

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Бабакова Романа Марковича «Структури і методи синтезу мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Невпинний розвиток елементної бази цифрових систем сприяє поширенню таких концептуальних напрямків обчислювальної техніки, як вбудовані системи, інтернет речей, системи критичного застосування, реконфігуровані системи та інші. На ефективність застосування цифрової системи в значній мірі впливають такі критерії, як швидкодія та витрати апаратури. При цьому постає важлива науково-практична проблема зменшення апаратних витрат при зберіганні прийнятної швидкодії, вирішення якої в значній мірі сприяє покращенню таких характеристик пристроїв, як вартість, енергоефективність, габарити, надійність.

Невід'ємною складовою цифрової системи є пристрій керування, функцією якого є координація роботи інших блоків системи. В даний час для завдання поведінки пристрою керування широко використовуються моделі мікропрограмних автоматів (МПА). У порівнянні з іншими класами пристроїв керування МПА забезпечують максимальну швидкодію виконання алгоритму керування завдяки можливості виконання багатоспрямованих мікропрограмних переходів за один такт роботи пристрою. Однак схемам МПА властиві найбільш високі апаратні витрати, що впливають із апаратної реалізації імплементованого алгоритму керування.

Відомі сьогодні методи оптимізації апаратних витрат в схемах МПА в значній мірі базуються на збільшенні кількості рівнів логічного перетворення сигналів автомата та використанні змішаної елементної бази різної вартості, не враховуючи особливості алгоритму керування, що імплементується МПА. Це має негативний вплив на швидкодію схеми та ставить певні обмеження до вибору електронних компонентів. Таким чином, **актуальною** є проблема створення нових структур і методів синтезу МПА, які спрямовані на оптимізацію апаратних витрат та базуються на адаптації схеми МПА до імплементованого алгоритму керування.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планами науково-дослідних робіт у Донецькому національному університеті імені Василя Стуса.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів. В дисертаційній роботі представлені нові ідеї, структури та методи, впровадження яких забезпечує значне зменшення апаратних витрат в схемах пристроїв керування, побудованих на основі запропонованих моделей мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. Теоретичні

та експериментальні дослідження виконані здобувачем самостійно та в повному обсязі.

Наукові положення дисертаційної роботи дають повне уявлення про зміст та суть досліджень, їх новизну і практичну цінність. Отримані результати є обґрунтованими та достовірними, це підтверджується поданим теоретичним і експериментальним матеріалом, його науковою інтерпретацією, результатами впровадження запропонованих розробок та апробацією на наукових конференціях і семінарах.

Наукова новизна та теоретична цінність результатів. В дисертаційній роботі виконане теоретичне обґрунтування та отримане рішення актуальної наукової проблеми розробки структур, моделей і методів синтезу МПА, спрямованих на зменшення апаратних витрат, в основу яких покладений новий принцип перетворення кодів станів за допомогою множини арифметико-логічних операцій.

Наукова новизна відображена у наступних отриманих результатах, які мають теоретичну цінність:

1) принцип реалізації функції переходів мікропрограмного автомата за допомогою кінцевої множини арифметико-логічних операцій над кодами станів, що дозволив представити схему формування переходів автомата у формі операційного автомата і знизити апаратних витрат за рахунок багаторазового використання функціональних блоків операційного автомата при реалізації мікропрограмних переходів;

2) формалізація принципу операційного перетворення кодів станів за допомогою математичного апарата універсальних алгебр, що дає представлення функції переходів мікропрограмного автомата як кінцевої множини часткових функцій переходів;

3) структура операційного автомата переходів, призначеного для перетворення кодів станів мікропрограмного автомата, у якій множина реалізованих арифметико-логічних операцій відповідає множині часткових функцій переходів;

4) структура мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, в якій функція переходів реалізується на базі операційного автомата, що дозволяє використовувати один функціональний вузол операційного автомата для реалізації декількох мікропрограмних переходів, зменшуючи, таким чином, апаратні витрати в операційному автоматі переходів;

