

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Обрізана Володимира Ігоровича «Мультиверсний паралельний синтез цифрових структур на основі SystemC специфікації», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Створення хмарних сервісів проектування апаратних і програмних додатків, інтегрованих в поняття комп'ютинг, дозволяє істотно зменшити час вирішення задач проектування, тестування і верифікації цифрових систем на кристалах за рахунок використання обчислювальних потужностей і сховищ даних через мережу Internet. Використання хмарних ресурсів пов'язано зі зменшенням часу проектування обчислювальних архітектур та підвищеннем якості цифрових виробів, що узгоджується з сучасними пріоритетними напрямами розвитку комп'ютерних технологій та є цілком актуальним – створення цифрових систем на кристалах грає ключову роль для розвитку комп'ютерних технологій, що використовуються в усіх сферах життя та формують кібернетичну екосистему: розподілені центри великих даних, Internet of Things, Internet of Everything, Cyber Physical Systems, Cloud-Mobile Computing, Service Computing.

Тема дисертаційної роботи пов'язана з технологією хмарних сервісів по розробці цифрових систем на кристалах системного рівня, що дозволяє створювати виконувані специфікації – опис проекту на функціональному рівні, який можна верифікувати у віддаленому online-режимі. При цьому компонентами створення деякої цифрової системи виступають вже сервіси, а не функціональні елементи. Така заміна дає суттєвий виграваш у часі проектування, що визначається швидкодією процедур верифікації та тестування, за рахунок варіювання параметрами системного, RT і вентильного рівнів, домагаючись кращих характеристик реалізації цифрового виробу на кристалі.

Науково-практична задача дослідження – мультиверсне проектування архітектури цифрового виробу на основі заданої специфікації в середовищі SystemC (C++) і автоматичного вибору синтезованих функціональних структур з метою істотного зменшення часу створення проекту і підвищення виходу придатної продукції за рахунок паралельного синтезу та верифікації архітектурних рішень системного рівня відповідно до запропонованої метрики.

Сутність ринково-орієнтованого науково-технічного дослідження полягає в мультиверсному проектуванні архітектури цифрового виробу на основі заданої специфікації в середовищі SystemC (C++) і автоматичному виборі синтезованих функціональних структур з метою істотного зменшення часу



створення проекту і підвищенні виходу придатної продукції за рахунок паралельного синтезу і верифікації архітектурних рішень системного рівня відповідно до запропонованої метрики. *Основна інноваційна ідея* – паралельний автоматичний синтез квазіоптимальної архітектури відповідно до запропонованої специфікації і метрики, регулюючої підбір синтезованих функціональних структур.

Автором поставлено та вирішено такі задачі: 1) Огляд існуючих моделей, методів, алгоритмів і програмних засобів створення цифрових систем на кристалах. 2) Розробка структур даних для опису функціональних примітивів системного рівня, орієнтованих на використання семантичних і синтаксичних конструкцій мови C ++ і SystemC з метою забезпечення паралельного синтезу і верифікації архітектурних рішень. 3) Розробка методу синтезу інтерфейсних структур і протоколів виконання транзакцій RT-рівня на основі аналізу специфікації SoC-архітектури системного рівня, яка використовує стандартну шину Wishbone обміну даними між функціональними модулями. 4) Розробка методу синтезу RTL-моделей функціональностей шляхом перетворення C++ і SystemC-описів цифрових блоків системного рівня в алгоритми і структури даних автоматної моделі Мура, що задана синтезованою підмножиною мовних конструкцій VHDL. 5) Розробка методу мультиверсного синтезу керуючих і операційних автоматів, орієнтованих на архітектурні рішення в метриці, що мінімізує час виконання функціональності за рахунок розпаралелювання операцій при обмеженні на апаратні витрати. 6) Програмна реалізація моделей і методів мультиверсної розробки операційних пристройів в рамках інтегрованої системи проектування функціональних і архітектурних рішень SoC на основі використання продуктів верифікації та синтезу компаній Aldec і Xilinx.

