синхросигналу і дорівнює 20 нс. Також експериментально визначені тривалості значень часу моделювання основних операцій, які представлені в табл. 2.

Значення максимального часу виконання операцій необхідні для контролю виконання команди в ОМ. Одержані значення заносяться у таймер для кожного ОМ перед початком вико-

нання команди. Якщо операція не виконана за визначений час (спрацював таймер), то вважається, що ОМ відмовив.

Табл. 2. Час виконання основних операцій в системі на ПЛІС

Операція	Час виконання, нс
Додавання	6
Віднімання	6
Множення	7
Ділення	12
Зведення в квадрат	7
Вилучення кореня	8
Порівняння $a = b$	6
Порівняння $a > b$	6
Порівняння $a < b$	6
Порівняння $a \geq b$	6
Порівняння $a \leq b$	6
Вентиль $a \text{ if } b$	6
Вентиль $a \text{ if not } b$	6
2-розмножувач	3
N -розмножувач	$N \times 2 + 2$
Повторювач a	6
Повторювач b	6

Оцінка задіяних ресурсів ПЛІС

Принциповими обмеженнями побудови мультипроцесорних систем на ПЛІС є кількість логічних ресурсів, зокрема загальна кількість логічних вентилів, об'єм убудованої пам'яті, внутрішні канали передачі даних та виводи мікросхеми [5]. В цьому зв'язку в роботі оцінена максимальна обчислювальна потужність розробленої системи, яку дозволить реалізувати використання одного кристалу ПЛІС заданого класу.

За результатами моделювання роботи обчислювальної системи отримані наступні значення задіяних ресурсів мікросхеми для різної кількості ОМ (табл. 3). Врахувавши фактичні ресурси мікросхеми *Cyclone II EP2K35F672C6N* (табл. 1), визначено, що максимальна кількість ОМ дорівнює одинадцяти. В табл. 3 показані дані про сумарні задіяні ресурси мікросхеми під час моделювання обчислювальної системи з різною кількістю обчислювальних модулів, тобто враховані також середовище формування і розподілу команд та пам'ять.

Табл. 3. Оцінка задіяних ресурсів ПЛІС

Кількість АОМ	Логічні елементи	Біти пам'яті	Вбудовані помножувачі 9 x 9 бітів
1	2871	176896	6
2	5468	176896	12
3	8015	176896	18
11	29224	176896	66

Дослідження характеристик системи без відмов устаткування

В якості досліджуваних критеріїв оберемо коефіцієнт прискорення обчислень та коефіцієнт ефективності використання різної кількості ОМ, вважаючи, що їх максимальна кількість дорівнює одинадцяти. Обчислення виконуються за наступними формулами:

$$K_{\Pi} = \frac{T_1}{T_P}, K_E = \frac{K_{\Pi}}{P},$$

де: T_1 – час розв'язування задачі з одним ОМ; T_P – час розв'язування задачі в з P ОМ; K_{Π} – коефіцієнт прискорення; K_E – коефіцієнт ефективності; P – кількість ОМ.

Задача 1 полягає в обчисленні функції, що має наступний вигляд:

$$F = \frac{(y^2 + b \cdot y + 2 \cdot a \cdot b + 4) \cdot ((a^2 + b^2 + c^2 + d^2) \cdot a \cdot b)}{a - b - c \cdot a + 12 \cdot \sqrt{b^2 + a^2}}$$

Граф задачі на модифікованій графічній мові Деніса [1] представлений на рис. 2.

З результатів моделювання (табл. 4) видно, що для задачі, яка розглядається, немає необхідності використовувати більш трьох ОМ. Збільшення кількості ОМ не дозволяє зменшити час обчислень, але впливає на надійність відмовостійкої обчислювальної системи, що є основною метою даного дослідження. В системі обчислення можуть продовжуватися поки існує хоча б один дієздатний ОМ. Таку можливість забезпечують засоби автоматичної реконфігурації системи під час відмови ОМ.

Табл. 4. Результати моделювання системи на ПЛІС

Кількість АОМ	Час розв'язування задачі, мкс	Коефіцієнт прискорення	Коефіцієнт ефективності
1	9.45	1	1
2	7.91	1.1947	0.5973
3	7.83	1.2069	0.4023
4	7.83	1.2069	0.3017
5	7.83	1.2069	0.2414
6	7.83	1.2069	0.2011
7	7.83	1.2069	0.1724
8	7.83	1.2069	0.1509
9	7.83	1.2069	0.1341
10	7.83	1.2069	0.1207
11	7.83	1.2069	0.1097

