

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

БАБАКОВ РОМАН МАРКОВИЧ

Підпис

УДК 004.2

**СТРУКТУРИ І МЕТОДИ СИНТЕЗУ МІКРОПРОГРАМНИХ АВТОМАТІВ
З ОПЕРАЦІЙНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ КОДІВ СТАНІВ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ХАРКІВ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Донецькому національному університеті імені Василя Стуса Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
ОПАНАСЕНКО Володимир Миколайович,
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова
НАН України, провідний науковий співробітник
відділу мікропроцесорної техніки;

доктор технічних наук, професор
МІРОШНИК Марина Анатоліївна,
Український державний університет залізничного
транспорту, професор кафедри спеціалізованих
комп'ютерних систем;

доктор технічних наук, професор
ЛЕОНОВ Сергій Юрійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри обчислювальної техніки
і програмування.

Захист відбудеться «07» квітня 2021 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.01 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

Автореферат розісланий «19» лютого 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Підпис

Є.І. Литвинова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток комп'ютерної індустрії визначає необхідність забезпечення обчислювального процесу ефективними апаратними засобами, що поєднують високу продуктивність і прийнятну вартість. Одним з основних напрямків досліджень у даній області є здешевлення цифрових систем, що сприяє розширенню сфери їх застосування. Останнє десятиліття завдання зменшення апаратних витрат у цифрових системах як і раніше зберігає свою актуальність, у тому числі й у зв'язку з розвитком елементного базису цифрових пристроїв.

При проектуванні цифрових систем широко застосовується принцип мікропрограмного керування, сформульований в 1951 році М. Уїлксом і деталізований у роботах В. М. Глушкова, Г. Б. Жинтеліса, С. О. Майорова, Б. Н. Малиновського, Г. І. Новікова, О. В. Палагіна та ін. Згідно з даним принципом, одним із центральних вузлів цифрової системи є пристрій керування (ПК). Функцією ПК є координація роботи усіх блоків системи на основі заданого алгоритму керування, а характеристики ПК в значній мірі визначають характеристики цифрової системи в цілому. Сучасні підходи до проектування ПК цифрових систем є розвитком теорії автоматів, основи якої були закладені в роботах відомих учених С. Кліні, Г. Мілі, Е. Мура, Дж. фон Неймана, В. М. Глушкова, М. О. Гаврилова, Д. Хафмена та ін. Розвиток досліджень у цій області привів до появи спеціальних методів структурного синтезу для різних класів ПК, що суттєво розширило можливості теорії автоматів при проектуванні сучасних складних цифрових систем. Тут у першу чергу необхідно відзначити роботи представників наукових шкіл В. М. Глушкова, М. О. Гаврилова, А. Д. Закревського, В. М. Лазарева, С. І. Баранова, В. А. Склярова, Е. О. Якубайтіса, а також роботи Є. М. Вавілова, В. І. Варшавського, В. А. Горбатова, А. В. Каляєва, А. М. Меліхова, П. П. Пархоменко, Д. О. Поспелова, І. В. Прангішвілі, З. Л. Рабіновича та інших.

Одним з різновидів ПК є мікропрограмний автомат (МПА, автомат з «жорсткою» логікою). МПА має максимальну швидкодію серед відомих класів ПК за рахунок реалізації багатоспрямованих мікропрограмних переходів за один такт роботи пристрою. Однак імплементація алгоритму роботи МПА у вигляді мережі логічних елементів збільшує вартість схеми автомата. В теперішній час постійно зростаюча складність алгоритмів керування, чітко виражена тенденція мікропрограмної реалізації функцій, що раніше виконувались програмно, прогрес в області елементної бази викликають необхідність модифікації існуючих та розробки нових, більш досконалих методів структурного синтезу МПА, у тому числі орієнтованих на зменшення апаратних витрат у схемі автомата.

Сучасним елементним базисом для реалізації логічної схеми МПА є програмувальні логічні інтегральні схеми (ПЛІС), до яких належать мікросхеми типу FPGA, CPLD, SoPC та інші. Висока щільність логічних вентилів на кристалі ПЛІС дозволяє реалізувати на базі одного чипа пристрій керування, операційний пристрій, цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворювачі, фільтри та інші частини складної цифрової системи. Як і для попередніх базисів реалізації цифрових систем, у випадку ПЛІС виникає проблема оптимізації характеристик окремих

блоків. Вирішення цієї проблеми дозволяє збільшити функціональні можливості системи в рамках однієї мікросхеми ПЛІС. Таким чином, проблема розробки ефективних методів синтезу цифрових систем в цілому та МПА зокрема є *актуальною*.

Науково-методичною основою досліджень, представлених в дисертаційній роботі, є праці вітчизняних та закордонних вчених і фахівців. Відчутний внесок у розв'язок проблеми оптимізації апаратурних витрат у мікропрограмних автоматах внесли такі відомі у нас в країні та за кордоном вчені, як Баранов С. І., Баркалов О. О., Палагін О. В., Харченко В. С., Кривуля Г. Ф., Опанасенко В. М., Бібіло П. М., Соловйов В. В. та ін. Серед вчених далекого зарубіжжя найбільш відомими в досліджуваному напрямку роботами є праці D. Kania, G. De Micheli, M. Adamsky, T. Luba, M. Petrovski, T. Kam, B. Echerma, A. Klimovich, M. J. Avedillo, R. Brayton та ін.

Проведені дослідження та їх аналіз свідчать, що оптимізація апаратурних витрат у логічній схемі ПК в значній мірі пов'язана з адаптацією структури ПК до характеристик алгоритму керування, який імплементується пристроєм керування. Все це актуалізує і породжує спрямованість теоретичних та прикладних досліджень дисертаційної роботи, що присвячена розробці нових структур мікропрограмних автоматів і методів їх синтезу, які сприяють зниженню апаратурних витрат у логічній схемі автомата.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт Донецького національного університету імені Василя Стуса в рамках наступних держбюджетних тем

– НДР «Дослідження ефективності мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів» (номер держреєстрації 0117U004097), автор брав участь у виконанні роботи як науковий керівник;

– НДР «Методологічні аспекти синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів» (номер держреєстрації 0117U004098), автор брав участь у виконанні роботи як науковий керівник.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка, обґрунтування і дослідження теоретичних основ, структур, моделей і методів, спрямованих на зменшення апаратурних витрат в схемі мікропрограмного автомата за рахунок адаптації схеми автомата до характеристик імплементованого алгоритму керування.

Для досягнення мети в дисертаційній роботі вирішувались наступні завдання:

- аналіз існуючих методів синтезу і оптимізації цифрових автоматів;
- розробка загальної концепції представлення функції переходів автомата у вигляді множини часткових функцій;
- формалізоване узагальнення структурних особливостей відомої структури мікропрограмного автомата на лічильнику та формулювання нового принципу перетворення кодів станів автомата за допомогою кінцевої множини арифметико-логічних операцій;
- розробка структури і математичної моделі мікропрограмного автомата, заснованих на запропонованому принципі перетворення кодів станів за допомогою

кінцевої множини операцій і орієнтованих на зменшення апаратних витрат у логічній схемі автомата;

- модифікація розробленої структури мікропрограмного автомата із застосуванням відомих методів оптимізації апаратних витрат;

- розробка методології синтезу розроблених структур мікропрограмних автоматів;

- визначення області ефективного застосування розроблених структур мікропрограмних автоматів з оптимізованими витратами апаратури.

Об'єкт дослідження – процес оптимізації схем мікропрограмних автоматів.

Предметом дослідження є методологічні основи, структури, моделі й методи синтезу мікропрограмних автоматів, спрямовані на зменшення апаратних витрат у схемі автомата.

Методи дослідження: для вирішення поставлених у дисертації завдань використані: теорія кінцевих автоматів, теорія універсальних алгебр, теорія графів, методи теорії множин, лінійної алгебри та булевої алгебри; комп'ютерне моделювання для аналізу й перевірки вірогідності отриманих теоретичних положень.

Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову проблему розробки, обґрунтування і дослідження теоретичних основ, структур, моделей і методів, спрямованих на зменшення апаратних витрат в схемі мікропрограмного автомата за рахунок адаптації схеми автомата до характеристик імплементованого алгоритму керування. Основні результати, що визначають наукову новизну дисертаційної роботи, полягають у наступному:

Вперше запропонований принцип реалізації функції переходів мікропрограмного автомата на основі перетворення кодів станів за допомогою кінцевої множини арифметико-логічних операцій, що дозволяє представити схему формування переходів мікропрограмного автомата у формі операційного автомата і сприяє зниженню апаратних витрат за рахунок багаторазового використання функціональних блоків операційного автомата при реалізації мікропрограмних переходів.

Вперше виконано формалізацію принципу операційного перетворення кодів станів на основі математичного апарата універсальних алгебр, відповідно до якої функція переходів мікропрограмного автомата представляється кінцевою множиною часткових функцій переходів, із кожною з яких ототожнюється власний закон перетворення певної підмножини кодів станів автомата.

Вперше розроблені: структура операційного автомата переходів, призначеного для перетворення кодів станів мікропрограмного автомата, у якій множина реалізованих арифметико-логічних операцій відповідає множині часткових функцій переходів; структура мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, що допускає відповідність арифметико-логічних операцій окремим мікропрограмним переходам; структура мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, що припускає відповідність арифметико-логічних операцій станам автомата.

Вперше розроблено математичну 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.

Вперше сформульовані наукові задачі структурного і алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, для вирішення яких розроблена методологічна база, що містить наступні складові: 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.

Вперше розроблений метод алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, умовою застосування якого є фіксована множина операцій в операційному автоматі переходів.

Одержав подальший розвиток метод заміни вхідних змінних, застосування якого дозволило одержати модифіковану структуру мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, яка характеризується меншою кількістю вхідних сигналів структурних блоків автомата в порівнянні зі структурою-прототипом, що може сприяти додатковому зниженню апаратних витрат у логічній схемі автомата.

Одержав подальший розвиток метод зменшення максимальної кількості істотних вхідних змінних, застосування якого дозволило одержати модифіковану структуру мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, яка характеризується, у порівнянні зі структурою-прототипом, зменшеною кількістю операцій, реалізованих операційним автоматом переходів і, як наслідок, зменшеними витратами апаратури в логічній схемі автомата.

Удосконалено методику оцінки апаратних витрат на реалізацію логічної схеми мікропрограмного автомата, яка відрізняється тим, що структурні блоки мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів ототожнюються з типовими функціональними вузлами цифрових систем, за рахунок чого спрощується урахування параметрів автомата при моделюванні процесу синтезу схеми автомата.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджується: коректністю постановки завдань досліджень і теоретичних положень, на яких ґрунтується їхнє рішення з урахуванням загальноприйнятих або обґрунтованих припущень, результатами комп'ютерного моделювання та впровадження запропонованих структур, засобів і методів у виробничий, науково-дослідний та навчальний процеси.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що на основі отриманих та викладених в дисертації теоретичних наукових положень, висновків, пропозицій та рекомендацій розроблені працездатні практичні вискоєфективні пристрої керування, що дозволяють знизити загальну вартість цифрових систем та зберегти високу швидкодію, властиву пристроям керування на базі мікропрограмних автоматів, за рахунок адаптації схеми пристрою до параметрів імплементованого алгоритму керування.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в технологічні процеси промислових підприємств, в науково-дослідних організаціях, використовуються для практичної реалізації цілей освітнього європейського проекту, спрямованого на розроблення магістерських і аспірантських курсів, а також курсів підвищення кваліфікації фахівців з Інтернету речей, а також для підготовки спеціалістів у вищих навчальних закладах України. Впровадження, підтверджені відповідними актами, використовуються на наступних підприємствах і в установах:

- на підприємстві ТОВ «С-інжиніринг» при проектуванні спеціалізованих пристроїв керування;
- в науково-технічному спеціальному конструкторському бюро «Полісвіт» (державне науково-виробниче підприємство «Об'єднання "Коммунар"») при розробленні бортових авіаційних обчислювальних систем та пристроїв;
- в освітньому європейському проекті ERASMUS+ «ALLIOT» – Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications, 573818-EPP-1-1-2016-1-UK-EPPKA2-CBHE-JP при розробці модуль ТММ 6.4 «Development and hardware optimization of control units for IoT devices» в рамках курсу ТМ6 «Internet of Things for industrial systems»;
- у навчальному процесі кафедри комп'ютерних інтелектуальних систем та мереж Одеського національного політехнічного університету при викладанні дисциплін «Технології проектування комп'ютерних систем» та «Проектування і діагностика систем критичного застосування».

Особистий внесок здобувача.

Всі наукові результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто. Розроблені автором підходи, структури, моделі й методи синтезу мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів розглянуті як у працях без співавторства [1-12, 24, 25], так і в працях, виконаних у співавторстві.

В роботах, написаних у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: [13] – метод використання транзитних станів; [14] – структурна організація і класифікація операційного автомата переходів; [15] – способи формування кодів операцій переходів; [16] – представлення мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів за допомогою математичного апарата теорії універсальних алгебр; [17] – використання методу заміни вхідних змінних у модифікованій структурі мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів; [18] – аналіз особливостей реалізації функції виходів мікропрограмного автомата з використанням кінцевої множини операцій; [19, 26] – принцип операційного перетворення кодів станів у мікропрограмному автоматі; [20, 28, 29] – спільна реалізація мікропрограмних переходів операційним і канонічним способами; [21, 27] – визначення області ефективного застосування мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів; [22, 30] – структурний підхід до класифікації методів синтезу мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів; [23] – метод зменшення кількості істотних вхідних змінних у мікропрограмному автоматі з операційним автоматом переходів без заміни вхідних змінних.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи апробовані на таких міжнародних конференціях: на 3-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів, студентів «Сучасна інформаційна Україна: інформатика, економіка, філософія» (Донецьк, 2009 р.); на 10-му Міжнародному симпозиумі «IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS-2012)» (Харків, 2012 р.); на 12-й Міжнародній конференції «IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems» (Велке Карловіце, Чехія, 2013 р.); на 14-й Міжнародній конференції «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)» (Поляна, 2017); на Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Інформатика та системні науки (ICH-2017)» (Полтава, 2017); на Міжнародній науковій конференції «Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку», присвяченій 60-річчю заснування Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України (Київ, 2017); на 9-й Міжнародній конференції «2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2018)» (Київ, 2018).

