

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Бабакова Романа Марковича**

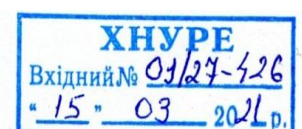
**"Структури і методи синтезу мікропрограмних автоматів  
з операційним перетворенням кодів станів",**

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

### **1. Актуальність теми дисертації.**

Одним із динамічних напрямків розвитку сучасних комп'ютерних систем є цифрові пристрої керування, що використовуються для організації сумісної роботи усіх компонентів комп'ютерних систем. Одним зі шляхів до покращення технічних та експлуатаційних характеристик пристроїв керування зокрема і цифрових систем в цілому є зменшення витрат апаратури в схемі проєктованого пристрою керування. У випадку використання елементного базису сучасних ПЛІС таке зменшення виражається у меншій кількості типових логічних елементів кристалу ПЛІС, що відводяться на побудову логічної схеми пристрою. Як наслідок, виникає можливість обрати для реалізації проєкту більш дешеву модель ПЛІС або ж розмістити на даному кристалі додаткові компоненти проєктованої системи. Таким чином, проблема зменшення апаратурних витрат на реалізацію схем пристроїв керування цифрових систем є актуальною.

Одним зі способів імплементації пристрою керування є мікропрограмний автомат, який серед інших класів пристроїв керування характеризується найбільшою швидкодією і найбільшими витратами апаратури, що пов'язане із схемною реалізацією алгоритму керування. Канонічна структура мікропрограмного автомата передбачає імплементацію функції переходів автомата у вигляді системи булевих рівнянь. Традиційні методи оптимізації апаратурних витрат в мікропрограмних автоматах не відступають від цього підходу і зосереджуються на різних перетвореннях



системи рівнянь з метою реалізації її фрагментів у гетерогенному елементному базисі. Таким чином, актуальною і важливою є наукова проблема пошуку нових способів імплементації функції переходів мікропрограмного автомата, які забезпечують еквівалентну реалізацію системи переходів автомата при менших витратах апаратури. Вирішення цієї проблеми потребує комплексного вирішення ряду задач, пов'язаних із розробкою відповідних теоретико-методологічних основ, структур, моделей і методів синтезу мікропрограмних автоматів, і визначає актуальність теми дисертаційної роботи.

Тематика дисертації є частиною тематики наукової роботи Донецького національного університету імені Василя Стуса за темами «Методологічні аспекти синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів» (номер державної реєстрації 0217U007465) та «Дослідження ефективності мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів» (0217U007466).

## **2. Структура дисертації та зміст її розділів.**

Дисертаційна робота Бабакова Р.М. складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

Вступ дисертаційної роботи присвячено обґрунтуванню актуальності тематики дослідження, окреслено науково-технічну проблему, визначено об'єкт, предмет, мету і завдання дослідження, виділено наукові задачі, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів та вказано на зв'язок роботи за науково-дослідними роботами за місцем роботи, надано інформацію щодо кількості публікацій та апробацій результатів дисертації.

У першому розділі, який має назву «Структурний синтез цифрових автоматів» (с. 40-73), проведено ґрунтовний аналіз стану дослідження у напрямку оптимізації апаратурних витрат в схемах пристроїв керування. Зокрема, з'ясовано, що існуючі методи оптимізації мікропрограмних

автоматів не враховують можливість перетворення кодів станів автомата із використанням арифметичних та логічних операцій над скалярним представленням коду стану. Акцентується, що дана можливість здатна сприяти зменшенню апаратних витрат в схемі автомата, однак відсутність досліджень у цьому напрямку потребує ретельної розробки даного питання.

У другому розділі «Операційне перетворення кодів станів у мікропрограмному автоматі» (с. 74-134) запропоновано ідею представлення функції переходів мікропрограмного автомата у вигляді множини часткових функцій. Для кожної часткової функції пропонується використовувати власний закон перетворення кодів станів, схемна інтерпретація якого має фіксовані витрати апаратури. Даний підхід (принцип операційного перетворення кодів станів автомата) є результатом узагальнення особливостей функціонування мікропрограмного автомата на лічильнику та викладений із використанням математичного апарату універсальних алгебр.

У третьому розділі «Організація мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів» (с. 135-190) запропоновані: математична модель мікропрограмного автомата з операційним перетворенням кодів станів; структура операційного автомата переходів, призначеного для перетворення кодів станів автомата за допомогою кінцевої множини операцій; структура мікропрограмного автомата, в якій функція переходів відтворюється за допомогою операційного автомата переходів; модифікована структура мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів зі зменшеною кількістю вхідних сигналів операційного автомата; структура мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів і заміною вхідних змінних та структура мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів і зменшенням кількості істотних вхідних змінних, в яких запропонований принцип перетворення кодів станів поєднується з відомими методами мінімізації апаратних витрат.