5) математична модель мікропрограмного автомата з операційним перетворенням кодів станів, що представляє собою систему ізоморфізмів алгебр, у якій кожний ізоморфізм виражає єдиний спосіб інтерпретації та перетворення кодів станів автомата в рамках певної підмножини мікропрограмних переходів;

6) формулювання наукових задач структурного і алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, а також методологічна база для їх вирішення, що містить, в тому числі, наступні методи: метод структурного представлення процесу синтезу

мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, метод використання транзитних станів, метод урахування ймовірностей істинності логічних умов; метод збільшення розрядності кодів станів;

7) метод алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, в основі якого лежить фіксована множина операцій в операційному автоматі переходів.

8) метод заміни вхідних змінних та метод зменшення максимальної кількості істотних вхідних змінних, структурно адаптовані до мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, що можуть приводити до додаткового зменшення апаратних витрат в схемі автомата.

Визначені основні наукові результати є **новими**.

Теоретичне значення роботи полягає у розвитку теорії та методів синтезу цифрових автоматів, розробці методології алгебраїчного синтезу мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів, суміщення запропонованих методів з відомими методами оптимізації апаратних витрат в схемах МПА.

Запропоновані структури і методи синтезу МПА з операційним автоматом переходів забезпечили зменшення апаратних витрат в схемі автомата у порівнянні з відомими структурами МПА при реалізації схем автоматів в базисі ПЛІС FPGA.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в дисертаційній роботі результати мають як наукове, так і практичне значення. Практичну цінність отриманих наукових результатів підтверджують акти впровадження результатів дисертаційної роботи. Практична цінність роботи полягає в наступному.

1. Розроблено прикладні основи побудови вискоефективних схем мікропрограмних автоматів зі зменшеними витратами апаратури за рахунок запропонованих підходів, структур та методів їх синтезу.

2. Розроблено метод алгоритмічного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, який має алгоритмічну спрямованість і адаптований до використання у складі спеціалізованих САПР цифрових систем керування.

3. Визначено область ефективного використання запропонованих структур мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів. Ефективність структур досліджена експериментально-аналітичним шляхом та дозволяє прогнозувати економію апаратних витрат у порівнянні з канонічною структурою мікропрограмного автомата в залежності від характеристик імплементованого алгоритму керування.

4. Доведено, що запропонований принцип операційного перетворення кодів станів може бути більш ефективним за критерієм апаратних витрат у порівнянні з існуючими методами автоматичного синтезу мікропрограмних автоматів, збудованими в САПР Xilinx Vivado.

Методологічні й наукові результати дисертаційного дослідження також впроваджено у навчальний процес кафедри комп'ютерних інтелектуальних систем та мереж Одеського національного політехнічного університету у

дисциплінах «Технології проектування комп'ютерних систем» та «Проектування і діагностика систем критичного застосування».

Повнота викладення наукових результатів в опублікованих працях, апробація роботи. Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладені у 30 наукових працях, зокрема: 22 статті у фахових наукових виданнях з технічних наук (11 статей опубліковані одноосібно, 1 стаття англійською мовою, 1 стаття в електронному виданні; 7 статей включені в наукометричні бази Scopus та Web of Science). Результати досліджень апробовано на 7 міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях і семінарах, що зафіксовано в опублікованих доповідях.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікацій основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Аналіз внеску автора в публікаціях по питаннях, висвітлених в дисертації, показав, що внесок Р.М. Бабакова *є вирішальним*.

Відповідність автореферату змісту дисертації. Основні положення автореферату: предмет, об'єкт та методи дослідження; мета і завдання дослідження; наукова новизна отриманих результатів; практичне значення отриманих результатів; зміст розділів; основні результати і висновки роботи; список праць за темою дисертації; характеристика особистого внеску здобувача наукового ступеня відповідають аналогічним позиціям дисертаційної роботи.