Публікації. Матеріали дисертації повною мірою викладені у 30 публікаціях, з них 1 – в одноосібній монографії (12 авт. арк.), 22 у фахових періодичних виданнях України з технічних наук, з них 11 статей опубліковані одноосібно, 1 стаття англійською мовою, 1 стаття в електронному виданні; 7 статей включені в наукометричні бази Scopus та WoS; 7 тез доповідей у матеріалах міжнародних наукових конференцій (4 англійською мовою, включені до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи складає 399 сторінок тексту, що містять 2 анотації на 19 сторінках, 79 рисунків, 57 таблиць, список використаних джерел з 289 найменувань на 27 сторінках, 4 додатки на 40 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано проблему, мету і основні завдання досліджень, наведено відомості щодо зв'язку дисертації з планами організації, де виконана робота. Дано стислу анотацію отриманих у дисертації результатів, відзначено їх наукову новизну та практичну цінність, наведено дані щодо використання результатів проведених досліджень.

У **першому розділі** на основі аналізу та огляду літературних джерел розкрито стан проблеми, пов'язаної з необхідністю оптимізації апаратних витрат в схемах мікропрограмних автоматів.

Одним із основних складових сучасних обчислювальних систем є пристрій керування, функцією якого є координація роботи усіх блоків системи. У даний час склалася така укрупнена класифікація пристроїв керування:

- мікропрограмний автомат (МПА, автомат з «жорсткою» логікою);
- мікропрограмний пристрій керування (автомат з «програмувальною» логікою);

– композиційний мікропрограмний пристрій керування.

Серед даних класів пристроїв керування МПА характеризується максимальною швидкістю, яка досягається завдяки можливості виконання багатоспрямованих мікропрограмних переходів за один такт роботи. Використання МПА в якості пристрою керування дозволяє збільшити загальну швидкість цифрової системи, що є актуальним на тлі постійного зростання складності алгоритмів керування. Дана особливість МПА досягається за рахунок збільшення апаратних витрат в логічній схемі пристрою, що призводить до збільшення вартості цифрової системи та погіршення таких її характеристик, як енергоспоживання, надійність, габарити тощо. Потреба у покращенні зазначених характеристик породжує актуальну наукову проблему мінімізації апаратних витрат в логічній схемі мікропрограмного автомата.

Канонічна структура МПА наведена на рис. 1 і містить наступні блоки:

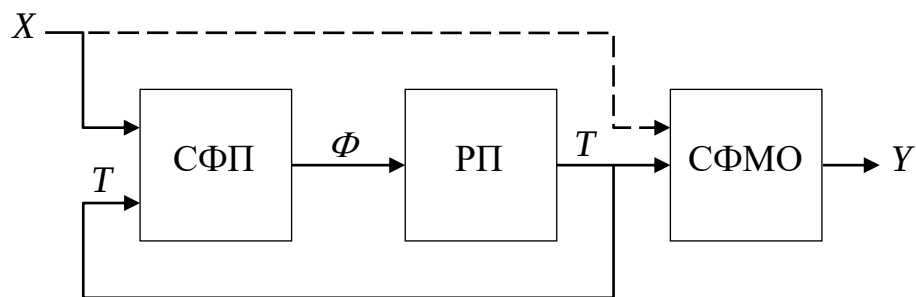


Рисунок 1 – Канонічна структура мікропрограмного автомата

– схема формування переходів (СФП) реалізує функцію переходів автомата і формує код стану переходу Φ згідно з виразом (1):

$$\Phi = \Phi(X, T), \quad (1)$$

де X – множина вхідних сигналів автомата, T – код поточного стану;

– регістр пам'яті (РП) призначений для зберігання коду поточного стану;

– схема формування мікрооперацій (СФМО) реалізує функцію виходів автомата і формує множину мікрооперацій (вихідних сигналів) згідно з виразом (2) у випадку автомата Мілі і згідно з виразом (3) у випадку автомата Мура.

$$Y = Y(X, T); \quad (2)$$

$$Y = Y(T). \quad (3)$$

Відповідно до виразів (2) і (3), наявність у структурі МПА зв'язку, зображеного пунктиром, визначає дану структуру як автомат Мілі, відсутність зв'язку – як автомат Мура. Для опису алгоритмів управління, що імплементуються мікропрограмним автоматом, в дисертаційній роботі використовується мова граф-схем алгоритмів (ГСА).

Проаналізовані підходи до автоматизованого синтезу МПА. Сучасним елементним базисом для побудови цифрових систем є базис ПЛІС (FPGA, CPLD тощо), застосування якого вимагає використання спеціалізованих САПР. Пропонована компанією Xilinx САПР Vivado містить власні методи синтезу МПА за VHDL-опису і дозволяє оцінити основні технічні характеристики проектного пристрою шляхом віртуального синтезу логічної схеми пристрою. При цьому до

VHDL-опису МПА висувається ряд вимог, дотримання яких дозволяє САПР розпізнати фрагменти коду, що відповідають кінцевому автомату, та застосувати один із вбудованих методів кодування станів і відповідної реалізації функцій переходів і виходів. Такими вимогами є представлення станів автомата у вигляді множини літералів, наявність синхронного регістру пам'яті із можливістю переведення у початковий стан за сигналом скидання, реалізація системи функцій переходів і виходів за допомогою VHDL-оператора *case*. Структурні блоки МПА можуть бути реалізовані мовою VHDL у вигляді одного або кількох процесів, що не впливає на апаратні витрати, але дозволяє застосувати додаткові методи оптимізації окремо до кожного структурного блоку.

Аналіз існуючих підходів до оптимізації апаратних витрат дозволив визначити серед них наступні основні напрямки:

1. Методи, основані на багаторівневому перетворенні логічних сигналів в схемі автомата.
2. Методи, основані на модифікації вхідної ГСА та спеціальному кодуванні станів автомата.
3. Методи, що враховують особливості використовуваного елементного базису.

У більшості цих методів коди станів автомата розглядаються як бітові вектори, закон перетворення яких визначається системою канонічних булевих рівнянь, в якій кожний терм відповідає одному мікропрограмному переходу. Методи оптимізації апаратних витрат на реалізацію функції переходів МПА зводяться до різних модифікацій даної системи з метою її спрощення. В дисертаційній роботі пропонується новий концептуальний підхід, що полягає у перетворенні кодів станів мікропрограмного автомата за допомогою кінцевої множини арифметико-логічних операцій. На відміну від системи канонічних булевих рівнянь, схемна інтерпретація кожної з таких операцій не залежить від кількості мікропрограмних переходів, реалізованих за допомогою цієї операції, і характеризується фіксованими витратами апаратури. Гіпотетично, такий підхід може сприяти зменшенню апаратних витрат в схемі автомата у порівнянні з канонічним МПА (рис. 1).

Недостатність теоретичних досліджень в напрямку запропонованого підходу унеможливорює його практичне використання для оптимізації витрат апаратури при проектуванні цифрових пристроїв. Дане протиріччя визначає наукову проблему дисертаційного дослідження, яка полягає у розробці теоретично обґрунтованої методології синтезу мікропрограмних автоматів, спрямованої на зменшення апаратних витрат в логічній схемі МПА за рахунок використання спеціальних структурних рішень, що дозволяють адаптувати структуру МПА до характеристик алгоритму керування, імplementованого автоматом.

Наприкінці розділу, виходячи з проведеного аналізу, сформульовано проблему, поставлені мета та задачі наукового дослідження. Для вирішення зазначених проблем розроблено теоретичні основи, структури, моделі і методи, описані в наступних розділах роботи.

У **другому розділі** запропоновано теоретичну основу побудови мікропрограмного автомата з операційним перетворенням кодів станів: розроблено

підхід до представлення функції переходів автомата у вигляді множини часткових функцій переходів і формалізовано його за допомогою математичного апарата універсальних алгебр; для відомої структури мікропрограмного автомата на лічильнику зроблено ряд узагальнень, згідно з якими перетворення кодів станів відповідно до мікропрограмних переходів можливе за допомогою кінцевої множини операцій над кодом поточного стану автомата; уведене поняття проміжної алгебри переходів; сформульовано принцип операційного перетворення кодів станів.

На абстрактному рівні МПА представляється абстрактним автоматом, який пропонується задавати у вигляді двоосновної алгебри

$$G_A = \langle A_A, F_A \rangle, \quad (4)$$

де $A_A = \langle A, Z, W \rangle$ – носій абстрактної алгебри, що містить усі алфавіти абстрактного автомата: вхідний алфавіт Z , вихідний алфавіт W та множину станів A ; $F_A = \{\delta, \lambda\}$ – сигнатура абстрактної алгебри, що включає абстрактні функції переходів δ і виходів λ . Абстрактний автомат без функції виходів може розглядатися як двоосновна алгебра

$$G_\delta = \langle A_\delta, F_\delta \rangle = \langle \{A, Z\}, \{\delta\} \rangle \quad (5)$$

без функції переходів – як трьохосновна алгебра

$$G_\lambda = \langle A_\lambda, F_\lambda \rangle = \langle \{A, Z, W\}, \{\lambda\} \rangle \quad (6)$$

у випадку автомата Мілі або двоосновна алгебра

$$G_\lambda = \langle A_\lambda, F_\lambda \rangle = \langle \{A, W\}, \{\lambda\} \rangle \quad (7)$$

у випадку автомата Мура. Тоді абстрактний автомат U може розглядатися як двійка

$$U = \langle G_\delta, G_\lambda \rangle. \quad (8)$$

В абстрактному автоматі функція переходів δ є відповідністю

$$\delta: (D_\delta \subseteq A \times Z) \rightarrow A. \quad (9)$$

У вигляді (9) функція δ є, у загальному випадку, частково визначеною на множині $A \times Z$ і може бути представлена як множина кортежів

$$\langle a_i, z_j, a_k \rangle \in \delta, \quad (10)$$

кожен з яких відповідає одному автоматному переходу зі стану $a_i \in A$ під впливом вхідного сигналу $z_j \in Z$ до стану $a_k \in A$. Застосовуючи до множини кортежів операцію розбивки, можна одержати сімейство непустих підмножин, що попарно не перетинаються, максимально можливе число яких дорівнює числу переходів автомата. Кожну таку підмножину переходів назовемо частковою функцією переходів δ_i , тобто неповністю визначеною на області визначення D_δ функції переходів δ :

$$\delta_i: (D_{\delta_i} \subseteq D_\delta) \rightarrow A. \quad (11)$$

При цьому функція переходів δ є множиною підмножин кортежів (10), тобто множиною часткових функцій переходів δ_i :

$$\delta = \{\delta_1, \dots, \delta_{N_\delta}\}, \quad (12)$$

де $1 \leq N_\delta \leq B$, B – число переходів автомата, що дорівнює числу непустих клітин таблиці переходів.

З кожною частковою функцією переходів δ_i пов'язується власна алгебра наступного виду:

$$G_{\delta_i} = \langle A_{\delta_i}, F_{\delta_i} \rangle = \langle \{A_{\delta_i}, Z_{\delta_i}\}, \{\delta_i\} \rangle \quad (13)$$

Тут $A_{\delta_i} \subseteq A$ – множина усіх станів, що присутні у кортежах (10) функції δ_i ; $Z_{\delta_i} \subseteq Z$ – множина вхідних сигналів, що присутні у кортежах (10) функції δ_i . Оскільки $A_{\delta_i} \subseteq A$, $Z_{\delta_i} \subseteq Z$ і для будь-яких $a \in A_{\delta_i}$ та $z \in Z_{\delta_i}$ виконується рівність $\delta_i(a, z) = \delta(a, z)$, вираз (13) є підалгеброю алгебри (5) (абстрактною підалгеброю переходів).

Множині часткових функцій переходів відповідає множина абстрактних підалгебр переходів, яку можна ототожнювати з алгеброю (5):

$$G_{\delta} = \{G_{\delta_1}, \dots, G_{\delta_{N_{\delta}}}\}. \quad (14)$$

Компоненти A_{δ} та F_{δ} алгебри G_{δ} є об'єднанням відповідних компонент усіх підалгебр G_{δ_i} : $A_{\delta} = \bigcup_{i=1}^{N_{\delta}} A_{\delta_i} = \{\bigcup_{i=1}^{N_{\delta}} A_{\delta_i}, \bigcup_{i=1}^{N_{\delta}} Z_{\delta_i}\}$, $F_{\delta} = \bigcup_{i=1}^{N_{\delta}} F_{\delta_i} = \{\bigcup_{i=1}^{N_{\delta}} \delta_i\}$.

Часткові функції δ_i утворюють розбивку: $\forall (i, j \in [1, N_{\delta}], i \neq j): \delta_i \cap \delta_j = \emptyset$. Сімейства множин A_{δ_i} та Z_{δ_i} утворюють на множинах A і Z відповідні покриття, що в загальному випадку припускає $\forall (i, j \in [1, N_{\delta}]) : A_{\delta_i} \cap A_{\delta_j} \neq \emptyset$ та $Z_{\delta_i} \cap Z_{\delta_j} \neq \emptyset$. Присутність одного і того ж стану $a \in A$ в носіях декількох підалгебр означає, що переходи в даний стан та / або з нього виконуються за допомогою різних часткових функцій.