Результати дисертації отримано відповідно до планів держбюджетних НДР і господарських договорів, виконуваних на кафедрі АПОТ Харківського національного університету радіоелектроніки в період з 2011 року, в тому числі: 1) Договір про дружбу і співробітництво між ХНУРЕ та корпорацією «Aldec Inc.» (USA) № 04 від 01.11.2011; 2) Держбюджетна фундаментальна НДР «Теорія й проектування енергозберігаючих цифрових обчислювальних систем на кристалах, що моделюють і підсилюють функціональні можливості людини», № 232 (2009-2011), № ДР 0109U001646; 3) Держбюджетна фундаментальна НДР «Мультипроцесорна система пошуку, розпізнавання та прийняття рішень для інформаційної комп'ютерної екосистеми», № 269 (2011-2013), № ДР 0111U002956; 4) Держбюджетна фундаментальна НДР №268 «Персональний віртуальний кіберкомп'ютер та інфраструктура аналізу кіберпростору» 01.01.2012-31.12.2014, № ДР 0112U000209; 5) Держбюджетна науково-дослідна фундаментальна робота №297 "Кіберфізична система «Розумне хмарне управління транспортом» (Cyber Physical System – Smart Cloud

Traffic Control)" 01.01.2015-31.12.2017, № 0115U-000712; 6) Проект 530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design (MastMEMS)» сумісно з університетом «Львівська політехніка», Київським національним університетом, Технічним університетом м. Лодзь (Польща), Ліонським університетом (Франція), Технічним університетом м. Ільменау (Німеччина), Університетом м. Павія (Італія) на 2012 – 2016 pp.; 7) Educating the Next generation experts in Cyber Security: the new EU-recognized Master's program (ENGENSEC) 544455-TEMPUS-1-2013-1-SE-TEMPUS-JPCR (01 Dec 2013 - 30 Nov 2016).

Характеристика основних розділів роботи:

Вступна частина містить обґрутування актуальності розв'язуваних задач, визначення мети, об'єкта, предмета і задач дослідження; наукову новизну і практичну значущість результатів дослідження, відомості про публікації та апробацію отриманих результатів.

Перший розділ присвячено розгляду розвитку моделей, методів, алгоритмів і програмних засобів створення цифрових систем на кристалах в часі і просторі, приділено увагу ретроспективі автоматизації проектування електроніки, огляду високорівневих мов проектування, засобам високорівневого синтезу. Визначено вузькі місця і переваги найцікавіших моделей і методів, опублікованих в спеціальній літературі: матеріали конференцій і журналі.

У другому розділі представлені методи системного і архітектурного синтезу компонентів цифрових систем на кристалах і інтерфейсних блоків, програмно-апаратної декомпозиції. У циклі проектування SoC важливим є системний підхід, який полягає в: чіткої організації інформаційних потоків, повній відповідності міжнародним промисловим стандартам IEEE, ISO та інших профільних організацій. Використання стандартів IEEE 1500, 1149 необхідно для успішної інтеграції з програмами продуктами моделювання, верифікації, логічного синтезу, трасування і розміщення. Розроблено структури даних і метод синтезу інтерфейсних структур і протоколів виконання транзакцій RT-рівня на основі аналізу специфікації SoC-архітектури системного рівня, яка використовує стандартну шину Wishbone обміну даними між функціональними модулями. Розроблено структури даних і метод синтезу RTL-моделей функціональностей шляхом перетворення C++ і SystemC-описів цифрових блоків системного рівня в алгоритми і структури даних автоматної моделі Мура, що задана синтезованою підмножиною мовних конструкцій VHDL. Створено інфраструктуру проектування і верифікації компонентів цифрових систем на кристалах з метою перевірки алгоритмів перетворення специфікації з системного рівня на рівень RTL-опису, яка дає можливість істотно зменшити час виконання всіх процесів проектування, тестування і верифікації. Представлені результати синтезу типових структур мовних конс-

трукцій в моделі RT-рівня і подальша їх оцінка з позиції швидкодії та апаратних витрат, які використовуються як бібліотечні описи для вибору оптимальних рішень в процесі створення обчислювальних пристройів. Здійснено тестування і верифікація конструктивних рішень примітивів, використовуваних для проектування цифрових систем на кристалах на основі промислових систем моделювання Aldec Active-HDL, Riviera, Xilinx Web Pack.