Четвертий розділ «Структурний синтез мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів» (с. 191-241) присвячений розробці

методики структурного синтезу запропонованих структур мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів. Як частину структурного синтезу, виділено задачу алгебраїчного синтезу автомата, для вирішення якої запропоновано комплекс методів та підходів, на основі яких розроблений метод алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, приклад якого наведений у додатку Б.

У п'ятому розділі за допомогою методів імітаційного моделювання вирішується задача оцінки ефективності запропонованих структур мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів за показником апаратних витрат. Дослідження, проведені для елементного базису ПЛІС типу FPGA компанії-виробника Xilinx, дозволили встановити аналітичні залежності показників ефективності схем від ряду параметрів, що характеризують заданий алгоритм керування та елементний базис. Показано, що схеми запропонованих структур автоматів з операційним автоматом переходів характеризуються в цілому меншими апаратними витратами у порівнянні із канонічною структурою мікропрограмного автомата та зі схемами автоматів, синтез яких передбачений засобами автоматизованого проєктування САПР Xilinx Vivado.

Завершують роботу висновки, список використаних першоджерел, на які є посилання в роботі, та додатки.

До речі, в додатках автор, поряд з представленням актів впровадження, подає багато цікавої інформації, зокрема прикладної, щодо побудови VHDL-моделей елементів розроблених структур та особливостей застосування запропонованого методу алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. З цього погляду додатки, по суті, є продовженням дисертаційної роботи.

### **3. Обґрунтованість і достовірність наукових результатів.**

Основні результати, отримані здобувачем, достатньо обґрунтовані аналітично, комп'ютерним моделюванням та експериментальними

дослідженнями. Отримані в процесі досліджень результати є новими, а сама дисертація є завершеною науковою працею, яка вирішує актуальну наукову та практичну проблему зменшення апаратних витрат в схемах пристроїв керування цифрових систем.

#### **4. Наукова новизна отриманих результатів.**

При виконанні дисертації здобувачем отримано нові результати, які мають наукову новизну та практичну цінність. Серед важливих наукових результатів слід відзначити наступні:

4.1. Вперше запропоновано принцип операційного перетворення кодів станів, згідно з яким схема формування переходів мікропрограмного автомата представляється у вигляді набору операційних блоків, що реалізують задану множину арифметико-логічних операцій. В результаті досягається вигреш у витратах апаратури за рахунок того, що кожен операційний блок має фіксовану схему з фіксованими витратами апаратури незалежно від того, скільки мікропрограмних переходів реалізуються за допомогою даної операції.

4.2. Надане теоретичне обґрунтування та виконана математична формалізація принципу операційного перетворення кодів станів, оснований на узагальненнях особливостей мікропрограмного автомата на лічильнику, який розглядається в якості структури-прототипу. Для відокремлення правил перетворення кодів станів як скалярних величин вводиться поняття проміжної алгебри переходів, сигнатура якої містить певну арифметико-логічну операцію. Ототожнення проміжної алгебри переходів із множиною мікропрограмних переходів на рівнях абстрактного і структурного автоматів здійснюється шляхом завдання ізоморфізму абстрактної, проміжної та структурної алгебр для кожної використовуваної арифметико-логічної операції.

4.3. Вперше запропоновано структуру мікропрограмного автомата з інтегрованим операційним автоматом у складі схеми формування переходів.

Використання реєстру даних операційного автомата в якості реєстру пам'яті мікропрограмного автомата дозволяє здійснювати мікропрограмні переходи автомата шляхом перетворення кодів за допомогою множини операцій, представлених схемою операційного автомата. Особливістю запропонованої структури є те, що апаратні витрати на схемну реалізацію кожної операції залежать від розрядності коду стану і не залежать від кількості мікропрограмних переходів, які здійснюються за допомогою даної операції. Також запропоновано математичну модель мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, яка представляє собою систему ізоморфізмів алгебр, що містять усі часткові функції переходів автомата.

4.4. Запропоновано нові структури мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів і додатковою оптимізацією апаратних витрат, яка досягається за рахунок поєднання принципу операційного перетворення кодів станів і відомих методів заміни вхідних змінних та зменшення кількості істотних вхідних змінних. Дані структури підтверджують можливість адаптації відомих методів оптимізації апаратних витрат до мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів.