При переході від абстрактного автомата до структурного усі елементи множин, що входять в носій алгебри (4), отримують структурні (двійкові коди) відповідно до обраного способу кодування. Це дозволяє перейти до структурної алгебри переходів G_d :

$$G_d = \langle A_d, F_d \rangle = \langle \{K_S(A), K_S(Z)\}, \{d\} \rangle, \quad (15)$$

де $K_S(A)$ і $K_S(Z)$ – множини структурних кодів станів і вхідних сигналів відповідно, d – структурна функція переходів виду

$$d: (D_d \subseteq K_S(Z) \times K_S(A)) \rightarrow K_S(A), \quad (16)$$

що є множиною кортежів (17).

$$\langle K_S(a_i), K_S(z_j), K_S(a_k) \rangle \in d. \quad (17)$$

За аналогією з абстрактною функцією переходів, структурна функція переходів (16) може бути представлена у вигляді множини часткових структурних функцій переходів виду

$$d_i: (D_{d_i} \subseteq D_d) \rightarrow K_S(A), \quad (18)$$

кожна з яких утворює сигнатуру відповідної структурної підалгебри переходів (19).

$$G_{d_i} = \langle A_{d_i}, F_{d_i} \rangle = \langle \{K_S(A_{d_i}), K_S(Z_{d_i})\}, \{d_i\} \rangle. \quad (19)$$

При цьому структурна алгебра переходів (15) представляється множиною структурних підалгебр виду (19):

$$G_d = \{G_{d_1}, \dots, G_{d_{N_d}}\}. \quad (20)$$

Тотожність абстрактної та структурної алгебр переходів визначається їх ізоморфізмом:

$$G_\delta \leftrightarrow G_S. \quad (21)$$

Подібні ізоморфізми існують між усіма відповідними абстрактною та структурною підалгебрами переходів:

$$G_{\delta_i} \leftrightarrow G_{S_i}. \quad (22)$$

Розглянутий підхід може бути застосований до відомої структури мікропрограмного автомата на лічильнику (С-автомата), в якому частина переходів реалізується за допомогою операції інкременту, частина – канонічним способом за системою булевих рівнянь. Це дозволяє представити структурну функцію переходів d двома частковими функціями d_1 та d_2 . Кожна часткова функція може розглядатися як сигнатура окремої структурної підалгебри переходів:

$$G_{d_1} = \langle A_{d_1}, F_{d_1} \rangle = \langle \{K_S(A_{d_1}), K_S(Z_{d_1})\}, \{d_1\} \rangle; \quad (23)$$

$$G_{d_2} = \langle A_{d_2}, F_{d_2} \rangle = \langle \{K_S(A_{d_2}), K_S(Z_{d_2})\}, \{d_2\} \rangle. \quad (24)$$

Представлення функції d у вигляді двох часткових функцій приводить до аналогічного представлення абстрактної функції переходів δ . Часткові абстрактні функції переходів δ_1 та δ_2 утворюють сигнатури двох абстрактних підалгебр переходів:

$$G_{\delta_1} = \langle A_{\delta_1}, F_{\delta_1} \rangle = \langle \{A_{\delta_1}, Z_{\delta_1}\}, \{\delta_1\} \rangle; \quad (25)$$

$$G_{\delta_2} = \langle A_{\delta_2}, F_{\delta_2} \rangle = \langle \{A_{\delta_2}, Z_{\delta_2}\}, \{\delta_2\} \rangle. \quad (26)$$

З ізоморфізму (22) випливають ізоморфізми відповідних підалгебр:

$$G_{\delta_1} \leftrightarrow G_{d_1}; \quad (27)$$

$$G_{\delta_2} \leftrightarrow G_{d_2}. \quad (28)$$

Структурна схема С-автомата, у якій підкреслене представлення функції переходів у вигляді двох часткових функцій, наведена на рис. 2.

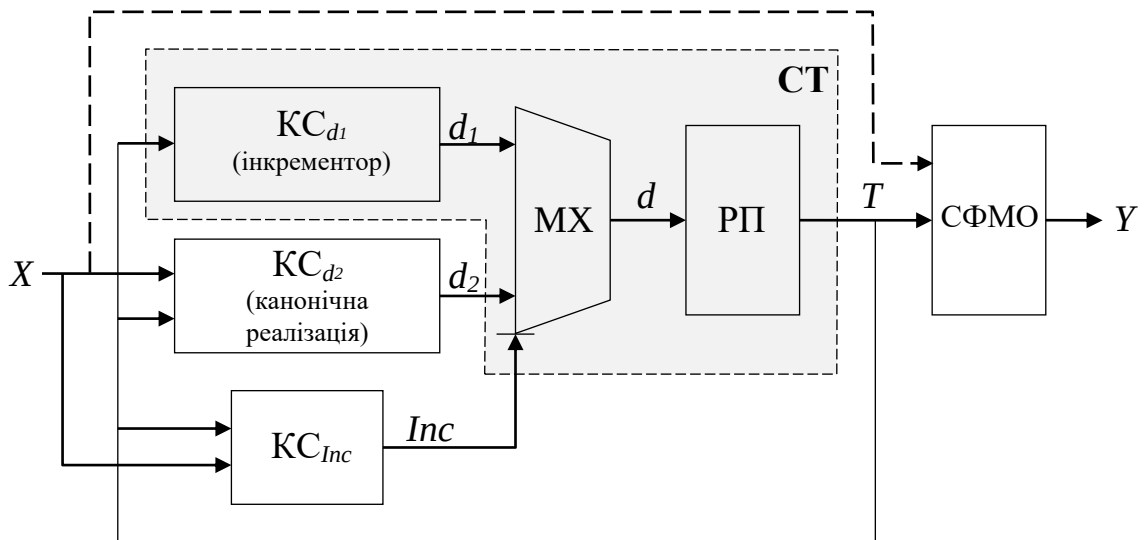


Рисунок 2 – Структурна схема С-автомата

В даній структурі схема $КС_{d_1}$ реалізує часткову структурну функцію переходів d_1 і становить собою R -розрядний інкрементор. Структурний код T поточного стану, представлений набором структурних змінних $\langle T_1, \dots, T_R \rangle$, у якому $T_r \in \{0, 1\}$, інтерпретується на вході $КС_{d_1}$ як R -розрядне беззнакове ціле. На виході інкрементора формується структурний код стану переходу, який позначений символом d_1 та ототожнюється зі значенням однойменної часткової функції переходів. Часткова функція d_2 представлена комбінаційною схемою $КС_{d_2}$. Дана схема синтезується за відомою методикою і реалізує систему канонічних рівнянь, відповідну до функції d_2 . На вхід $КС_{d_2}$ надходять структурний код поточного стану $T = \langle T_1, \dots, T_R \rangle$ та структурний код вхідного слова, представлений набором $X = \langle x_1, \dots, x_L \rangle$, у якому $x_l \in \{0, 1, -\}$. Структурний код стану переходу, що формується на виході $КС_{d_2}$, позначений символом d_2 і ототожнюється зі значенням однойменної часткової функції переходів. В кожному такті роботи автомата код стану переходу d формується шляхом мультиплексування значень d_1 і d_2 відповідно до сигналу Inc , що формується схемою $КС_{Inc}$.

Застосовувана в С-автоматі операція інкременту є арифметичною операцією й визначена для скалярних величин. В процесі синтезу С-автомата на етапі формування лінійних послідовностей станів кожний стан $a_i \in A_{\delta_1}$ отримує унікальний код $K_I(a_i)$ із множини натуральних чисел. Процес перетворення кодів станів за допомогою операції інкременту O_{Inc} формалізуємо за допомогою наступної алгебри:

$$G_I = \langle A_I, F_I \rangle = \langle \{K_I(A_{\delta_1}), Z_{\delta_1}\}, \{O_{Inc}\} \rangle, \quad (29)$$

у якій O_{Inc} задається множиною кортежів виду

$$\langle K_I(a_i), z_j, K_I(a_k) \rangle \in O_{Inc}, \quad (30)$$

де $K_I(a_i), K_I(a_j) \in K_I(A_{\delta_1})$, $z_j \in Z_{\delta_1}$.

Оскільки в операції O_{Inc} кожний кортеж виду (30) відповідає одному мікропрограмному переходу, йому відповідають один кортеж виду (10) в частковій абстрактній функції переходів δ_1 і один кортеж виду (17) в частковій структурній функції переходів d_1 . Це дозволяє встановити три одночасно існуючі ізоморфізми алгебр $G_{\delta_1} \leftrightarrow G_{d_1}$, $G_{\delta_1} \leftrightarrow G_I$ та $G_I \leftrightarrow G_{d_1}$, які скорочено визначаються виразом (31).

$$G_{\delta_1} \leftrightarrow G_I \leftrightarrow G_{d_1}. \quad (31)$$

Алгебру виду (29) пропонується називати проміжною алгеброю переходів, оскільки вона відіграє допоміжну роль при побудові структурної підалгебри переходів відповідно до абстрактної алгебри переходів. Коды $K_I(a_i)$ названі проміжними кодами станів. С-автомат можна вважати заданим, якщо задана система ізоморфізмів (32).

$$\begin{cases} G_{\delta_1} \leftrightarrow G_I \leftrightarrow G_{d_1}; \\ G_{\delta} \leftrightarrow G_d. \end{cases} \quad (32)$$

Для автомата на лічильнику запропонований ряд узагальнень:

- на рівні проміжної алгебри переходів для кодів станів припустимі різні інтерпретації: ціле число у беззнаковому або знаковому форматах, бітовий вектор, дійсне число тощо;
- для перетворення кодів станів можуть використовуватись будь-які операції (не лише інкремент);
- в одному автоматі для перетворення кодів станів можуть використовуватись декілька різних операцій;
- вхідні сигнали можуть виступати в якості аргументів операцій наряду з кодом поточного стану автомата;
- за допомогою множини операцій можуть бути реалізовані як усі мікропрограмні переходи, так і їх частина.

На основі зроблених узагальнень сформований *принцип операційного перетворення кодів станів*, що містить наступні положення:

1. Структурні коди станів мікропрограмного автомата отримують деяку інтерпретацію – скалярну або векторну, виходячи з якої для станів формуються спеціальні проміжні коди.

2. При використанні проміжних кодів станів мікропрограмний перехід (перетворення коду поточного стану в код стану переходу) розглядається як виконання деякої операції (операції переходів, ОП) над кодом поточного стану.

3. Кожна ОП імплементується комбінаційною схемою, яка дозволяє виконувати перетворення структурних кодів станів, еквівалентні перетворенням відповідних проміжних кодів станів за допомогою цієї ОП.

4. У загальному випадку на множині переходів автомата виділяється кілька непересічних підмножин, у кожній з яких:

- структурні коди станів інтерпретуються і формуються незалежно від інших підмножин переходів;
- усі переходи реалізуються за допомогою однієї операції переходів, визначеної на множині проміжних кодів станів даної підмножини переходів;
- апаратні витрати в схемі, що імплементує операцію переходів, не залежать (або залежать незначно) від кількості переходів у даній підмножині.

5. Переходи, що не належать до жодної зі сформованих підмножин, реалізуються канонічним способом за системою булевих рівнянь.

6. Один і той самий стан має однаковий структурний код в усіх підмножинах переходів, в яких він зустрічається. Всі стани автомата мають унікальні структурні коди в межах своєї множини.

В другому розділі вирішено наукові завдання розробки загальної концепції представлення функції переходів у вигляді множини часткових функцій, формалізованого узагальнення структурних особливостей мікропрограмного автомата на лічильнику та формулювання нового принципу операційного перетворення кодів станів. Отримані у другому розділі результати дають можливість

побудови структури мікропрограмного автомата, в якому мікропрограмні переходи реалізуються за допомогою кінцевої множини арифметико-логічних операцій.

Третій розділ присвячений структурній організації мікропрограмного автомата з операційним перетворенням кодів станів.

На основі узагальнень, зроблених у другому розділі для автомата на лічильнику, запропоновано математичну модель мікропрограмного автомата з операційним перетворенням кодів станів. Модель враховує можливість розбиття функції переходів на N_d часткових функцій переходів, причому для будь-якого i часткова абстрактна функція δ_i та часткова структурна функція d_i є тотожними, тобто визначають одну й ту саму підмножину мікропрограмних переходів автомата. Така тотожність виражається ізоморфізмом відповідних підалгебр: $G_{\delta_i} \leftrightarrow G_{d_i}$.

Нехай задана множина $\{G_{I_1}, \dots, G_{I_{N_I}}\}$ проміжних алгебр переходів виду

$$G_{I_i} = \langle A_{I_i}, F_{I_i} \rangle = \langle \{K_{I_i}(A_{I_i}), K_{I_i}(Z_{I_i})\}, \{O_i\} \rangle, \quad (33)$$

де A_{I_i} – носій проміжної алгебри, F_{I_i} – її сигнатура. Носій утворений множиною $K_{I_i}(A_{I_i})$ проміжних кодів станів $a \in A_{I_i}$ та множиною $K_{I_i}(Z_{I_i})$ проміжних кодів вхідних сигналів $z \in Z_{I_i}$. Сигнатура утворена єдиною операцією переходів (ОП) O_i :

$$O_i: K_{I_i}(A_{I_i}) \times K_{I_i}(Z_{I_i}) \rightarrow K_{I_i}(A_{I_i}), \quad (34)$$

яка формально є множиною кортежів виду

$$\langle K_{I_i}(a_k), K_{I_i}(z_l), K_{I_i}(a_m) \rangle \in O_i. \quad (35)$$

Для будь-якого автомата кількість N_I проміжних алгебр $N_\delta - 1 \leq N_I \leq N_\delta$. У випадку $N_I = N_\delta$ всі переходи автомата реалізуються із використанням проміжних алгебр. При $N_I = N_\delta - 1$ існує деяка підмножина переходів, яка визначається частковими функціями δ_{N_δ} та d_{N_δ} і реалізується канонічним способом.

Для будь-якого $i \in [1; N_I]$ підалгебри G_{δ_i} , G_{d_i} та проміжна алгебра G_{I_i} мають бути заданими так, що існують їхні попарні ізоморфізми:

$$G_{\delta_i} \leftrightarrow G_{I_i} \leftrightarrow G_{d_i}. \quad (36)$$

Виразу (36) відповідає наступне твердження: у структурному автоматі, еквівалентному заданому абстрактному автомату, структурні коди станів і вхідних сигналів, які утворюють носій структурної підалгебри G_{d_i} , можуть перетворюватися логічною схемою, що імплементує операцію переходів O_i проміжної алгебри G_{I_i} , відповідно до закону, визначеного абстрактною функцією переходів δ_i із сигнатури абстрактної підалгебри G_{δ_i} .