У третьому розділі розглянуті та вирішенні питання створення квазіоптимальних синтезованих моделей функціональних модулів в формі векторних і облікових контейнерів і їх імплементація в RTL-код, що використовуються далі при синтезі функціонально-складних IP-core цифрових систем на кристалах, а саме: розроблено і апробовано структури даних для опису функціональних примітивів системного рівня, орієнтованих на використання семантичних і синтаксичних конструкцій мови C++ і SystemC з метою забезпечення паралельного синтезу і верифікації архітектурних рішень; розроблено і протестовано програмні модулі, що реалізують векторні і спискові моделі опису функціональних примітивів, а також інфраструктура для реалізації методів мультиверсної розробки операційних пристройів в рамках інтегрованої системи проектування функціональних і архітектурних рішень SoC на основі використання продуктів верифікації та синтезу компаній Aldec і Xilinx; проведено верифікацію програмно-структурних рішень, що виникають в процесі синтезу функціональних примітивів на основі використання тестових послідовностей, взятих з відкритих бібліотек ISCAS-89, opencores.com.

Четвертий розділ включає опис програмно-апаратної реалізації моделей, методів і структур даних для проектування цифрових систем на кристалах, яке включає процедури створення специфікації, синтезу, тестування, моделювання та верифікації на основі запропонованої інфраструктури, що містить промислові засоби компаній Aldec і Xilinx. Розглянуті питання тестування програмних продуктів на реальних цифрових проектах створення IP-Core як примітивів для реалізації цифрових систем на кристалах. Вирішенні наступні завдання: розроблено і описано метод мультиверсного синтезу керуючих і операційних автоматів в заданій інфраструктурі проектування, орієнтованих на архітектурні рішення в метриці, що мінімізує час виконання функціональності за рахунок розпаралелювання операцій при обмеженні на апаратні витрати; виконана програмна реалізація моделей і методів мультиверсної розробки операційних пристройів в рамках інтегрованої системи проектування функціональних і архітектурних рішень SoC на основі використання продуктів верифікації та синтезу компаній Aldec і Xilinx; здійснено тестування і верифікація програмних модулів інфраструктури проектування цифрових систем на кристалах, а також визначення ефективності запропонованих моделей, методів і структур даних при створенні реальних компонентів цифрових виробів.

Розроблена методика проведення діагностичного експерименту при верифікації HDL-коду дозволила автоматично застосовувати різні алгоритми пошуку дефектів залежно від форми специфікації та стилю написання HDL-моделі. Запропонований метод мультиверсного синтезу структури цифрового виробу на основі заданої специфікації в середовищі SystemC (C++) і автоматичному підборі функціональних компонентів за рахунок паралельного синтезу і верифікації архітектурних рішень системного рівня відповідно до запропонованої метрики істотно зменшує час проектування обчислювальних архітектур і підвищує якість цифрових виробів. Розроблена на основі результатів дослідження методика проведення діагностичного експерименту застосовується на фірмі ООО Aldec-KTC при автоматизованому проектуванні цифрових пристрій з використанням САПР Active-HDL і системи імітаційного моделювання Riviera™ компанії Aldec Inc. (USA), що дозволило на 20-30% відсотків скоротити час на пошук помилок проектування.

Результати дисертаційної роботи у вигляді моделей, методів, методик та процедур впроваджено у науково-виробничу діяльність компанії ALDEC-KTC (довідка від 15.04.2016) та у навчальному процесі ХНУРЕ (довідка від 12.05.2016).

Практична реалізація полягає в розробці локальних і серверних програм, розміщених на хмарних сервісах Amazon Web Services. Система виконана за мікросервісною архітектурою, яка має властивості масштабованості, надійності, можливість розробляти та оновлювати модулі системи незалежно один від одного. Клієнтський додаток реалізовано на мові C++. За даними експерименту оцінювалися такі характеристики: часові витрати на проектування, швидкодія, енергоспоживання, площа на кристалі. Було вибрано три найпоширеніші реалізації: послідовна, паралельна, конвеєрна. В результаті експерименту показано, що в разі адитивної оцінки автоматичний метод краще в 1,3 рази. При мультипликативній оцінці автоматичний метод краще в 133,2 рази. В роботі показано, що значення ручного методу практично наближаються до нуля, в той час як в автоматичному методі значення наближаються до 1. Це доводить, що запропонований дисертантом мультиверсний метод дійсно ефективніше.

Висновок

Наукова новизна роботи визначається такими пунктами:

1. Вперше запропоновано метод синтезу інтерфейсних структур і протоколів виконання транзакцій RT-рівня на основі аналізу специфікації SoC-архітектури системного рівня, який характеризується використанням двобічної стандартної шини Wishbone обміну даними між функціональними моду-

лями, що дозволяє здійснювати мультиверсне створення компонентів цифрових систем на кристалах.

