УДК 004.2:004.94

Р.М. БАБАКОВ
Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, Україна,
e-mail: *newcpld@gmail.com*.

О.О. БАРКАЛОВ
Університет Зеленогурський, Зелена Гура, Польща, Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, Україна, e-mail: *A.Barkalov@iie.uz.zgora.pl*.

МАТРИЧНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМАЛЬНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ ЗАДАЧІ АЛГЕБРАЇЧНОГО СИНТЕЗУ МІКРОПРОГРАМНОГО АВТОМАТА З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ

Анотація. Запропоновано новий спосіб визначення формальних розв'язків задачі алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. Цей спосіб полягає у представленні множини переходів автомата у вигляді матриці, яка містить інформацію про поточне кодування станів і якій зіставлено об'єднану матрицю операцій, що містить усі можливі варіанти перетворення кодів станів за допомогою заданої множини операцій переходів. Такий підхід дає змогу одночасно зіставити всі операції переходів кожному автоматному переходу, що зменшує кількість перевірок на наявність формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу. Результатом є скорочення часу виконання будь-яких алгоритмів алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів, що базуються на переборі варіантів використання операцій для реалізації автоматних переходів.

Ключові слова: мікропрограмний автомат, операційний автомат переходів, граф-схема алгоритму, алгебраїчний синтез, матриця переходів, об'єднана матриця операцій.

ВСТУП

Пристрій керування (ПК) входить до складу будь-якої сучасної обчислювальної системи, де виконує функцію координації роботи її компонентів відповідно до заданого алгоритму керування [1]. Відомо чимало методів оптимізації та відповідних структурних модифікацій ПК, що дають змогу покращити такі характеристики схеми пристрою, як апаратурні витрати, швидкодія, енергоспоживання тощо [2]. Невпинне розширення сфери застосування обчислювальних систем, розвиток елементної бази та поява нових підходів до проєктування пристроїв керування зумовлюють актуальність наукової проблеми розроблення нових та адаптації наявних формальних методів синтезу і оптимізації ПК [3].

Якщо одним із основних критеріїв ефективності схеми ПК є швидкодія, для імплементації ПК доцільно використовувати структурну модель мікропрограмного автомата (МПА) [4, 5]. Ця модель характеризується тим, що функції переходів і виходів реалізуються з використанням схем, що спроєктовані за відповідними системами канонічних Булевих рівнянь. Це дає можливість МПА виконувати будь-який багатоспрямований мікропрограмний перехід, що залежить від кількох вхідних сигналів, за один такт сигналу синхронізації. У результаті досягається максимальна швидкодія у порівнянні з іншими структурними моделями ПК, але одночасно схема МПА характеризується максимальними витратами апаратури. Це обмежує застосування МПА та формує наукову проблему оптимізації апаратурних витрат у його логічній схемі. Одним із способів її розв'язання є розроблення модифікованих структурних моделей МПА та методів їхнього синтезу з меншими апаратурними витратами у схемі пристрою порівняно з канонічним МПА [1, 2, 5].

У контексті зазначеної наукової проблеми в запропонованій роботі розглянуто МПА з операційним автоматом переходів (МПА з ОАП), що характеризується оптимізованими витратами апаратури в частині схеми, яка реалізує функцію переходів [6, 7]. У наведеній структурній моделі МПА автоматні переходи здійснюються завдяки виконанню арифметико-логічних операцій над кодами станів за допомогою спеціалізованого ОАП. Для використання алгебраїчної моделі МПА з ОАП, запропонованої в [8], обов'язковим є виконання етапу алгебраїчного синтезу, що передує етапу синтезу його логічної схеми. Задачею алгебраїчного синтезу є реалізація переходів автомата за допомогою заданого набору операцій. Алгебраїчний синтез МПА з ОАП натепер є недостатньо формалізованим. Метою цієї роботи є розроблення методу визначення формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП на основі матричного представлення переходів.

1. ФОРМАЛЬНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ АЛГЕБРАЇЧНОГО СИНТЕЗУ МПА З ОАП

Відомо, що МПА з ОАП може бути заданий різними способами, одним з яких є граф-схема алгоритму (ГСА) [1, 5]. Як приклад розглянемо ГСА G, наведену на рис. 1. На цій схемі позначено стани автомата Мура [1], ГСА G містить $M = 7$ станів $a_0 – a_6$, для кодування яких достатньо $R = 3$ двійкових розрядів. У ГСА аналізується одна логічна умова (вхідний сигнал) x_1 та формуються п'ять мікрооперацій (вихідних сигналів) $y_1 – y_5$.

Перед синтезом логічної схеми МПА з ОАП має бути проведений так званий алгебраїчний синтез, який полягає у виконанні трьох вимог:

1) кожному стану автомата повинен відповідати унікальний код із певної множини кодів станів;

2) кожному автоматному переходу повинна відповідати певна операція переходів (ОП), що використовує скалярну або векторну інтерпретацію кодів станів [6];

3) у результаті повинна бути досягнута коректна реалізація усіх мікропрограмних переходів, а саме для будь-якого переходу код поточного стану повинен перетворюватись у код наступного стану (стану переходу) за допомогою ОП, що зіставлена цьому переходу.