Для N_I проміжних алгебр переходів множина ізоморфізмів виду (36) може бути об'єднана в систему:

$$\begin{cases} G_{\delta_1} \leftrightarrow G_{I_1} \leftrightarrow G_{d_1}; \\ G_{\delta_2} \leftrightarrow G_{I_2} \leftrightarrow G_{d_2}; \\ \dots \\ G_{\delta_{N_I}} \leftrightarrow G_{I_{N_I}} \leftrightarrow G_{d_{N_I}}. \end{cases} \quad (37)$$

Вимога того, щоб в кожній структурній підалгебрі переходів одні й ті самі стани та вхідні сигнали мали однакові структурні коди, забезпечується існуванням ізоморфізму (21). Використання в структурі МПА схеми СФМО вимагає однозначної відповідності між станами, їх структурними кодами та формованими мікрокомандами. Така відповідність забезпечується існуванням ізоморфізму

$$G_\lambda \leftrightarrow G_I, \quad (38)$$

в якому G_I – структурна алгебра виходів, що визначається схоже із алгеброю (15). Додавання ізоморфізмів (21) і (38) в систему (37) приводить до системи (39):

$$\begin{cases} G_{\delta_1} \leftrightarrow G_{I_1} \leftrightarrow G_{d_1}; \\ G_{\delta_2} \leftrightarrow G_{I_2} \leftrightarrow G_{d_2}; \\ \dots \\ G_{\delta_{N_I}} \leftrightarrow G_{I_{N_I}} \leftrightarrow G_{d_{N_I}}; \\ G_\delta \leftrightarrow G_d; \\ G_\lambda \leftrightarrow G_I. \end{cases} \quad (39)$$

Дана система запропонована в якості математичної моделі мікропрограмного автомата з операційним перетворенням кодів станів. Якщо система (39) задана, то для заданого абстрактного автомата існує еквівалентний йому структурний автомат, побудований на основі принципу операційного перетворення кодів станів.

Множина ОП O_i імплементується множиною комбінаційних схем $КС_{d_i}$, виходи яких мультиплексуються під управлінням сигналу Z за аналогією із С-автоматом. Відповідну схему (рис. 2) запропоновано називати операційною частиною (ОЧ).

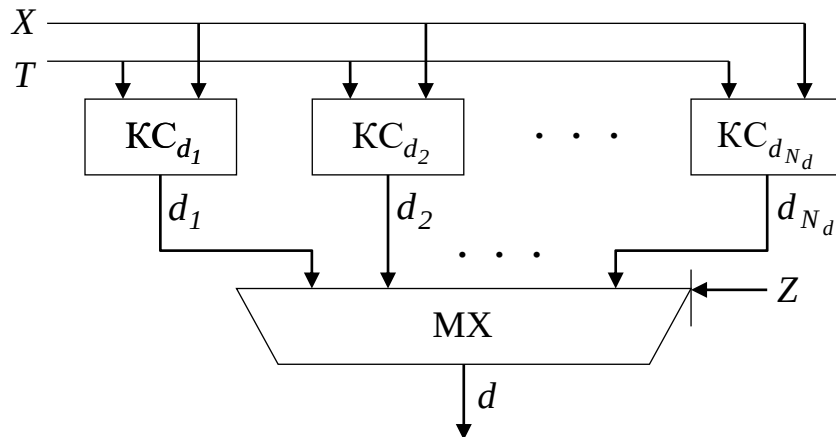


Рисунок 2 – Структурна схема операційної частини

Відзначено, що операційна частина разом із регістром пам'яті МПА утворюють операційний автомат (ОА), призначений для перетворення кодів станів з метою реалізації мікропрограмних переходів. Запропоновано структуру даного ОА (рис. 3), яку названо операційним автоматом переходів (ОАП).

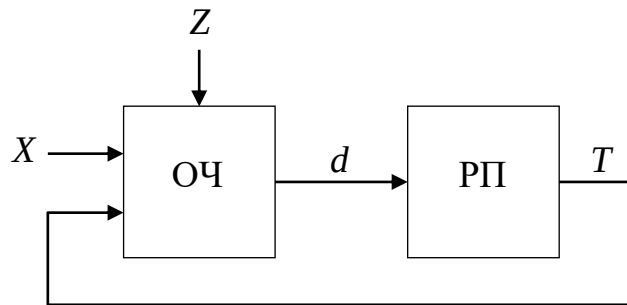


Рисунок 3 – Операційний автомат переходів

Запропоновано структуру мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів (МПА з ОАП), зображену на рис. 4, в якій блок ОАП організований відповідно до рис. 3. Дану структуру позначено символом U_1 .

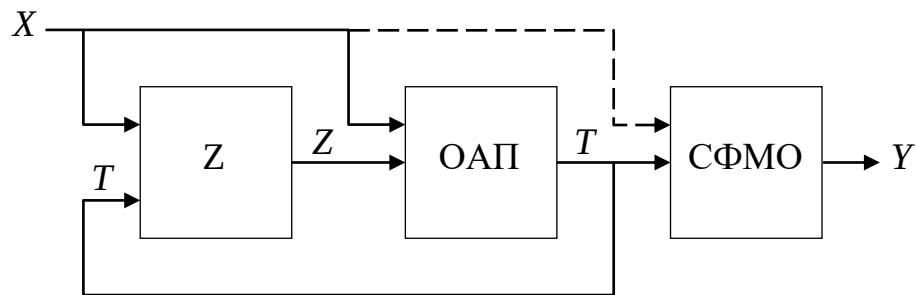


Рисунок 4 – Структурна схема мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів (структура U_1)

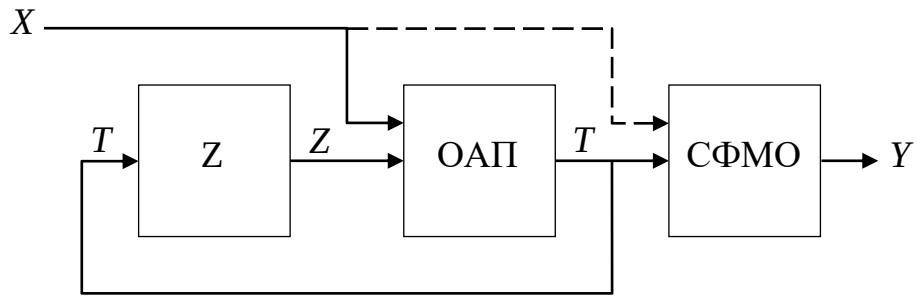
Тут блок Z відповідає Z -підсхемі, яка формує в кожному такті роботи R_Z -розрядний код Z вибору ОП і реалізує функцію

$$Z = Z(T, X), \quad (40)$$

мікропрограмному переходу.

Наявність у структурі U_1 зв'язку, показаного пунктиром, дозволяє класифікувати її як автомат Мілі, відсутність зв'язку – як автомат Мура. Математичною моделлю МПА з ОАП є система ізоморфізмів (39).

Запропоновано модифікацію структури МПА U_1 (структуру U_2 , рис. 5), в якій на вхід Z -підсхеми поступає лише код поточного стану T . Це унеможливує зіставлення ОП окремим переходам автомата, проте дозволяє зіставляти окрему ОП кожному стану автомата. Даний підхід приводить до зменшення апаратних затрат в Z -підсхемі, однак зазвичай вимагає використання більш складних ОП, здатних реалізовувати усі переходи із відповідних станів.

Рисунок 5 – Структура МПА с ОАП U_2

В даній структурі функція Z-підсхеми визначається виразом

$$Z = Z(T), \quad (41)$$

якому відповідає система канонічних рівнянь виду

$$\begin{cases} z_1 = z_1(T_1, \dots, T_R); \\ z_2 = z_2(T_1, \dots, T_R); \\ \dots \\ z_{R_Z} = z_{R_Z}(T_1, \dots, T_R). \end{cases} \quad (42)$$

Отримав подальший розвиток метод заміни вхідних змінних, який доцільно застосовувати у випадку

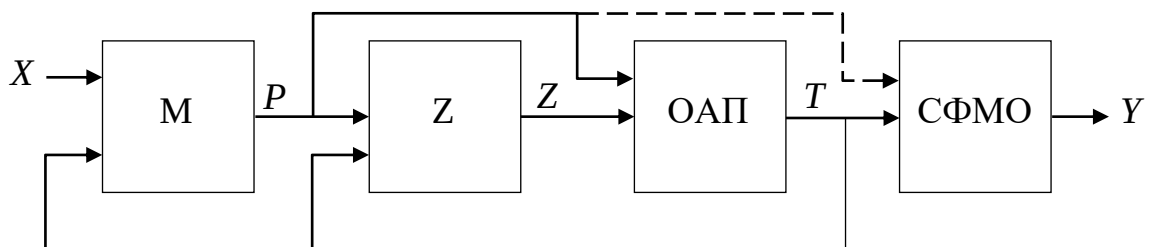
$$|X(a_i)| \ll L, \quad (43)$$

де $X(a_i)$ – підмножина множини X , елементи якої суттєво впливають на переходи зі стану a_i , L – кількість елементів множини X .

Нехай МПА заданий ГСА, у якій будь-який перехід залежить не більш ніж від G логічних умов. В цьому випадку на вхід Z-підсхеми та ОАП буде подаватися множина сигналів $P = \{p_1, \dots, p_G\}$, а в структуру автомата додається спеціальна М-підсхема, що реалізує функцію

$$P = P(X, T). \quad (44)$$

Додавання М-підсхеми в структуру U_1 приводить до структури МПА з ОАП і заміною вхідних змінних, що зображена на рис. 6. Позначимо дану структуру символом U_3 .

Рисунок 6 – Структурна схема МПА з ОАП і заміною вхідних змінних (структура U_3)

Тут Z-підсхема реалізує функцію

$$Z = Z(T, P) \quad (45)$$

і будується за системою рівнянь

$$\begin{cases} z_1 = z_1(T_1, \dots, T_R, p_1, \dots, p_G); \\ z_2 = z_2(T_1, \dots, T_R, p_1, \dots, p_G); \\ \dots \\ z_{R_Z} = z_{R_Z}(T_1, \dots, T_R, p_1, \dots, p_G). \end{cases} \quad (46)$$

М-підсхема реалізує функцію

$$P = P(X, T) \quad (47)$$

і будується за системою рівнянь

$$\begin{cases} p_1 = p_1(T_1, \dots, T_R, x_1, \dots, x_L); \\ p_2 = p_2(T_1, \dots, T_R, x_1, \dots, x_L); \\ \dots \\ p_G = p_G(T_1, \dots, T_R, x_1, \dots, x_L). \end{cases} \quad (48)$$

Схема СФМО реалізує функцію

$$Y = Y(T, P) \quad (49)$$

у випадку автомата Мілі та функцію (3) у випадку автомата Мура. Таким чином, наявність у структурі U_3 зв'язку, показаного на рис. 6 пунктиром, дозволяє вважати дану структуру автоматом Мілі, відсутність зв'язку – автоматом Мура.

Запропоновано застосовувати метод заміни вхідних змінних до МПА з ОАП зі структурою U_2 , що породжує структуру U_4 з відсутнім зв'язком від М-підсхеми до Z-підсхеми у порівнянні зі структурою U_3 (рис. 7).

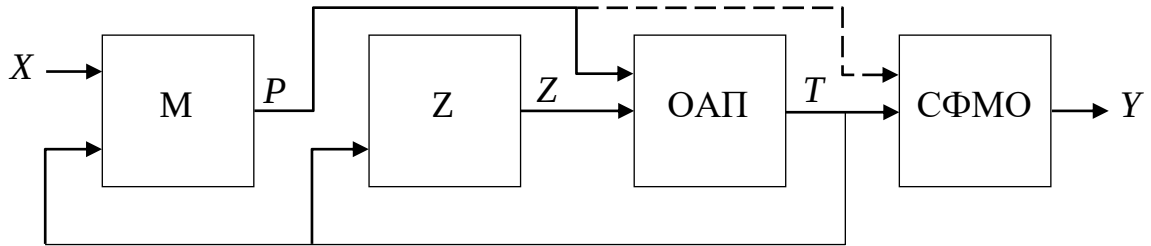


Рисунок 7 – Структурна схема МПА з ОАП із зіставленням операцій переходів станам автомата і заміною вхідних змінних (структура U_4)

У даній структурі Z-підсхема реалізує функцію (41) і синтезується за системою рівнянь (42). М-підсхема реалізує функцію (47) і синтезується за системою рівнянь (48). Схема СФМО синтезується за системою рівнянь (49) у випадку автомата Мілі та за системою (3) у випадку автомата Мура.

У порівнянні зі структурою U_2 , в структурі U_4 має місце збільшення апаратних витрат внаслідок додавання М-підсхеми, яке може бути компенсоване зменшенням витрат на реалізацію блоків ОАП та СФМО.

Отримав подальший розвиток метод зменшення максимальної кількості істотних вхідних змінних, що передбачає додавання в задану ГСА додаткових станів з пустими наборами формованих мікрооперацій. Метод не приводить до структурних змін і може бути ефективно застосований до структур МПА з ОАП U_2 та U_4 , в яких операції переходів зіставляються окремим станам автомата.

Перевагою методу є спрощення використовуваних операцій переходів за рахунок того, що окрема ОП реалізує в середньому меншу кількість мікропрограмних переходів. Це зменшує апаратні витрати на реалізацію операції та сприяє її використанню для більшої кількості станів, що зменшує загальну кількість ОП в операційному автоматі переходів.

В **четвертому розділі** розглянуті питання структурного синтезу мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів.

Запропоновано розділяти процес структурного синтезу МПА з ОАП на два етапи: алгебраїчний синтез і синтез логічної схеми автомата.