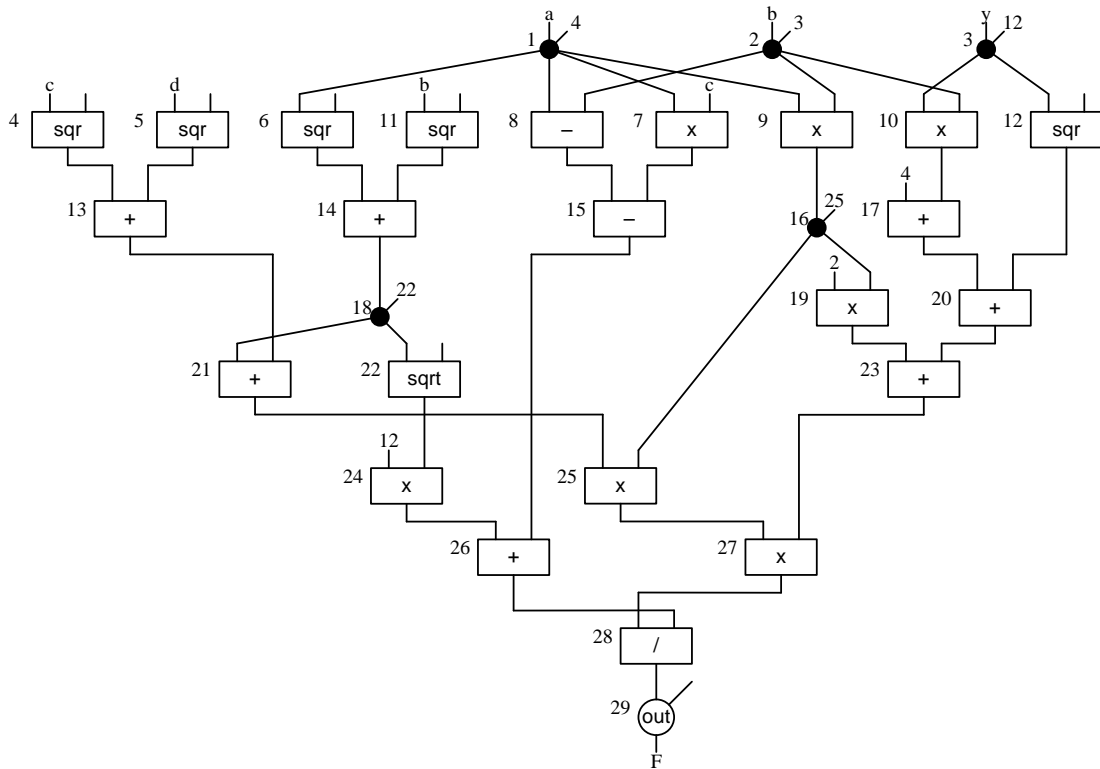


Рис. 2. Граф задачі 1

Моделювання та дослідження характеристик системи під час відмови обчислювальних модулів

В процесі обчислень готовий до виконання команди ОМ формує сигнал готовності. Чергова команда передається для виконання в один з готових для цього ОМ. Під час функціонування обчислювальної системи можуть виникнути збої в роботі одного або декількох ОМ. Збої можуть виникнути до початку виконання команди (не завершено процес пересилання команди в ОМ) або після того, як ОМ почав виконувати команду [4].

Під час досліджень виконано моделювання обох випадків для ряду задач різної складності, в тому числі, для задачі 1 (рис.2) та задачі 2 (рис.3), яка містить цикли.

В якості досліджуваного параметру розглядається час виконання програми з урахуванням часу реконфігурації системи під час відмови визначеної кількості ОМ.

Розглянемо випадок 1, коли збої в роботі ОМ виникають в процесі пересилання команди в ОМ. Результати зведені у табл. 5 і табл. 6.

З результатів моделювання видно, що середня затримка часу розв'язування задачі під час відмови ОМ в даному випадку досить мала, наприклад, 0 мкс за відмови до чотирьох ОМ.

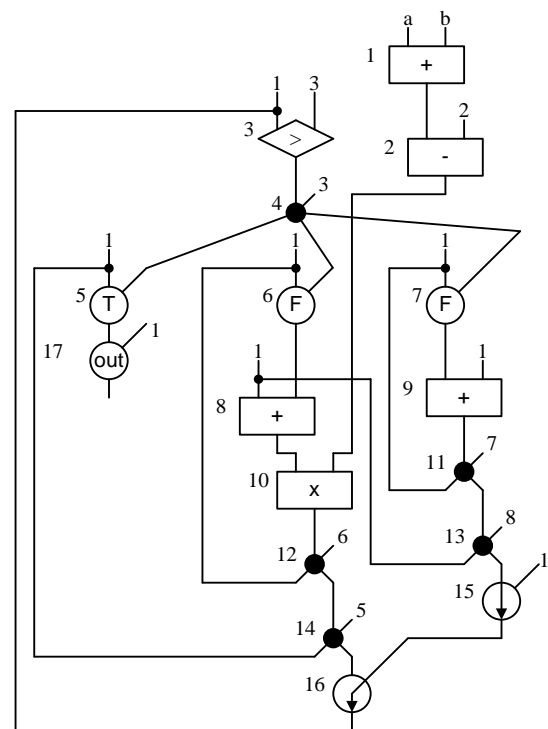


Рис. 3. Граф задачі 2

Такі значення пояснюються тим, що час реконфігурації системи менше, ніж час формування наступної команди, тому затримка непомітна. За відмови п'яти і більше ОМ затримка збільшується, бо збільшується час реконфігурації, особливо коли в системі залишається один працюючий ОМ.