2. Вперше запропоновано метод синтезу RTL-моделей функціональності, який характеризується однозначним перетворенням C++ і SystemC описів цифрових блоків системного рівня в алгоритми і структури даних автоматної моделі Мура, заданої синтезованою підмножиною мовних конструкцій VHDL, що дає можливість істотно зменшити час виконання процесів проектування, тестування і верифікації.

3. Удосконалено структури даних для опису функціональних примітивів системного рівня, які відрізняються орієнтацією на використання семантичних і синтаксичних конструкцій мови C++ і SystemC, що дозволяє здійснювати паралельний синтез і верифікацію архітектурних рішень.

4. Удосконалено метод мультиверсного синтезу керуючих і операційних автоматів, орієнтованих на архітектурні рішення в метриці, яка відрізняється мінімальним часом виконання функціональності за рахунок розпаралелювання операцій при обмеженні на апаратні витрати, що дозволило збільшити ефективність засобів автоматизованого проектування цифрових виробів.

Практичне значення отриманих результатів дослідження полягає у розробці програмних засобів для реалізації моделей і методів мультиверсного створення операційних пристройів в рамках інтегрованої системи проектування функціональних і архітектурних рішень SoC на основі використання продуктів верифікації та синтезу компаній Aldec і Xilinx; у тестуванні та верифікації програмних модулів мультиверсної розробки операційних пристройів в рамках інтегрованої системи проектування функціональних і архітектурних рішень SoC на десяти прикладах реалізації промисловово-орієнтованих функціональних блоків.

Обґрунтованість теоретичних положень та наукових результатів підтверджується експериментальними дослідженнями, спрямованими на програмно-апаратну реалізацію моделей, методів і структур даних для проектування цифрових систем на кристалах, яка містить процедури створення специфікації, синтезу, тестування, моделювання та верифікації на основі запропонованої інфраструктури, що використовує промислові засоби компаній Aldec і Xilinx. Розроблені моделі, методи та інфраструктура впроваджено у вигляді методик та процедур впроваджено у науково-виробничу діяльність компанії ALDEC-KTC (довідка від 15.04.2016) та у навчальному процесі ХНУРЕ (довідка від 12.05.2016).

Порівняльний аналіз змісту дисертаційної роботи та опублікованих робіт показав, що результати наукових досліджень, а саме: метод синтезу інтерфейсних структур і протоколів виконання транзакцій RT-рівня на основі аналізу специфікації SoC-архітектури системного рівня; метод синтезу RTL-моделей функціональностей; удосконалені структури даних для опису функціональних примітивів системного рівня; удосконалений метод мультиверсного синтезу керуючих і операційних автоматів відображені у 36 друкованих працях. Серед них: 16 статей, з них 13 у наукових журналах, що входять до «Переліків наукових фахових видань України» і у міжнародних наукометрических базах, 3 статті в наукових журналах за кордоном (з них 2 – в міжнародній наукометричній базі Scopus); а також 20 публікацій у міжнародних наукових конференціях (з них 8 за кордоном, 11 входять до наукометричної бази Scopus). Здобувач має 15 публікацій, що входять до наукометричної бази Scopus, та індекс Хірша h=2.

Автореферат відображає зміст дисертаційної роботи.

Зауваження по дисертаційній роботі:

1) Не досить обґрунтовано використання мови SystemC для паралельного синтезу і верифікації архітектурних рішень цифрових систем на кристалах.

2) Не наведені оцінки апаратної реалізації і продуктивності методу синтезу інтерфейсних структур і протоколів виконання транзакцій RT-рівня на основі аналізу специфікації SoC-архітектури системного рівня, яка використовує стандартну шину Wishbone обміну даними між функціональними модулями.

3) Не показані оцінки швидкодії методу синтезу RTL-моделей SystemC-описів цифрових блоків системного рівня в алгоритми і структури даних автоматної моделі Мура, заданої синтезованою підмножиною мовних конструкцій VHDL.

4) Слабо подано порівняння методу мультиверсного синтезу керуючих і операційних автоматів, орієнтованих на архітектурні рішення в метриці, що мінімізує час виконання функціональності за рахунок розпаралелювання операцій при обмеженні на апаратні витрати.