Сформульовано задачу алгебраїчного синтезу МПА з ОАП, яка полягає у формуванні системи ізоморфізмів (39). В загальному випадку для заданого автомата можливе формування множини систем (39), які можуть відрізнятися кількістю підалгебр переходів, сигнатурами та носіями проміжних алгебр переходів. Будь-яка існуюча система ізоморфізмів (39) з $N_I > 0$ вважається *формальним розв'язком задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП*. Усі існуючі системи (39) утворюють *множину формальних розв'язків задачі алгебраїчного синтезу*. Виключення із цієї множини тих систем, при використанні яких апаратні витрати в логічній схемі МПА з ОАП більші або дорівнюють витратам у логічній схемі еквівалентного МПА з канонічною структурою, а також тих систем, при яких результуюча схема МПА з ОАП не задовольняє яким-небудь додатковим критеріям проектування, дає в результаті *множину ефективних розв'язків задачі алгебраїчного синтезу*. У множині ефективних розв'язків існує принаймні одна система (39), для якої логічна схема МПА з ОАП має мінімальні витрати апаратури серед усіх систем даної множини. Така система є *оптимальним розв'язком задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП* і входить у *множину оптимальних розв'язків*.

У загальному випадку в процесі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП формування множини ефективних розв'язків не є обов'язковим. Проте, збільшення кількості знайдених ефективних розв'язків сприяє підвищенню результативності структурного синтезу МПА з ОАП, оскільки кожний черговий знайдений розв'язок може виявитися кращим за усі розв'язки, знайдені раніше. Пошуку ефективних рішень задачі алгебраїчного синтезу сприяє використання спеціальних методів, прийомів, способів, процедур і алгоритмів, сукупність яких запропоновано розглядати як *методологію алгебраїчного синтезу МПА з ОАП*. Під *методом алгебраїчного синтезу МПА з ОАП* розуміти певну послідовність етапів, в результаті виконання якої може бути отриманий формальний розв'язок задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП, виражений системою ізоморфізмів (39). Результатом окремого етапу пропонується вважати один або кілька сформованих елементів системи (39).

Запропоновано метод структурно представлення процесу алгебраїчного синтезу МПА з ОАП.

У системі ізоморфізмів (39) виділені три алгебраїчні рівні: рівень абстрактних алгебр, рівень проміжних алгебр та рівень структурних алгебр. На рівні абстрактних алгебр розташовані елементи, що визначають абстрактний автомат: абстрактна алгебра переходів (5) та абстрактна алгебра виходів (6), (7). Елементами рівня проміжних алгебр є множина проміжних кодів станів

$K_I(A) = \{K_{I_1}(A_{I_1}), \dots, K_{I_{N_I}}(A_{I_{N_I}})\}$, множина операцій переходів $O = \{O_1, \dots, O_{N_I}\}$ та множина $K_I(Z) = \{K_{I_1}(Z_{I_1}), \dots, K_{I_{N_I}}(Z_{I_{N_I}})\}$ проміжних кодів вхідних сигналів. Дані елементи утворюють множину проміжних алгебр переходів $G_I = \{G_{I_1}, \dots, G_{I_{N_I}}\}$. Елементами рівня структурних алгебр є множина $K_S(A)$ структурних кодів станів, множина $K_S(Z)$ структурних вхідних сигналів і структурна функція переходів d , що утворюють структурну алгебру переходів G_d . На цьому ж рівні перебуває структурна алгебра виходів G_l .

Варіативність у послідовності і способах формування елементів системи (39) припускає наявність множини потенційних методів алгебраїчного синтезу, які характеризуються різною ефективністю з позицій витрат часу і результативності у пошуку формальних рішень. З метою визначення послідовності формування елементів системи (39) процес алгебраїчного синтезу МПА з ОАП запропоновано представляти у вигляді орієнтованого графа, вершинами якого є елементи системи (39), ребрами – причинно-наслідкові зв'язки між ними.

На рис. 8 наведена одна із структур процесу алгебраїчного синтезу МПА з ОАП. Вона узагальнює сукупність методів алгебраїчного синтезу, які мають наступні властивості:

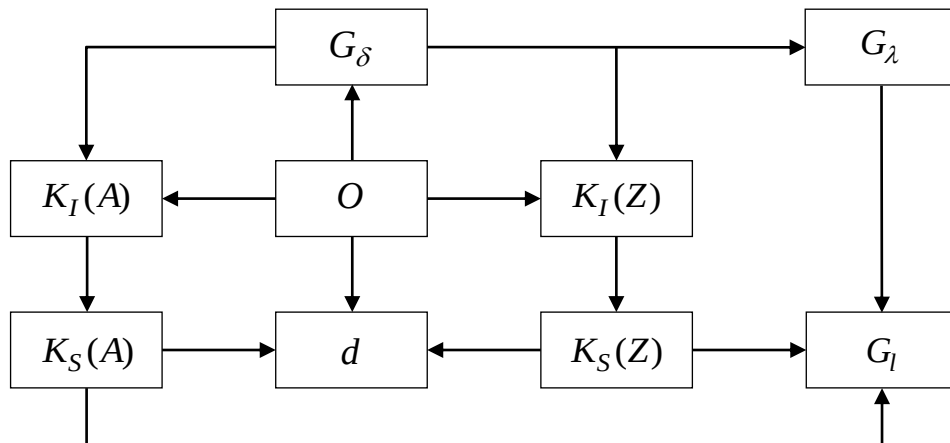


Рисунок 8 – Структура процесу алгебраїчного синтезу МПА з ОАП

1) Множина операцій переходів O є фіксованою і не може бути модифікована в процесі алгебраїчного синтезу. Це визначається відсутністю вхідних зв'язків до блоку « O ».

2) Система переходів автомата, що визначається сигнатурою абстрактної алгебри переходів G_δ , в процесі алгебраїчного синтезу може бути модифікована (наприклад, завдяки застосуванню методу зменшення максимальної кількості істотних вхідних змінних) в залежності від заданої множини ОП. Ця можливість визначається зв'язком від блоку « O » до блоку « G_δ ».

3) Структурні коди станів $K_S(A)$ формуються відповідно до проміжних кодів станів $K_I(A)$. Структурні коди вхідних сигналів $K_S(Z)$ формуються відповідно до

проміжних кодів вхідних сигналів $K_I(Z)$. Ці послідовності підтверджуються зв'язками між відповідними блоками.

Структура на рис. 8 є структурою процесу алгебраїчного синтезу МПА з ОАП із змінюваною абстрактною алгеброю переходів і заданою множиною операцій переходів. Ця та інші розроблені структури, які відрізняються зв'язками між своїми блоками, пропонуються як спосіб класифікації методів алгебраїчного синтезу МПА з ОАП.

Проаналізовано вирішення завдання алгебраїчного синтезу МПА з ОАП методом повного перебору варіантів. У разі фіксованої множини ОП кількість варіантів зіставлення ОП мікропрограмним переходам та структурних кодів станам автомата визначається наступним виразом:

$$N = \frac{(2^R)!}{(2^R - M)!} \cdot (N_I + 1)^B \quad (50)$$

де M – кількість станів автомата, R – розрядність структурного коду стану, B – кількість мікропрограмних переходів, N_I – кількість використовуваних ОП.

Відзначено, що при $M = 50$, $R = 6$, $B = 100$, $N_I = 10$ та витратах часу 1 мс на один цикл перебору $N \approx 10^{175}$ с, що є неприйнятним для практичного використання алгебраїчного синтезу методом повного перебору. Це означає, що усі потенціальні методи алгебраїчного синтезу МПА з ОАП мають базуватися лише на частковому переборі варіантів.

Запропоновано метод додавання транзитних станів, який здатен запобігти використанню додаткових операцій переходів, що сприяє зменшенню апаратних витрат в блоці ОЧ ОАП.

Якщо в процесі алгебраїчного синтезу для станів a_m та a_n вже визначені їх структурні (двійкові) коди, але мікропрограмний перехід зі стану a_m у стан a_n не може бути реалізований за допомогою будь якої операції із наявної множини ОП, він може бути реалізований двома способами:

- канонічним способом за допомогою системи булевих рівнянь;
- операційним способом за допомогою додаткової ОП.

Обидва випадки призводять до збільшення апаратних витрат в схемі ОАП. Третім способом є використання транзитних станів, що полягає в наступному:

1. В задану ГСА, що містить M станів $a_0 - a_{M-1}$, додається послідовність із k операторних вершин, у яких не формуються жодні мікрооперації. Послідовність включимо в розрив гілки, яка відповідає переходу зі стану a_m до стану a_n , і відзначимо додані вершини (або їх виходи) станами $a_M, \dots, a_{M+k-1}$, де $k \geq 1$.

2. Закодуємо стани $a_M, \dots, a_{M+k-1}$ структурними кодами $K_S(a_M), \dots, K_S(a_{M+k-1})$ розрядності $R = \lceil \log_2 M \rceil$ таким чином, щоб:

– коди $K_S(a_M), \dots, K_S(a_{M+k-1})$ були унікальні й вільні (не використовувалися для кодування інших станів даної ГСА);

– переходи $a_m \rightarrow a_M, a_M \rightarrow a_{M+1}, \dots, a_{M+k-2} \rightarrow a_{M+k-1}, a_{M+k-1} \rightarrow a_n$ могли бути реалізовані за допомогою операцій переходів із заданої множини ОП.

Подібні стани, що додаються у вихідний автомат з метою реалізації переходів автомата за допомогою наявної множини операцій переходів, запропоновано називати *транзитними станами*. Сенс даного терміну визначається допоміжною роллю цих станів у процесі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП.

Запропоновано метод урахування ймовірностей істинності логічних умов.

У деяких випадках для кожного вхідного сигналу $z_i \in Z, i \in [1; F]$, відомі ймовірності $p(z_i)$ появи цього сигналу на вході автомата в довільний момент часу. При завданні автомата у вигляді ГСА вхідні сигнали кодуються векторами, що утворені значеннями структурних змінних логічних умов $x_1, \dots, x_L$. У цьому випадку ймовірності появи вхідних сигналів можуть бути визначені, виходячи з ймовірностей $p(x_i)$ істинності сигналів ЛУ в кожний момент часу.

Нехай для всіх логічних умов $x_1, \dots, x_L$, що присутні в заданій ГСА, відомі ймовірності $p(x_1), \dots, p(x_L)$ істинності відповідних ЛУ в будь-який момент часу роботи автомата. Це дає можливість визначити для кожного операторної вершини середню кількість тактів, що затрачається на її виконання за один прохід ГСА. Оскільки в МПА стани пов'язані з операторними вершинами або їх виходами, середня кількість тактів, що витрачається на виконання операторних вершини, дорівнює середній кількості переходів автомата у відповідний стан за один прохід алгоритму.

Якщо $q(a_i)$ – середня кількість переходів у стан a_i , що здійснюються за один прохід алгоритму, то середня кількість тактів Q , що витрачається на виконання мікропрограми, може бути визначена сумою значень q усіх станів заданої ГСА:

$$Q = \sum_{i=0}^{M-1} q(a_i) \quad (51)$$

Для визначення Q при відомих значеннях $p(x_1), \dots, p(x_L)$ може бути використаний відомий машинно-орієнтований метод розрахунку часу виконання мікропрограми, заснований на вирішенні системи лінійних рівнянь.

При використанні методу додавання транзитних станів в загальному випадку можливі декілька варіантів додавання станів, кожен з яких відрізняється кількістю та розташуванням транзитних станів в межах ГСА. Використання при цьому методу урахування ймовірностей істинності логічних умов дозволяє оцінити для кожного варіанта збільшення середньої кількості тактів роботи МПА за один прохід алгоритму та обрати той варіант, при якому таке збільшення є мінімальним.

Запропонований метод збільшення розрядності структурних кодів станів. Метод передбачає примусове використання розрядності кодів станів R , більшої за мінімально достатнє значення $R_{\min} = \lceil \log_2 M \rceil$, де M – кількість станів автомата. Подібний підхід збільшує апаратні витрати в усіх блоках МПА з ОАП. Втім, це збільшення може бути компенсоване тим, що кількість ОП в операційній частині ОАП буде меншою, ніж при $R = R_{\min}$, за рахунок більшої кількості можливих способів часткового перебору варіантів кодування станів та вибору ОП в використовуваних методах алгебраїчного синтезу.

Запропонований метод алгебраїчного синтезу МПА з ОАП, який відповідає структурі, наведений на рис. 8. Метод використовує частковий перебір варіантів і передбачає використання фіксованої множини ОП та розглянутих вище методів додавання транзитних станів та урахування ймовірності істинності логічних умов. Основні етапи методу:

1. Вибір розрядності структурних кодів станів і завдання множини припустимих структурних кодів станів.
2. Визначення для кожного стану a_i значення $q(a_i)$.
3. Вибір стану $a(q_{\max})$ з максимальним значенням $q(a_i)$ серед усіх станів.
4. Перебір в деякій послідовності усіх припустимих структурних кодів станів.
5. Кодування стану $a(q_{\max})$ черговим обраним структурним кодом.
6. Спроба реалізувати усі переходи зі стану $a(q_{\max})$ за допомогою однієї із заданих ОП. Якщо реалізація можлива, перехід до кроку 7, інакше – до кроку 9.
7. Реалізація інших переходів автомата за допомогою заданих ОП або канонічним шляхом з урахуванням кроків 5 і 6.
8. Представлення результатів виконання кроків 5–7 у вигляді формального рішення задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП та додавання його до множини формальних рішень.
9. Якщо для кодування стану $a(q_{\max})$ перебрані усі можливі структурні коди, перехід до кроку 10, інакше – до кроку 5.
10. Аналіз сформованої множини формальних рішень задачі алгебраїчного синтезу з метою пошуку ефективних рішень.

Після проведення алгебраїчного синтезу МПА з ОАП йде наступний етап структурного синтезу, що передбачає синтез логічної схеми автомата шляхом синтезу усіх структурних блоків згідно з результатами алгебраїчного синтезу.

У **п'ятому розділі** проведені дослідження розроблених структур мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів.

В якості критерію оптимальності запропонованих структур МПА з ОАП є апаратні витрати в логічній схемі пристрою. Ефективність E^{U_i} структури U_i МПА з ОАП визначаються виразом

$$E^{U_i} = \frac{H^{U_K}}{H^{U_i}}, \quad (52)$$

де H^{U_K} , H^{U_i} – чисельно виражені витрати апаратури в МПА з канонічною структурою та в еквівалентному МПА з ОАП зі структурою U_i відповідно. Структура U_i МПА з ОАП є більш ефективною за апаратними витратами у порівнянні з канонічною структурою МПА у випадку $E^{U_i} > 1$, причому економія апаратних витрат становить $(E^{U_i} - 1)/E^{U_i}$ відсотків від витрат у канонічній структурі.