Загальна характеристика дисертації. Дисертаційне дослідження складається зі вступу, п'яти розділів, висновків до кожного з розділів, загальних висновків по роботі в цілому, переліку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації – 399 сторінок, з них основний текст – 315 сторінок. Робота містить 79 рисунків, 57 таблиць, перелік використаних джерел із 289 найменувань на 27 сторінках та 4 додатки на 40 сторінках.

Дисертація має вся ознаки, що притаманні роботі за кваліфікаційним рівнем докторської дисертації, яка за своєю суттю відповідає паспорту спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Зміст дисертації відповідає поставленій меті. Викладення матеріалу послідовне та логічне, надається досконалою технічною мовою. Оформлення дисертаційної роботи відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України.

Перший розділ дисертації на основі огляду літературних джерел розкриває стан проблеми, пов'язаної з необхідністю зменшення апаратних витрат в схемах пристроїв керування, реалізованих за моделями мікропрограмних автоматів. Визначається, що існуючі структури МПА спираються на векторне представлення коду стану автомата, що не дозволяє використовувати одні й ті самі елементи схеми для реалізації різних мікропрограмних переходів. Показана можливість скалярної інтерпретації кодів станів автомата та їх перетворення за допомогою множини арифметико-логічних операцій і відповідних ним функціональних вузлів. Такий підхід може потенційно приводити до зменшення апаратних витрат

в схемі автомата завдяки багаторазовому використанню одних і тих самих функціональних вузлів. Отже, визначено нагальну потребу в розробці нових теоретичних засад, структур і методів синтезу мікропрограмних автоматів, що використовують операційне перетворення кодів станів. Це визначає сутність наукової проблеми, яка розв'язується у цій дисертації.

Другий розділ роботи присвячений теоретичному обґрунтуванню запропонованого принципу операційного перетворення кодів станів. Для відомої структури мікропрограмного автомата на лічильнику зроблені п'ять узагальнень, які доводять можливість застосування арифметико-логічних операцій для перетворення кодів станів автомата. За основі апарату універсальних алгебр формалізовано концептуальний підхід, що полягає у розбитті функції переходів МПА на окремі підфункції, з кожною з яких ототожнюється власний закон інтерпретації та перетворення кодів станів, а також власна схемна реалізація. Сформульовані основні положення принципу операційного перетворення кодів станів.

У **третьому розділі** вирішується наукове завдання розробки структурної і математичної моделей мікропрограмного автомата з операційним перетворенням кодів станів. Запропоновано представляти схему формування переходів МПА у вигляді операційного автомата (операційного автомата переходів, ОАП), в якому множина функціональних вузлів відповідає множині арифметико-логічних операцій, що використовуються для перетворення кодів станів автомата в процесі реалізації мікропрограмних переходів. Такий архітектурний підхід сприяє зменшенню апаратних витрат в схемі формування переходів МПА завдяки тому, що кожен функціональний вузол може використовуватись в декількох мікропрограмних переходах при фіксованих витратах апаратури на його реалізацію. Запропоновано структуру МПА з операційним автоматом переходів (МПА з ОАП), а також ряд її модифікацій, що поєднують деякі відомі методи оптимізації апаратних витрат в схемах мікропрограмних автоматів. Запропоновано математичну модель МПА з ОАП, що являє собою систему ізоморфізмів алгебр, відповідних множині підфункцій переходів.

Четвертий розділ присвячений вирішенню наукового завдання розробки методології синтезу мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів. Сформульовано задачі алгебраїчного та структурного синтезу МПА з ОАП як складові процесу синтезу автомата. Запропоновано ряд методологічних підходів, що можуть бути використані в процесі алгебраїчного синтезу автомата. Запропоновано метод алгебраїчного синтезу МПА з ОАП з фіксованою множиною операцій переходів. Розроблені формальні етапи синтезу логічної схеми автомата.