5) Не показані результати верифікації програмних модулів мультиверсної розробки операційних пристройів в рамках інтегрованої системи проектування функціональних і архітектурних рішень SoC на основі використання продуктів компаній Aldec і Xilinx.

6) Запропоновані методи і алгоритми, як правило, не мають порівняльних аналітичних оцінок показників ефективності. Наприклад, метод діверсного синтезу не має аналітичних оцінок показників ефективності, які можна використовувати для порівняння з існуючими в світі аналогами, як продуктами провідних компаній планети в області комп'ютингу.

7) Огляд джерел в першому розділі слабо представлений зарубіжними публікаціями за останні три роки. Список публікацій автора містить статті, які не зовсім корелюються з темою дисертації (додатково відображають наукові результати, наприклад, [36] у авторефераті або [136] у дисертації).

Враховуючи викладене вище, можна зробити такий висновок: в дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу мультиверсне проектування архітектури цифрового виробу на основі заданої специфікації в середовищі SystemC (C++) і автоматичного вибору синтезованих функціональних структур з метою істотного зменшення часу створення проекту і підвищення виходу придатної продукції за рахунок паралельного синтезу та верифікації архітектурних рішень системного рівня відповідно до запропонованої метрики.

Отримано такі важливі наукові результати:

1. Новий метод синтезу інтерфейсних структур і протоколів виконання транзакцій RT-рівня на основі аналізу специфікації SoC-архітектури системного рівня, який характеризується використанням двобічної стандартної шини Wishbone обміну даними між функціональними модулями. Здійснено синтез типових структур мовних конструкцій в моделі RT-рівня і їх оцінку з позиції швидкодії та апаратних витрат, які використовуються як бібліотечні описи для вибору оптимальних рішень в процесі створення обчислювальних пристроїв.

2. Новий метод синтезу RTL-моделей функціональностей, який характеризується однозначним перетворенням C++ і SystemC-описів цифрових блоків системного рівня в алгоритми і структури даних автоматної моделі Мура, що задана синтезованою підмножиною мовних конструкцій VHDL. Створено інфраструктуру проектування і верифікації компонентів цифрових систем на кристалах з метою перевірки алгоритмів перетворення специфікації з системного рівня на рівень RTL-опису, яка дає можливість істотно зменшити час виконання всіх процесів проектування, тестування і верифікації.

3. Удосконалені структури даних для опису функціональних примітивів системного рівня, орієнтованих на використання семантичних і синтаксичних конструкцій мови C++ і SystemC, які відрізняються забезпеченням умов для виконання паралельного синтезу і верифікації архітектурних рішень. Розроблено і протестовано програмні модулі, що реалізують векторні і спискові моделі опису функціональних примітивів, а також інфраструктура для реалізації методів мультиверсної розробки операційних пристрой в рамках інтегрованої системи проектування функціональних і архітектурних рішень SoC на основі використання продуктів верифікації та синтезу компаній Aldec і Xilinx.

4. Удосконалений метод мультиверсного синтезу керуючих і операційних автоматів в заданій інфраструктурі проектування, орієнтованих на архі-

тектурні рішення в метриці, що мінімізує час виконання функціональності за рахунок розпаралелювання операцій при обмеженні на апаратні витрати. Виконана програмна реалізація моделей і методів мультиверсної розробки операційних пристройів в рамках інтегрованої системи проектування функціональних і архітектурних рішень SoC на основі використання продуктів верифікації та синтезу компаній Aldec і Xilinx.

Практично реалізовано локальну і серверну програми, розміщені на хмарних сервісах Amazon Web Services. Система виконана за мікросервісною архітектурою, яка має властивості масштабованості, надійності, можливість розробляти та оновлювати модулі системи незалежно один від одного. Клієнтський додаток реалізовано на мові C++, він має графічний інтерфейс користувача.

Дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, задовольняє вимогам пунктів 9, 11-14 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 № 656, а також вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а Обрізан Володимир Ігорович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Офіційний опонент:

начальник відділу математичного
моделювання та дослідження
ядерно-фізичних процесів і систем
Національного наукового центру
“Харківський фізико-технічний інститут”
доктор технічних наук, професор

Хажмурадов М. А.

Підпис проф. Хажмурадова М.А. засвідчує:

Вчений секретар



06 2017