Кожна з величин H^{U_K} та H^{U_i} є сумою чисельно виражених апаратних витрат у всіх блоках відповідної структури. Для МПА з канонічною структурою

H^{U_K} визначається виразом (53), для структур U_1-U_4 – виразами (54) – (57) відповідно.

$$H^{U_K} = H_{C\Phi\Pi}^{U_K} + H_{P\Pi}^{U_K} + H_{C\Phi M O}^{U_K}; \quad (53)$$

$$H^{U_1} = H_{O\check{q}}^{U_1} + H_{P\Pi}^{U_1} + H_Z^{U_1} + H_{C\Phi M O}^{U_1}; \quad (54)$$

$$H^{U_2} = H_{O\check{q}}^{U_2} + H_{P\Pi}^{U_2} + H_Z^{U_2} + H_{C\Phi M O}^{U_2}; \quad (55)$$

$$H^{U_3} = H_M^{U_3} + H_{O\check{q}}^{U_3} + H_{P\Pi}^{U_3} + H_Z^{U_3} + H_{C\Phi M O}^{U_3}; \quad (56)$$

$$H^{U_4} = H_M^{U_4} + H_{O\check{q}}^{U_4} + H_{P\Pi}^{U_4} + H_Z^{U_4} + H_{C\Phi M O}^{U_4}. \quad (57)$$

Дослідження проведені шляхом VHDL-моделювання із використанням базису ПЛІС FPGA компанії Xilinx. Апаратурні витрати вимірюються в LUT-елементах. В якості елементного базису для проведення синтезу використані ПЛІС серії Spartan-3. Експериментальні дослідження проведені в САПР Xilinx ISE 9.2 Webpack.

Запропоновано методику проведення експериментальних досліджень ефективності МПА з ОАП, згідно з якою кожен з блоків досліджуваних структур ототожнюється з одним із стандартних функціональних блоків цифрових систем, таких як комбінаційна логічна схема (КЛС), мультиплексор, регістр, блок арифметико-логічної операції тощо. Це дозволяє провести дослідження апаратурних витрат не для структурних блоків МПА, а для стандартних функціональних блоків. При цьому параметри автомата ототожнюються з параметрами стандартних функціональних блоків, а отримані результати поширюються на структурні блоки МПА.

Для досліджених стандартних функціональних блоків розроблені VHDL-моделі, за допомогою яких отримані експериментальні значення апаратурних витрат для різних параметрів блоків. На основі експериментальних даних сформовані апроксимовані аналітичні вирази, що можуть виступати в якості складових у виразах (53)-(57). Наприклад, для визначення апаратурних витрат на реалізацію КЛС, що імплементує систему булевих рівнянь, запропонований наступний вираз:

$$H_{KЛС} = k_1(H_{\&} + H_{\vee}) = k_1\left(\frac{q \cdot s}{10} + \frac{t \cdot l}{4}\right), \quad (58)$$

де $H_{\&}$, $H_{\vee}$ – апаратурні витрати в кон'юнктивній і диз'юнктивній частинах КЛС відповідно; q – кількість різних термів в системі рівнянь; s – кількість змінних у термі; t – кількість рівнянь; l – кількість термів в одному рівнянні; $k_1 = (0; 1]$ – коефіцієнт мінімізації, що враховує зменшення значення $H_{KЛС}$ завдяки застосуванню відомих методів мінімізації.

На основі аналітичних виразів, отриманих для стандартних функціональних блоків цифрових систем, побудовані вирази для визначення H^{U_K} , H^{U_1} та H^{U_2} для автомата Мілі (вирази 59–61 відповідно) і автомата Мура (вирази 62–64 відповідно), що являють собою залежності від параметрів МПА, наведених в табл. 1.

Параметри МПА

Позначення	Опис
M	кількість станів
R	розрядність коду стану
B	кількість переходів
N	кількість мікрооперацій
L	кількість логічних умов
N_d	кількість комбінаційних схем у блоці ОЧ
k_1	коефіцієнт мінімізації КЛС, $k_1 \in (0; 1]$
k_2	коефіцієнт складності схем КС у блоці ОЧ, $k_2 \in (0; \infty)$
k_3	частка переходів, що реалізуються за допомогою операцій переходів, від загального числа переходів B , $k_3 \in [0; 1]$
k_4	частка умовних переходів від загального числа переходів, $k_4 \in [0; 1]$
k_5	середня частка термів в одному рівнянні системи булевих рівнянь від загального числа термів, використовуваних у системі, $k_5 \in (0; 1)$
k_6	коефіцієнт раціональності використання базису блокової пам'яті ПЛІС FPGA стосовно базису LUT-елементів, $k_5 \in (0; \infty)$

$$H^{U_K} = k_1 \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 BR}{4} \right) + R + k_1 \frac{k_5 BN}{4}. \quad (59)$$

$$H^{U_1} = \left(k_2 R(N_d - 1) + k_1(1-k_3)k_5 \frac{BR}{4} + R \left(\frac{N_d}{2} + 1 - \lceil \log_2(N_d + 1) \rceil + \lceil \log_2 N_d \rceil \right) \right) + \\ + R + k_1 \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 B \lceil \log_2 N_d \rceil}{4} \right) + k_1 \frac{k_5 BN}{4}; \quad (60)$$

$$H^{U_2} = \left(k_2 R(N_d - 1) + k_1(1-k_3)k_5 \frac{BR}{4} + R \left(\frac{N_d}{2} + 1 - \lceil \log_2(N_d + 1) \rceil + \lceil \log_2 N_d \rceil \right) \right) + \\ + R + k_1 k_6 \left(\frac{MR}{10} + \frac{k_5 M \lceil \log_2 N_d \rceil}{4} \right) + k_1 \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 BN}{4} \right); \quad (61)$$

$$H^{U_K} = k_1 \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 BR}{4} \right) + R + k_1 k_6 \left(\frac{MR}{10} + \frac{k_5 MN}{4} \right). \quad (62)$$

$$\begin{aligned} H^{U_1} = & \left(k_2 R(N_d - 1) + k_1(1-k_3)k_5 \frac{BR}{4} + R \left(\frac{N_d}{2} + 1 - \lceil \log_2(N_d + 1) \rceil + \lceil \log_2 N_d \rceil \right) \right) + \\ & + R + k_1 \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 B \lceil \log_2 N_d \rceil}{4} \right) + \\ & + k_1 k_6 \left(\frac{MR}{10} + \frac{k_5 MN}{4} \right). \end{aligned} \quad (63)$$

$$\begin{aligned} H^{U_2} = & k_2 R(N_d - 1) + R \left(\frac{N_d}{2} + 1 - \lceil \log_2(N_d + 1) \rceil + \lceil \log_2 N_d \rceil \right) + \\ & + k_1(1-k_3) \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 BR}{4} \right) + \\ & + R + k_1 k_6 \left(\frac{MR}{10} + \frac{k_5 M \lceil \log_2 N_d \rceil}{4} \right) + k_1 k_6 \frac{k_5 MN}{4}. \end{aligned} \quad (64)$$

За допомогою виразів (59)–(64) проведені дослідження ефективності запропонованих структур U_1 і U_2 МПА з ОАП у порівнянні з канонічним МПА. Ефективність даних структур визначається за виразом (52). В ході досліджень розглянуті чотири класи складності МПА відповідно до табл. 2.

Таблиця 2

Класи складності МПА			
Клас складності	M	R	B
1 (мала)	100	7	200
2 (середня)	500	9	1000
3 (велика)	1000	10	2000
4 (надвелика)	2000	11	4000

Для даних класів складності досліджень вплив на ефективність E^{U_1} та E^{U_2} окремих аргументів з табл. 1, які не є визначальними для класу складності МПА, а саме: N , N_d , $k_1 - k_6$. В процесі досліджень для незмінних аргументів обрані

наступні значення: $N=100$; $N_d=6$; $k_1=0,8$; $k_2=1$; $k_3=0,9$; $k_4=0,75$; $k_5=0,5$; $k_6=0,5$.

Серед досліджених структур найбільшу ефективність продемонструвала структура U_2 МПА Мура. Для даної структури вибіркові результати різних експериментів зібрані в табл. 3 і демонструють сукупності значень параметрів МПА, при яких $E^{U_2} \geq 1,1$.

Таблиця 3

Узагальнені результати дослідження МПА Мура U_2

Клас складності	Параметр								E^{U_2}
	N	N_d	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	
1	50	8	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,961
	200	16	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,193
	1000	8	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,146
	100	8	0,9	1	0,9	0,75	0,5	1	1,114
	100	6	0,8	5	0,9	0,75	0,5	0,1	1,107
	200	4	0,9	1	0,3	0,75	0,5	0,1	1,100
2	200	32	0,8	1	0,8	0,75	0,5	0,1	1,501
	300	64	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,251
	100	32	0,8	1	0,9	0,75	0,5	1	1,139
	200	15	0,8	7	0,75	0,75	0,5	0,1	1,124
	100	8	0,8	1	0,2	0,75	0,5	0,1	1,112
	1000	64	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,107
3	200	64	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,688
	1000	64	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,208
	500	128	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,191
	200	32	0,8	5	0,7	0,75	0,5	0,1	1,178
	200	16	0,8	1	0,25	0,75	0,5	0,1	1,130
	200	64	0,9	1	0,95	0,75	0,4	1	1,103
4	200	32	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	2,214
	300	32	0,8	8	0,9	0,75	0,5	0,1	1,444
	500	128	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,393
	2000	32	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,164
	200	64	0,8	1	0,9	0,75	0,5	1	1,116
	300	16	0,8	1	0,2	0,75	0,5	0,1	1,101

Структура U_2 МПА Мура демонструє ефективність для усіх класів складності, дозволяє за певних умов отримати виграш в апаратних витратах у випадку великої кількості мікрооперацій N , за відсутності блокової пам'яті ПЛІС ($k_6=1$), при використанні операцій переходів високої складності ($k_2 > 1$), за умови реалізації незначної кількості мікропрограмних переходів операційним способом ($k_3 < 0,5$) та в інших випадках. Таким чином, область ефективного застосування МПА Мура зі структурою U_2 є досить широкою і в цілому може бути визначена набором наступних діапазонів значень досліджуваних параметрів: $N \leq 1000$, $N_d \in [16; 128]$, $k_2=1$, $k_3 \leq 0,9$, $k_6 \leq 0,1$. Для даної структури значення ефективності 1,5 і вище досягне без істотного обмеження інших параметрів автомата.

Одержувана при цьому економія понад 30 % витрат апаратури дозволяє розглядати МПА Мура зі структурою U_2 в якості високоефективної альтернативи еквівалентному МПА Мура з канонічною структурою.

Також досліджені структури U_1 МПА Мілі, U_1 МПА Мура, U_2 МПА Мілі, для яких визначені області їх ефективного застосування як сукупність діапазонів значень параметрів, за яких $E^{U_i} \geq 1,1$. Виявлено, що усі досліджені структури за певних умов демонструють ефективність за критерієм апаратурних витрат у порівнянні з канонічним МПА. Основними вимогами ефективного застосування даних структур є відносно невелика кількість формованих мікрооперацій ($N \approx 50$), можливість вільного використання блоків вбудованої пам'яті ПЛІС ($k_6 \leq 0,1$) та реалізація переважної більшості мікропрограмних переходів операційним шляхом ($k_3 \geq 0,9$). Усі досліджені структури, окрім МПА Мура U_2 , демонструють приблизно однакову ефективність на рівні 1,12, що відповідає економії близька 11 % апаратурних витрат у порівнянні з канонічним МПА.

Проведені дослідження ефективності автоматичного синтезу МПА засобами САПР Xilinx Vivado у порівнянні із синтезом МПА на основі принципу операційного перетворення кодів станів за критерієм апаратурних витрат. Метою експерименту є обґрунтування доцільності використання МПА з ОАП в якості альтернативи МПА, синтезованого із використанням вбудованих методів САПР. За аналогією з (52) ефективність МПА з ОАП $E^{U_{OAP}}$ визначається виразом

$$E^{U_{OAP}} = \frac{H^{U_{САПР}}}{H^{U_{OAP}}}, \quad (65)$$

де $H^{U_{САПР}}$ – виражені в LUT-елементах апаратурні витрати, визначені шляхом синтезу заданого МПА засобами САПР Xilinx Vivado за VHDL-моделлю, рекомендованою компанією Xilinx для опису кінцевих автоматів; $H^{U_{OAP}}$ – виражені в LUT-елементах апаратурні витрати, визначені шляхом синтезу еквівалентного МПА з ОАП засобами САПР Xilinx Vivado за VHDL-моделлю, що відповідає принципу операційного перетворення кодів станів.

Дослідження проведені для п'яти абстрактних ГСА, що мають наступні властивості:

1. ГСА відтворює лише функцію переходів автомата і не містить інформації про функцію виходів (усі операторні вершини є пустими). Це дозволяє визначити апаратурні витрати на реалізацію саме функції переходів.

2. ГСА має регулярну структуру, тобто являє собою послідовність однакових фрагментів. Такий підхід, по-перше, спрощує масштабування ГСА шляхом збільшення кількості фрагментів, а по-друге, дозволяє автоматизувати процес генерації VHDL-коду.

Результати дослідження однієї з ГСА наведені в табл. 4, яка містить наступні стовпці:

M – кількість станів в досліджуваній ГСА;

$H^{U_{САПР}}$ – експериментальні значення величини $H^{U_{САПР}}$, отримані для різних значень параметру «fsm_extraction», що визначає спосіб кодування станів і метод автоматизованого синтезу схеми МПА засобами Xilinx Vivado;

$H^{U_{ОАП}}$ – експериментально отримані значення величини $H^{U_{ОАП}}$;

$E^{U_{ОАП}}$ – ефективність МПА з ОАП, отримана за виразом (65).