Розглянемо випадок 2, коли збої виникають після того, як ОМ почав виконувати команду. Результати зведені у табл. 7 і табл. 8.

Середня затримка часу розв'язування задачі під час відмови ОМ зростає з кількістю ОМ, що відмовили. Це пояснюється тим, що має пройти певний час, на протязі якого буде визначена ві-

дмова ОМ, а цей час залежить від максимального часу виконання операції, який визначається таймером для кожної команди. Крім цього, час обчислень залежить від стану керуючих автоматів в момент відмови ОМ, тому затримка обчислень в табл. 8 зростає нерівномірно.

Табл. 5. Час розв'язування задачі 1 (випадок 1), мкс

Кількість ОМ	Кількість ОМ, що відмовили (починаючи з 1-го)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	7.83	7.83	7.83	7.83	7.83	7.83	7.83	7.83	7.85	10.21

Табл. 6. Час розв'язування задачі 2 (випадок 1), мкс

Кількість ОМ	Кількість ОМ, що відмовили (починаючи з 1-го)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12.15	12.15	12.15	12.15	12.19	12.33	12.33	12.33	12.45	14.25

Табл. 7. Час розв'язування задачі 1 (випадок 2), мкс

Кількість ОМ	Кількість ОМ, що відмовили (починаючи з 1-го)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	7.95	7.91	7.95	8.07	8.03	8.05	8.11	8.15	8.27	10.37

Табл. 8. Час розв'язування задачі 2 (випадок 2), мкс

Кількість ОМ	Кількість ОМ, що відмовили (починаючи з 1-го)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12.27	12.23	12.49	12.49	12.59	12.57	12.67	12.59	13.01	14.83

Висновки

В роботі виконано моделювання потокової відмовостійкої обчислювальної системи на ПЛІС *EP2C35F672C6N* сімейства *Cyclone II* фірми *Altera*, засобами САПР *Quartus II*.

Показано, що витрати часу на реконфігурацію системи під час відмови ОМ є незначними щодо загального часу виконання заданих обчислень. Це пояснюється тим, що відновлення системи за відмови ОМ реалізується на апаратному рівні без витрати додаткових команд. Реконфігурація системи в основному зводиться до відключення ОМ, що відмовив, тобто не потребує великих витрат часу. За наявності однотипних ОМ такий підхід дає можливість продовжувати обчислення доки в системі не залишиться хоча б один дієздатний модуль. Це підвищує вірогідність результатів обчислень і за-

безпечує умови для підвищення надійності системи в цілому.

Під час побудови систем може бути використаний базовий принцип побудови відмовостійких систем – принцип високонадійного ядра, яке контролює іншу апаратуру [6]. В якості захищеного ядра може виступати середовище формування команд. Даний компонент системи реалізований на основі запам'ятовуючих пристроїв, для яких добре розроблені апаратні методи підвищення надійності [7].

Таким чином, для реалізації алгоритмів з дрібнозернистою структурою можуть бути ефективно використані потокові обчислювані системи на ПЛІС, які забезпечують автоматичне розподілення операцій між обчислюваними модулями і автоматичну реконфігурацію системи в разі відмови обладнання.

Перелік літератури

1. Жабин В.И. Архитектура вычислительных систем реального времени / В.И.Жабин. – К.: ВЕК+, 2003. – 176 с.
2. Клименко И.А. Обеспечение отказоустойчивости потоковых систем на одностипных вычислительных модулях / И.А.Клименко, В.В.Жабина // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. – К.: Видавництво «ВЕСК+», 2009. – №51. – С. 166 – 171.
3. Пат. № 59112 Україна, МПК G06F 15/16 (2006.01). Обчислювальний пристрій / І.А. Клименко, В.В. Жабина; Заявник і патентовласник: Національний авіаційний університет, Київ. – Заявлений 06.08.2010. – Опубл. 10.05.2011. – Бюл. №9.
4. Cyclone II Device Handbook [Електронний ресурс]. – Altera Corporation, 2008. – Режим доступу: <http://www.altera.com/devices/fpga/cyclone2/cy2-index.jsp>.
5. Клименко І.А. Тенденції застосування сучасної елементної бази для побудови високопродуктивних обчислювальних систем / І.А. Клименко // Проблеми інформатизації та управління: Зб.наук.пр.– К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010.– Вип.1(29). – С 90 – 103.
6. Авиженис А. Отказоустойчивость – свойство, обеспечивающее постоянную работоспособность цифровых систем / А. Авиженис // ТИИЭР (пер. с англ.). – 1978. – Т. 66, №10. – С. 5 – 25.
7. Огнев И.В. Надежность запоминающих устройств / И.В. Огнев, К.Ф. Сарычев. – М.: Радио и связь, 1988. – 223 с.