П'ятий розділ присвячений вирішенню наукового завдання визначення ефективності запропонованих структур мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів. Запропоновано загальну методику досліджень, яка полягає у VHDL-моделюванні окремих структурних блоків структур МПА та дослідженні апаратних витрат як функції від параметрів блоків з подальшою аналітичною апроксимацією

отриманих результатів. Проведене дослідження ефективності запропонованих структур МПА з ОАП у порівнянні з канонічним МПА за критерієм апаратних витрат при реалізації схеми в базисі ПЛІС типу FPGA. Результати експериментальних досліджень показали, що запропоновані структури забезпечують достатньо високу ефективність для автоматів різної складності.

Зауваження до змісту й оформлення дисертаційної роботи.

Загалом позитивно оцінюючи дане дослідження, слід зазначити, що окремі його положення потребують додаткової аргументації, або викликають певні зауваження та побажання.

1. У розділі 1 бажано було б навести більш детальний порівняльний аналіз існуючих методів зменшення апаратних витрат в схемах мікропрограмних автоматів.

2. У другому розділі роботи, окрім алгебри переходів, вводиться поняття алгебри виходів (стор. 77 та 81). Незрозуміло, яка мета використання алгебри виходів, враховуючи те, що методи оптимізації, запропоновані в роботі, стосуються лише функції переходів мікропрограмного автомата.

3. В пункті 3.2 згадується відомий підхід зменшення апаратних витрат в операційному автоматі, оснований на пошуку еквівалентних мікрооперацій. Однак даний підхід в подальшому ніяк не використовується при синтезі мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. Виникає питання, чому автор не обрав цей підхід як частину методу синтезу запропонованих структур МПА.

4. Запропонований в п. 4.2.7 метод штучного збільшення розрядності кодів станів автомата спрямований на спрощення процесу його алгебраїчного синтезу. Однак в роботі відсутні оцінки збільшення апаратних витрат, що можуть бути викликані в результаті застосування даного підходу.

5. У п'ятому розділі наводяться результати, що свідчать про переваги запропонованих структур МПА за критерієм апаратних витрат у порівнянні з іншими структурами. При цьому область застосування визначається як набір значень параметрів синтезованого автомата та використовуваного елементного базису. Було б бажано надати отриманим результатам більш практичний вигляд у вигляді рекомендацій щодо вибору запропонованих МПА для вирішення конкретних класів прикладних задач.

6. При виборі значень досліджуваних параметрів автомата (пункт 5.1.1) не обґрунтований вибір значень для незмінних аргументів, перелічених у табл. 5.17, та не зрозуміло, як їх визначити без проведення повного синтезу схеми автомата. Те саме можна сказати про класи складності досліджуваних автоматів (табл. 5.18).

7. В роботі відсутні порівняльні дослідження швидкодії відомих та запропонованих структур мікропрограмних автоматів. Для визначення комплексних показників ефективності, окрім дослідження економії апаратних витрат, було б доцільно провести також дослідження швидкодії структур МПА з ОАП, оскільки ці два критерії часто знаходяться у протиріччі.

Загальний висновок по дисертаційній роботі.

Зроблені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву результати дослідження та ніяким чином не зменшують наукової та практичної цінності роботи.

Дисертаційна робота Бабакова Р.М. «Структури і методи синтезу мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів» є завершеним науковим дослідженням, містить нові наукові результати, має наукову та практичну цінність, та спрямована на розв'язання важливої наукової проблеми оптимізації апаратурних витрат в схемах пристроїв керування цифрових систем.

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані, пройшли належну апробацію на наукових конференціях та семінарах. Автореферат відповідає змісту дисертації та повністю його відображає.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, відповідає вимогам пунктів 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України №567 від 24.07.2013 р., а її автор – Бабаков Роман Маркович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

Провідний науковий співробітник
відділу мікропроцесорної техніки
Інституту кібернетики
ім. В.М. Глушкова НАН України
д.т.н., проф.



Опанасенко В.М.