При визначенні вмісту стовпця $E^{U_{ОАП}}$ в якості значень $H^{U_{ОАП}}$ були взяті значення зі стовпця «gray», оскільки саме при цьому значенні параметру «fsm_extraction» були отримані найменші значення апаратних витрат для досліджуваної ГСА. Дослідження показали, що найбільш ефективне значення параметру «fsm_extraction» залежить від досліджуваної ГСА.

Таблиця 4

Дослідження ефективності синтезу МПА в САПР Xilinx Vivado

M	$H^{U_{САПР}}$, LUT					$H^{U_{ОАП}}$, LUT	$E^{U_{ОАП}}$
	one-hot	sequential	johnson	gray	auto		
100	112	44	419	43	112	21	2,05
200	250	94	1642	92	250	41	2,24
500	668	239	–	239	668	99	2,41
1000	1454	511	–	510	1454	190	2,68
2000	3334	1177	–	1166	3334	407	2,86

Для всіх досліджених ГСА отримані значення $E^{U_{ОАП}} > 1$, що дозволяє зробити висновок про доцільність використання принципу операційного перетворення кодів станів в якості альтернативи методам синтезу МПА, вбудованим в САПР, з метою зменшення апаратних витрат при проектуванні МПА в базисі ПЛІС за допомогою сучасних САПР.

Експериментальні дослідження запропонованих структур і методів синтезу наведені в п'ятому розділі дисертаційної роботи. Запропоновані структури і методи синтезу мікропрограмного автомата з операційним перетворення кодів станів порівняно з канонічною структурою мікропрограмного автомата потребують менших витрат апаратури на реалізацію логічної схеми автомата.

У **висновках** сформульовані наукові та практичні результати, що одержані в дисертаційній роботі.

У **додатках** наведено лістинги VHDL-моделей, приклад алгебраїчного синтезу МПА з операційним автоматом переходів, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, список публікацій здобувача.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі отримано нове рішення важливої наукової проблеми розробки, обґрунтування і дослідження теоретичних основ, структур, моделей і

методів, спрямованих на зменшення апаратних витрат в схемі мікропрограмного автомата за рахунок адаптації схеми автомата до характеристик імplementованого алгоритму керування. Відповідно до сформульованої мети в ході досліджень були отримані такі основні наукові та практичні результати:

1. Виконано аналіз сучасних теоретико-методичних та практичних концепцій синтезу і оптимізації цифрових пристроїв керування, який дозволив визначити основні класи пристроїв керування та сформулювати їх переваги та недоліки. Відзначено, що реалізація пристрою керування у вигляді мікропрограмного автомата характеризується максимальною швидкістю і максимальними витратами апаратури у порівнянні з іншими класами пристроїв керування. Це, з одного боку, дозволяє вважати мікропрограмний автомат найбільш перспективним способом імplementації пристроїв керування сучасних цифрових систем, для яких швидкість часто є визначальним фактором ефективності у зв'язку із високою складністю алгоритмів керування, з іншого боку – актуалізує наукову проблему мінімізації апаратних витрат в логічній схемі МПА з метою зменшення вартості цифрових систем та покращення інших споріднених характеристик.

Проведені дослідження та їх аналіз дозволили визначити основні сучасні напрями оптимізації цифрових пристроїв керування. До них належать багаторівневе перетворення логічних сигналів, спеціальне кодування станів автомата, використання особливостей елементного базису та інші. У зв'язку з цим, зменшення апаратних витрат в логічній схемі мікропрограмного автомата є важливою проблемою, яка породжує нові напрями прикладних досліджень зі створення нових структур і методів синтезу мікропрограмних автоматів з оптимізованими витратами апаратури.

2. Вперше запропоновано концепцію перетворення кодів станів МПА за допомогою кінцевої множини арифметико-логічних операцій (принцип операційного перетворення кодів станів). Її застосування приводить до представлення схеми формування переходів автомата у вигляді операційного автомата, кожна операція якого використовується для реалізації окремої підмножини мікропрограмних переходів. Такий підхід сприяє зменшенню апаратних витрат при реалізації функції переходів за рахунок багаторазового використання функціональних блоків операційного автомата.

3. Вперше виконано формалізацію принципу операційного перетворення кодів станів на основі математичного апарата універсальних алгебр. Функцію переходів МПА запропоновано представляти як кінцеву множину часткових функцій переходів, із кожною з яких ототожнюється власний закон перетворення певної підмножини кодів станів автомата. Враховано різні форми представлення функції переходів: абстрактну, структурну та проміжну, що виражається у завданні відповідних алгебр. Представлення часткових функцій переходів у вигляді підалгебр відповідних алгебр дозволяє визначити тотожність часткових функцій різних рівнів у вигляді ізоморфізмів.

4. На основі формалізованого представлення принципу операційного перетворення кодів станів вперше розроблені:

4.1. Вперше запропоновано структуру мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, в якому схема формування переходів

організована на базі операційного автомата переходів, що реалізує множину часткових функцій переходів. Функцією операційного автомата переходів є формування коду стану переходу автомата в залежності від його поточного стану та вхідних сигналів за допомогою кінцевої множини арифметико-логічних операцій. Такий підхід сприяє виграшу в апаратних витратах за рахунок того, що витрати апаратури в окремому функціональному блоці операційного автомата переходів не залежать від кількості мікропрограмних переходів, що реалізуються за допомогою даного блока.

4.2. Вперше запропоновано структуру операційної частини як складової операційного автомата переходів у вигляді сукупності операційних блоків, кожний з яких являє собою схемну реалізацію певної часткової функції переходів автомата. Доведено, що принцип операційного перетворення кодів станів припускає використання в якості вхідних сигналів функціональних блоків коду поточного стану та вхідних сигналів автомата.

4.3. Вперше розроблено та досліджено структуру операційного автомата переходів, складовими якої є операційна частина та регістр пам'яті МПА в якості єдиної реєстрової схеми операційного автомата. Результатом роботи операційного автомата переходів є код стану переходу МПА, який формується шляхом мультиплексування виходів функціональних блоків операційної частини операційного автомата під керуванням коду операції переходів. Той факт, що для формування коду операції переходів використовується код поточного стану разом із вхідними сигналами МПА, свідчить про можливість реалізації кожного мікропрограмного переходу за допомогою окремої операції.

Наявність в операційному автоматі переходів єдиного регістру, який одночасно виступає в якості регістру вхідних даних та регістру результату, дозволила класифікувати цей автомат одночасно як операційний автомат К-, І- та М-типів. Показано, що для зменшення апаратних витрат в операційному автоматі переходів можуть бути використані відомі методи формування еквівалентних мікрооперацій та узагальнених операторів.

4.4. Вперше запропоновано математичну модель мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. Модель представляє собою систему ізоморфізмів алгебр, складність якої визначається кількістю часткових функцій переходів автомата. Кожний ізоморфізм системи встановлює тотожність різних форм представлення часткової функції переходів, а їх система забезпечує унікальність і однозначність кодів станів, що є обов'язковою умовою синтезу автомата.

4.5. Запропоновано нову структуру мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, яка передбачає зіставлення операцій переходів окремим станам автомата на відміну від їх зіставлення окремим мікропрограмним переходам. Особливістю даної структури є менша кількість входів схеми формування кодів операцій переходів, що дозволяє реалізувати дану схему в базисі запам'ятовуючих пристроїв. Це дозволяє при використанні ПЛІС типу FPGA задіяти модулі блокової пам'яті кристалу ПЛІС, вивільнивши частину LUT-елементів для реалізації інших блоків автомата або цифрової системи. У проектах, в яких модульна пам'ять не використовується, даний підхід приводить до суттєвої економії ресурсів кристалу

ПЛІС, що рівнозначно зменшенню апаратурних витрат на реалізацію логічної схеми МПА.

4.6. Досліджено особливості реалізації функції виходів в МПА Мілі і Мура з операційним автоматом переходів. Проаналізовані операційний та канонічний способи реалізації функції виходів, для яких сформульовані умови доцільності використання.

5. Сформульовано нову наукову задачу алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. Для її вирішення запропоновано методологічну базу, яка містить наступні складові, що пропонуються вперше:

5.1. Метод структурного представлення процесу синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, згідно з яким будь-який метод синтезу представляється у вигляді сукупності окремих етапів та причинно-наслідкових зв'язків між ними. Кожна із запропонованих структур процесу синтезу може відповідати кільком методам синтезу і позиціонується як спосіб їх класифікації.

5.2. Метод використання транзитних станів, що дозволяє за певних умов уникнути застосування додаткових операцій переходів за рахунок додавання проміжних станів, зменшуючи, таким чином, апаратурні витрати в схемі операційного автомата переходів та схемі формування кодів операцій переходів.

5.3. Метод урахування імовірностей істинності логічних умов, використання якого дозволяє оцінити вплив додавання транзитних станів на середню кількість мікрокоманд, що виконуються за один цикл мікропрограми.

5.4. Метод збільшення розрядності кодів станів автомата, що передбачає використання більшої за мінімально достатню кількості двійкових розрядів і дозволяє збільшити кількість способів кодування станів та припустиму кількість транзитних станів при виконанні алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів.

6. Отримали подальший розвиток методи заміни вхідних змінних та зменшення кількості істотних вхідних змінних внаслідок їх застосування та адаптації до мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. В результаті отримані нові модифіковані структури МПА з операційним автоматом переходів, які можуть мати додаткове зменшення апаратурних витрат в схемі формування кодів операцій переходів та в операційному автоматі переходів у порівнянні зі структурами, що не використовують дані методи.

7. Вперше розроблено метод алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, який передбачає пошук формальних розв'язків задачі алгебраїчного синтезу виконується шляхом часткового перебору варіантів. Метод припускає збільшення кількості станів автомата за рахунок транзитних станів, враховує імовірності істинності логічних умов та реалізує Алгоритмічна спрямованість методу дозволяє його використання в системах автоматизованого проектування пристроїв керування цифрових систем.

8. Вперше проведені експериментальні дослідження ефективності запропонованих структур мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів, які дозволили визначити їх переваги згідно критерію апаратурних витрат у порівнянні з раніше відомими структурами. В якості методології дослідження

використано комп'ютерне моделювання із використанням мови опису апаратури VHDL, яке дозволило отримати аналітичні залежності апаратурних витрат в логічних схемах досліджуваних структур мікропрограмних автоматів від параметрів автомата та умов проектування. Для дослідження апаратурних витрат в логічній схемі мікропрограмного автомата використано удосконалений метод, який полягає в тому, що структурні блоки автомату та їх параметри ототожнюються зі стандартними функціональними блоками цифрових систем, а результати експериментальних досліджень, отримані для стандартних функціональних блоків, розповсюджуються на елементи досліджених структур МПА.

Дослідження показали, що найбільш ефективною серед запропонованих структур виявився мікропрограмний автомат Мура з операційним автоматом переходів, в якому операції переходів зіставляються окремим станам автомата. Визначено, що для цієї структури виграш в апаратурних витратах у порівнянні із мікропрограмним автоматом з канонічною структурою сягає в середньому 20-37 %, а за певних умов може перевищувати 50 %, що еквівалентне двократному зменшенню апаратурних витрат. Також визначено область ефективного застосування запропонованих структур мікропрограмних автоматів як сукупність діапазонів параметрів автомата.

Дослідження можливостей САПР Xilinx Vivado з автоматичного синтезу МПА за VHDL-моделлю показало, що реалізація функції переходів автомата із використанням методів, вбудованих в САПР, може бути менш ефективною за критерієм апаратурних витрат у порівнянні із використанням структур і методів синтезу мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів. Це свідчить про доцільність та ефективність застосування існуючих методів оптимізації мікропрограмних автоматів при проектуванні пристроїв за допомогою сучасних САПР цифрових систем.

9. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт Донецького національного університету імені Василя Стуса в рамках таких держбюджетних тем: НДР «Дослідження ефективності мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів» (номер ДР 0117U004097); НДР «Методологічні аспекти синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів» (номер ДР 0117U004098).

10. Практичні результати, що отримано, підтверджені актами впровадження та доводять коректність теоретичних положень дисертаційної роботи, високу ефективність розроблених структур, моделей, методів та методології. Результати дисертаційної роботи впроваджені: на підприємстві ТОВ «С-інжиніринг»; в науково-технічному спеціальному конструкторському бюро «Полісвіт» державного науково-виробничого підприємства «Об'єднання "Коммунар"»; в освітньому європейському проєкті ERASMUS+ «ALLIOT» – Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications; у навчальному процесі кафедри комп'ютерних інтелектуальних систем та мереж Одеського національного політехнічного університету при викладанні дисциплін «Технології проектування комп'ютерних систем» та «Проектування і діагностика систем критичного застосування».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бабаков Р. М. Операционное преобразование кодов состояний в микропрограммном автомате: монография. Винница: «ТВОРИ», 2019. 208 с.
2. Бабаков Р. М. Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Информационные технологии и компьютерная инженерия*. 2017. № 39. Т. 2. С. 35–41. (Журнал індексується міжнародною наукометричною базою Google Scholar).
3. Бабаков Р. М. Исследование аппаратных затрат в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2017. № 4. С. 106–115. (Входить до міжнародних наукометричних баз Web of Science, DOAJ, BASE, Index Copernicus, Google Scholar).
4. Бабаков Р. М. Математическая модель микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ». 2016. № 1 (22). С. 54–57. (Журнал індексується міжнародною наукометричною базою Google Scholar).
5. Бабаков Р. М. Обобщение математической модели микропрограммного автомата на счетчике. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2018. № 1. С. 100–109. (Входить до міжнародних наукометричних баз Web of Science, BASE, Index Copernicus, Google Scholar).
6. Бабаков Р. М. Промежуточная алгебра переходов в микропрограммном автомате. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2016. № 1. С. 64–73. (Входить до міжнародних наукометричних баз Web of Science, DOAJ, BASE, Index Copernicus, Google Scholar).
7. Бабаков Р. М. Синтез логической схемы микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 4. С. 96–99. (Журнал індексується міжнародною наукометричною базою Google Scholar).
8. Бабаков Р. М. Синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов методом полного перебора. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 1. С. 70–74. (Журнал індексується міжнародною наукометричною базою Google Scholar).
9. Бабаков Р. М. Урахування імовірності станів у мікропрограмному автоматі з операційним автоматом переходів. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2017. № 2. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/505/500>. (Входить до міжнародної наукометричної бази РІНЦ).
10. Бабаков Р. М. Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні*

науки. 2018. № 2. С. 103–107. (Журнал індексується міжнародною базою Google Scholar).