4.5. Запропоновано метод структурного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, складовими якого є алгебраїчний синтез та синтез логічної схеми автомата. Сформульовано задачу алгебраїчного синтезу, яка полягає у побудові системи ізоморфізмів згідно з математичною моделлю автомата. Для вирішення задачі алгебраїчного синтезу розроблений комплекс методів, серед яких окремо можна відзначити метод додавання транзитних станів, що дозволяє обмежити кількість використовуваних арифметико-логічних операцій в операційному автоматі переходів і сприяти, завдяки цьому, зменшенню апаратних витрат в схемі автомата.

4.6. Запропоновано метод алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. Метод дозволяє знайти

формальне рішення задачі алгебраїчного синтезу для заданого алгоритму керування і набору арифметико-логічних операцій і є частиною методу структурного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів.

4.7. Розроблено методику оцінки ефективності запропонованих структур мікропрограмних автоматів за критерієм апаратних витрат. Отримано аналітичні залежності ефективності запропонованих структур відносно канонічної структури мікропрограмного автомата від характеристик заданого алгоритму керування, елементного базису та результатів алгебраїчного синтезу автомата. Використання даної методики дозволило встановити, що виграш в апаратних витратах за відповідних умов може складати 20-50 %, що вказує на досягнення мети дисертаційної роботи.

## **5. Практичне значення результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання.**

Розроблений принцип операційного перетворення кодів станів мікропрограмного автомата дозволяє зменшити апаратні витрати в схемах пристроїв керування, побудованих відповідно до структурних моделей автоматів, запропонованих в дисертації. Це дозволяє покращити техніко-експлуатаційні характеристики цифрових пристроїв, побудованих на основі мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів. Отримані в дисертаційній роботі нові оптимізовані структури і методи синтезу можуть бути інтегровані в сучасні системи автоматизованого проектування як перспективна альтернатива існуючим методам синтезу високошвидкісних пристроїв керування.

Теоретичні та практичні результати роботи впроваджено у науково-конструкторському бюро «Полісвіт» державного науково-виробничого підприємства «Об'єднання "Коммунар"», на підприємстві «ТОВ "С-інжиніринг"», в освітньому європейському проекті ERASMUS+ ALLIOT – Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications, a

також в навчальному процесі Одеського національного технічного університету при викладанні дисциплін «Проектування і діагностика систем критичного застосування» і «Технології проектування комп'ютерних систем».

Результати експериментальних досліджень підтверджують ефективність розроблених структур і методів синтезу мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів, оскільки їх використання у порівнянні з канонічним автоматом дозволяє зменшити від 10 до 50 % витрат апаратури при реалізації схеми пристрою в базисі ПЛІС FPGA. Результати досліджень можуть бути рекомендовані до впровадження в діяльність підприємств, що працюють в галузі розробки цифрових систем.

#### **6. Стиль оформлення дисертації, автореферату. Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій у публікаціях та відповідність спеціальності.**

Стиль, обсяг, структура, оформлення матеріалів дисертаційного дослідження відповідають чинним вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Матеріал викладено логічно, чітко, зрозуміло, а висновки відображають суть проведених наукових досліджень.

Зміст автореферату повністю ідентичний до змісту і основних положень дисертації, відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України та не містить інформації, як не відображена в основній роботі.

Усі основні положення та найбільш важливі результати дисертації, подані до захисту, опубліковані у необхідному обсязі у фахових наукових виданнях України, пройшли відповідну апробацію на міжнародних наукових конференціях. За темою дисертації з викладення основних її результатів опубліковано 30 наукових праць, з них 1 монографія, 22 статті у фахових виданнях, 7 статей індексовані у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science. Апробація засвідчена публікаціями 7 праць в матеріалах



зарубіжних та українських конференцій, з яких 4 індексовані у наукометричній базі Scopus. Вимоги щодо кількості та якості публікацій виконано.

За змістом та отриманими науковими результатами дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, зокрема п. 1 «Теоретичні основи створення і вдосконалення високоефективних технічних і програмних компонентів комп'ютерних систем та мереж загального та спеціального призначення, розподілених систем та їх компонентів відповідно до різних ієрархічних рівнів їх організації та умов експлуатації», п. 4 «Дослідження та розробки нових високоефективних архітектур комп'ютерних систем і мереж загального і спеціального призначення, топологічної організації розподілених систем та комунікаційних технологій в них», п. 7 «Розроблення та дослідження методів і технологій автоматизованого проектування технічних і програмних засобів комп'ютерних систем і мереж, мов опису, моделей і структурно-алгоритмічної організації систем і мереж для різних ієрархічних рівнів їх подання, створення інтелектуалізованих систем аналізу і синтезу апаратних і програмних засобів комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем, комп'ютерних мереж та їх компонентів».