11. Babakov R. M. Using of method of replacement of input variables in microprogram finite-state machine with datapath of transitions. *Технологический аудит и резервы производства*. 2017. № 4/2 (36). С. 18–23. (Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, BASE, DOAJ, EBSCO, PIIЦ, Google Scholar).

12. Бабаков Р.М. Методологические аспекты синтеза микропрограммных автоматов с операционным автоматом переходов. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. № 2. С. 82–86. (Журнал індексується міжнародною базою Google Scholar).

13. Бабаков Р. М., Ярош И. В. Использование транзитных состояний в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ». 2016. № 1 (29). С. 56–64. (Журнал індексується міжнародною наукометричною базою Google Scholar).

14. Бабаков Р. М., Ярош И. В. Операционный автомат переходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ». 2015. № 1 (28). С. 33–40. (Журнал індексується міжнародною наукометричною базою Google Scholar).

15. Бабаков Р. М., Ярош И. В. Формирование кодов операций переходов в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ». 2015. Випуск 1 (20). С. 11–16. (Журнал індексується міжнародною наукометричною базою Google Scholar).

16. Баркалов А. А., Бабаков Р. М. Алгебраическая интерпретация микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. № 2. С. 22–29. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, INSPEC, EBSCO, Google Scholar).

17. Баркалов А. А., Бабаков Р. М. Модификация микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов и заменой входных переменных. *Управляющие системы и машины*. 2017. № 6. С. 35–40. (Входить до міжнародних наукометричних баз PIIЦ, Google Scholar).

18. Баркалов А. А., Бабаков Р. М. Операционная реализация функции выходов микропрограммного автомата. *Управляющие системы и машины*. 2017. № 3. С. 57–62. (Входить до міжнародних наукометричних баз PIIЦ, Google Scholar).

19. Баркалов А. А., Бабаков Р. М. Операционное формирование кодов состояний в микропрограммных автоматах. *Кибернетика и системный анализ*. 2011. № 2. С. 21–26. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, INSPEC, EBSCO, Google Scholar).

20. Баркалов А. А., Бабаков Р. М. Операционный автомат переходов с дополненным множеством операций переходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка»*. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». 2011. № 14 (188). С. 80–84. (Журнал індексується міжнародною наукометричною базою Google Scholar).

21. Баркалов А. А., Бабаков Р. М. Определение области эффективного применения микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Кибернетика и системный анализ*. 2018. № 3. С. 27–37. (Входит до міжнародних наукометричних баз Scopus, INSPEC, EBSCO, Google Scholar).

22. Баркалов А. А., Бабаков Р. М. Структурная классификация методов синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Кибернетика и системный анализ*. 2019. № 2. С. 3–9. (Входит до міжнародних наукометричних баз Scopus, INSPEC, EBSCO, Google Scholar).

23. Баркалов А. А., Бабаков Р. М. Уменьшение максимального количества существенных входных переменных в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Управляющие системы и машины*. 2018. № 2. С. 42–50. (Входит до міжнародних наукометричних баз РИНЦ, Google Scholar).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

24. Бабаков Р. М. Микропрограммный автомат с операционным автоматом переходов. *Тези доповідей Міжнародної наукової конференції «Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку», присвяченої 60-річчю заснування Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України (м. Київ, 13–15 грудня 2017 р.)* Київ, 2017. С. 4–6.

25. Бабаков Р. М. Синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов методом полного перебора. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Інформатика та системні науки (ІСН-2017)»* (м. Полтава, 16–18 березня 2017 р.) Полтава: ПУЕТ, 2017. С. 23–25. (Входит до міжнародної наукометричної бази Google Scholar).

26. Баркалов А. А., Бабаков Р. М. Операционное формирование переходов в управляющих автоматах. *Матеріали доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів, студентів «Сучасна інформаційна Україна: інформатика, економіка, філософія»* (м. Донецьк, 14–15 травня 2009 р.) Донецьк, 2009. Т. 1. С. 18–20. (Входит до міжнародної наукометричної бази Google Scholar).

27. Babakov R., Barkalov A., Titarenko L. Research of Efficiency of Microprogram Final-State Machine with Datapath of Transitions. *Proceedings of 14th International Conference «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» (CADSM)* (Україна, Поляна, 21–25 лютого 2017 р.) Львів, 2017. С. 203–206. (Входит до міжнародної наукометричної бази Scopus).

28. Barkalov A. A., Titarenko L. A., Babakov R. M. Compositional Microprogram Control Unit with Operational Automaton of Transitions. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2012)* (Kharkov, Ukraine, September 14–17). Kharkov, 2012. P. 151–154. (Входит до міжнародної наукометричної бази Scopus).

29. Barkalov A. A., Titarenko L. A., Babakov R. M. Compositional Microprogram Control Unit with Operational Automaton of Transitions. *12th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems* (Velke Karlovice, Czech Republic, September 25–27), Velke Karlovice, 2013. P. 239–244. (Входит до міжнародних наукометричних баз Scopus, Google Scholar).

30. Barkalov A., Babakov R. Structural representation of synthesis methods of finite state machine with datapath of transitions. *Conference Proceedings of 2018 IEEE 9th*

International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2018) (м. Київ, 24–27 травня 2018 р). Київ, 2018. С. 242–246. (Входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

АНОТАЦІЯ

Бабаков Р.М. Структури і методи синтезу мікропрограмних автоматів з операційним перетворенням кодів станів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2020 р.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову проблему розробки, обґрунтування і дослідження теоретичних основ, структур, моделей і методів, спрямованих на зменшення апаратних витрат у схемі мікропрограмного автомата за рахунок адаптації схеми автомата до характеристик імплементованого алгоритму керування. Проведено аналіз сучасних теоретико-методичних та практичних концепцій синтезу і оптимізації цифрових пристроїв керування, визначені основні класи пристроїв керування та операційних автоматів, сформульовані їх переваги та недоліки. Визначені основні сучасні напрями оптимізації цифрових пристроїв керування та запропоновано новий підхід до зменшення апаратних витрат в логічній схемі мікропрограмного автомата завдяки принципу перетворення кодів станів за допомогою кінцевої множини арифметико-логічних операцій (принцип операційного перетворення кодів станів). Виконано формалізацію принципу операційного перетворення кодів станів на основі математичного апарата універсальних алгебр. Розроблено структуру операційного автомата переходів, призначеного для перетворення кодів станів мікропрограмного автомата; структуру мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, що допускає відповідність арифметико-логічних операцій окремим мікропрограмним переходам; структуру мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, що припускає відповідність арифметико-логічних операцій станам автомата. Розроблено математичну модель мікропрограмного автомата з операційним перетворенням кодів станів у вигляді системи ізоморфізмів алгебр. Сформульовано наукові задачі структурного і алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним перетворенням кодів станів. Запропоновано метод структурного представлення процесу синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів; метод використання транзитних станів; метод урахування імовірностей істинності логічних умов; метод збільшення розрядності кодів станів автомата. Набули подальшого розвитку методи заміни вхідних змінних та зменшення кількості істотних вхідних змінних. Запропоновано метод алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. Набуті практичні результати підтверджені актами впровадження і доводять коректність теоретичних положень дисертаційної роботи, високу ефективність розроблених структур, моделей і методів.

Ключові слова: мікропрограмний автомат, операційний автомат, мінімізація апаратних витрат, структурний синтез, операційне перетворення кодів станів.

АННОТАЦИЯ

Бабаков Р.М. Структуры и методы синтеза микропрограммных автоматов с операционным преобразованием кодов состояний. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2020.

В диссертационной работе решена актуальная научная проблема разработки, обоснования и исследования теоретических основ, структур, моделей и методов, направленных на уменьшение аппаратных затрат в схеме микропрограммного автомата за счет адаптации схемы автомата к характеристикам имплементируемого алгоритма управления.

Предложен принцип преобразования кодов состояний с помощью конечного множества арифметико-логических операций (принцип операционного преобразования кодов состояний), применение которого приводит к представлению схемы формирования переходов автомата в виде операционного автомата, в котором каждая операция используется для реализации отдельного подмножества микропрограммных переходов.

Предложена формализация принципа операционного преобразования кодов состояний на основе математического аппарата универсальных алгебр, согласно которой функция переходов микропрограммного автомата представляется конечным множеством частичных функций переходов, с каждой из которых отождествляется собственный закон преобразования некоторого подмножества кодов состояний автомата.

Разработаны структура операционного автомата переходов, предназначенного для преобразования кодов состояний микропрограммного автомата, в которой множество реализованных арифметико-логических операций соответствует множеству частичных функций переходов; структура микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов, допускающая сопоставление арифметико-логических операций отдельным микропрограммным переходам; структура микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов, допускающая сопоставление арифметико-логических операций отдельным состояниям автомата.

Разработана математическая модель микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов, представляющая собой систему изоморфизмов, в которой каждый изоморфизм выражает единый способ интерпретации и преобразования кодов состояний автомата в рамках некоторого подмножества микропрограммных переходов.

Сформулированы научные задачи структурного и алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным преобразованием кодов состояний, для решения которых разработана соответствующая методологическая база: метод структурного представления процесса синтеза микропрограммного автомата с

операционным автоматом переходов, позволяющий классифицировать методы синтеза данного класса микропрограммных автоматов; метод использования транзитных состояний, позволяющий избежать использования дополнительных операций переходов за счет дополнения промежуточных состояний, уменьшив, таким образом, аппаратные затраты в схеме операционного автомата переходов и схеме формирования кодов операций переходов; метод учета вероятностей истинности логических условий, использование которого позволяет оценить влияние добавления транзитных состояний на среднее количество микрокоманд, выполняемых в одном цикле микропрограммы; метод увеличения разрядности кодов состояний автомата, который предполагает использование большего, чем минимально достаточное, количества двоичных разрядов и позволяет увеличить количество способов кодирования состояний и допустимое количество транзитных состояний при выполнении алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов.

Получили дальнейшее развитие методы замены входных переменных и уменьшения количества существенных входных переменных вследствие их адаптации к микропрограммному автомату с операционным автоматом переходов. В результате получены модифицированные структуры микропрограммных автоматов с операционным автоматом переходов, которые характеризуются дополнительным уменьшением аппаратных затрат по сравнению со структурами, которые не используют данные методы.

Предложен метод алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов, который предполагает поиск формальных решений задачи алгебраического синтеза путем частичного перебора вариантов. Метод допускает увеличение количества состояний автомата за счет транзитных состояний и учитывает вероятности логических условий. Алгоритмическая направленность метода способствует его использованию в системах автоматизированного проектирования устройств управления цифровых систем.

Проведены экспериментальные исследования эффективности предложенных структур микропрограммных автоматов с операционным автоматом переходов, которые позволили определить их преимущества по критерию аппаратных затрат в сравнении с ранее известными структурами. По результатам проведенного компьютерного моделирования с использованием языка VHDL получены аналитические зависимости аппаратных затрат в логических схемах исследуемых структур микропрограммных автоматов от параметров автомата и условий проектирования.

Усовершенствован метод исследования аппаратных затрат в логической схеме микропрограммного автомата, который заключается в том, что структурные блоки автомата и их параметры отождествляются со стандартными функциональными блоками цифровых систем, а результаты экспериментальных исследований, проведенные для стандартных функциональных блоков, распространяются на элементы исследуемых структур автоматов.

Полученные практические результаты подтверждены актами внедрения и доказывают корректность теоретических положений диссертационной работы, высокую эффективность разработанных структур, моделей и методов.

Ключевые слова: микропрограммный автомат, операционный автомат, минимизация аппаратных затрат, структурный синтез, операционное преобразование кодов состояний.

ABSTRACT

Babakov R.M. Structures and methods of synthesis of finite state machines with operational transformation of state codes. – Manuscript.

Thesis for the Doctor of Technical Sciences degree in the specialty 05.13.05 – Computer systems and components. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

In the dissertation, the actual scientific problem of development, foundation and research of theoretical bases, structures, models and methods aimed at reducing of hardware expenses in the logical circuit of the finite state machine, was solved by adaptation of the FSM circuit to the characteristics of the implemented control algorithm. The analysis of modern theoretical, methodological and practical concepts of synthesis and optimization of digital control units was carried out, the basic classes of control units and datapaths were defined and their advantages and disadvantages were formulated. The main modern ways of digital control units optimization were identified and new approach to reducing hardware expenses in the logical circuit of finite state machine based on principle of transformation of state codes using the finite set of arithmetical and logical operations (the principle of operational transformation of state codes), was proposed. Formalization of the principle of operational transformation of state codes on the basis of the mathematical apparatus of universal algebras has been performed. Developed the structure of datapath of transitions intended for transformation of state codes of the finite state machine; the structure of a finite state machine with datapath of transitions, which allows conformity of arithmetic-logical operations to separate microprogram transitions; the structure of the finite state machine with datapath of transitions, which allows the conformity of arithmetic-logical operations to separate states. Mathematical model of a finite state machine with operational transformation of state codes, which is a system of isomorphisms of algebras, was developed. The scientific problems of structural and algebraic synthesis of the finite state machine with operational transformation of states codes were formulated. Proposed method of structural representation of the synthesis process of finite state machine with datapath of transitions; method of transit states using; method of accounting of probabilities of the truth of logical conditions; method of increasing capacity of state codes. Methods for replacing input variables and reducing the number of significant input variables were further developed. The method of algebraic synthesis of a finite state machine with datapath of transitions was proposed. The obtained practical results were confirmed by the acts of implementation and prove the correctness of the theoretical positions of the dissertation, the high efficiency of the developed structures, models and methods.

Keywords: finite state machine, datapath, hardware expenses minimization, structural synthesis, operational transformation of state codes.