## **7. Зауваження та побажання до дисертаційної роботи.**

Незважаючи на загальну позитивну оцінку дисертації, вона не позбавлена певних недоліків. Серед них, на мій погляд, є наступні:

7.1. В першому розділі відзначаються два основних класи пристроїв керування – мікропрограмний автомат (автомат з «жорсткою» логікою) та мікропрограмний пристрій керування (автомат з «програмувальною» логікою). Між тим, існує клас так званих композиційних мікропрограмних пристроїв керування, в структурі яких має місце поєднання цих двох типів автоматів. Однак в дисертаційній роботі відсутні рекомендації стосовно

можливості застосування запропонованого принципу операційного перетворення кодів станів до композиційних пристроїв керування.

7.2. У розділі 2 наданий ряд узагальнень відносно структури мікропрограмного автомата на лічильнику, однак не сказано про обмеження, які можуть виникати при реалізації принципу операційного перетворення кодів станів. Чи існують якісь обмеження, що можуть перешкоджати застосуванню запропонованого в дисертації підходу?

7.3. У пункті 2.4 сформульований принцип операційного перетворення кодів станів, що складається із семи положень. Останнє з них говорить про обов'язкову унікальність кодів станів і кодів вхідних сигналів (с. 131). Але, як відомо, це положення є загальним для будь-яких класів цифрових автоматів і не потребує окремого зауваження.

7.4. В запропонованих в розділі 3 структурах мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів та заміною вхідних змінних (рис. 3.9, с. 157 та рис. 3.12, с. 165) присутній додатковий блок (М-підсхема), який включений послідовно з іншими блоками структури і повинен призводити до збільшення часу одного такту роботи автомата. Наскільки суттєвим є таке збільшення в даному випадку?

7.5. На с. 168 пропонується застосовувати до мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів метод зменшення кількості істотних вхідних змінних. У прикладах, наведених на с. 170, між кожними двома умовними вершинами додається операторна вершина, що зменшує кількість логічних сигналів, які перевіряються в одному такті роботи автомата. Однак при цьому губиться головна перевага мікропрограмного автомата, а саме можливість виконувати багатоспрямовані переходи за один такт своєї роботи. Таким чином, залишається незрозумілим: чи доцільно застосовувати даний метод до автоматів, запропонованих в дисертації.

7.6. В дисертаційній роботі відсутні рекомендації щодо визначення конкретних серій ПЛІС або їх характеристик для реалізації запропонованих структур мікропрограмних автоматів.

7.7. В пункті 5.5.9 (с. 301) проведено дослідження залежності ефективності запропонованих структур від коефіцієнту  $k_6$ , що визначає наявність в використовуваній ПЛІС так званої блочної пам'яті, яка придатна для побудови окремих структурних блоків мікропрограмного автомату. На мій погляд, умови проектування можуть або надавати можливість використання таких блоків (коефіцієнт  $k_6$  дорівнює одиниці) або не надавати ( $k_6$  дорівнює нулю). Незрозуміло, як можна інтерпретувати значення коефіцієнту  $k_6$ , що розташовані між нулем та одиницею (наприклад,  $k_6=0,5$ ).

7.8. В розділі 5 найкращою із досліджених структур визначено автомат Мура зі структурою  $U_2$ . Однак не визначено структуру, найгіршу за критерієм зменшення апаратних витрат. Також немає чіткого порівняння запропонованих структур між собою.

Проте зроблені зауваження не впливають на загальний високий науковий рівень дисертації, не піддають сумніву актуальність роботи, основні наукові результати, отримані автором, та їх практичне значення.

## **8. Загальні висновки.**

Дисертаційна робота Бабакова Романа Марковича «Структури і методи синтезу мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів» є завершеною науковою працею, в якій вирішено актуальну наукову проблему розробки і дослідження теоретичних основ, структур, моделей і методів, спрямованих на зменшення апаратних витрат у схемі мікропрограмного автомата за рахунок адаптації схеми автомата до характеристик заданого алгоритму керування.

Основні положення дисертаційної роботи доведені, теоретично обґрунтовані і практично підтверджені. Отримані наукові результати є значущими для галузі 05.13 – інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. Дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Розглянута дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, що ставляться до докторських дисертацій, а її автор, Бабаков Роман Маркович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

**Офіційний опонент,**

професор кафедри обчислювальної  
техніки та програмування

Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»,

доктор технічних наук



*[Handwritten signature]*  
ЗАСВІДЧУЮ:  
ЧЛЕНІЙ СЕКРЕТАР  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
*[Handwritten signature]* Заковоротний О.Ю.  
11 03 20 21 р.