Виконання цих вимог будемо розглядати як задачу алгебраїчного синтезу МПА з ОАП, для розв'язання якої можуть бути потенційно застосовані різні методи з різними початковими даними [9].

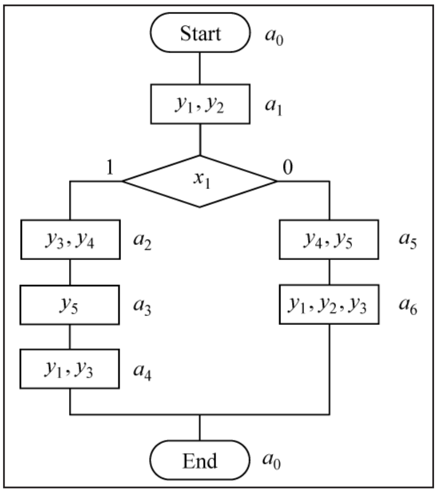

Рис. 1. ГСА G

Розглянемо простіший випадок, коли множина операцій переходів O відома до початку алгебраїчного синтезу і є фіксованою. Це дає змогу зосередитись на зіставленні відомих ОП наявним мікропрограмним переходам. Якщо вимоги 1–3 виконано, будемо вважати, що отримано формальний розв'язок задачі алгебраїчного синтезу. Це свідчить про те, що за обраного кодування станів автомата переходи ГСА можна реалізувати за допомогою заданої множини ОП, тобто імплементація ГСА за допомогою МПА з ОАП можлива.

Нехай задано множину ОП $O = \{O_1, O_2, O_3\}$, що містить такі елементи:

$$O_1 : K(a_j) = (K(a_i) + 1) \bmod 8, \tag{1}$$

$$O_2 : K(a_j) = (K(a_i) + 2) \bmod 8, \tag{2}$$

$$O_3 : K(a_j) = (K(a_i) + 3) \bmod 8, \tag{3}$$

де a_i — поточний стан автомата; a_j — стан переходу; $K(a_i)$, $K(a_j)$ — їхні коди відповідно. Зазначимо, що у цих ОП коди станів інтерпретуються як десяткові цілі числа без знака, а результат операції штучно зводиться до діапазону [0; 7].

На рис. 2 наведено графічне представлення формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП для заданої множини ОП. Для спрощення логічні умови та мікрооперації на рис. 2 не відображені, але відповідають наведеним на рис. 1.

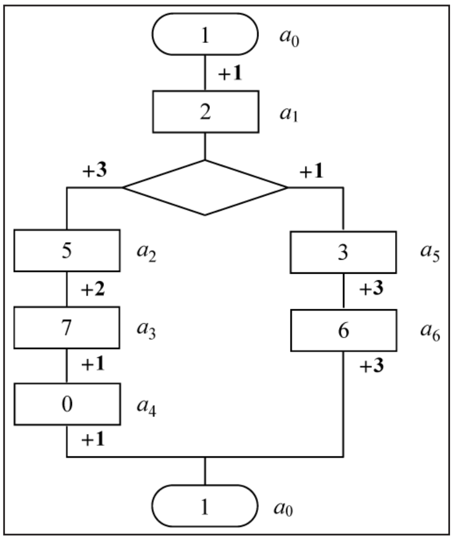

Рис. 2. Графічне представлення формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП

У кожній вершині записано десяткову інтерпретацію коду відповідного стану, а кожний перехід позначено однією із ОП: +**1** для O_1; +**2** для O_2; +**3** для O_3. Наприклад, перехід зі стану a_6 з кодом $K(a_6) = 6_{10} = 110_2$ у стан a_0 з кодом $K(a_0) = 1_{10} = 001_2$ виконується за допомогою операції додавання константи $3_{10} = 011_2$, при цьому старший розряд результату не враховують.

Знайдений формальний розв'язок задачі алгебраїчного синтезу можна представити у вигляді таблиці за аналогією до прямої структурної таблиці канонічного МПА (табл. 1) [1, 5]. Такий вигляд зручніший для випадку автоматизованого синтезу схеми автомата.

Розглянемо структуру табл. 1. Вона містить такі стовпчики: a_i — поточний стан автомата; $K(a_i)$ — десятковий код поточного стану; a_j — стан переходу; $K(a_j)$ — десятковий код стану переходу; X — набір логічних умов, що пе-

Таблиця 1. Табличне представлення формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу

a_i	$K(a_i)$	a_j	$K(a_j)$	X	O_{ij}	Y	h
a_0	1	a_1	2	1	O_1	—	1
a_1	2	a_2	5	x_1	O_3	y_1, y_2	2
		a_5	3	$\bar{x}_1$	O_1		3
a_2	5	a_3	7	1	O_2	y_3, y_4	4
a_3	7	a_4	0	1	O_1	y_5	5
a_4	0	a_0	1	1	O_1	y_1, y_3	6
a_5	3	a_6	6	1	O_3	y_4, y_5	7
a_6	6	a_0	1	1	O_3	y_1, y_2, y_3	8

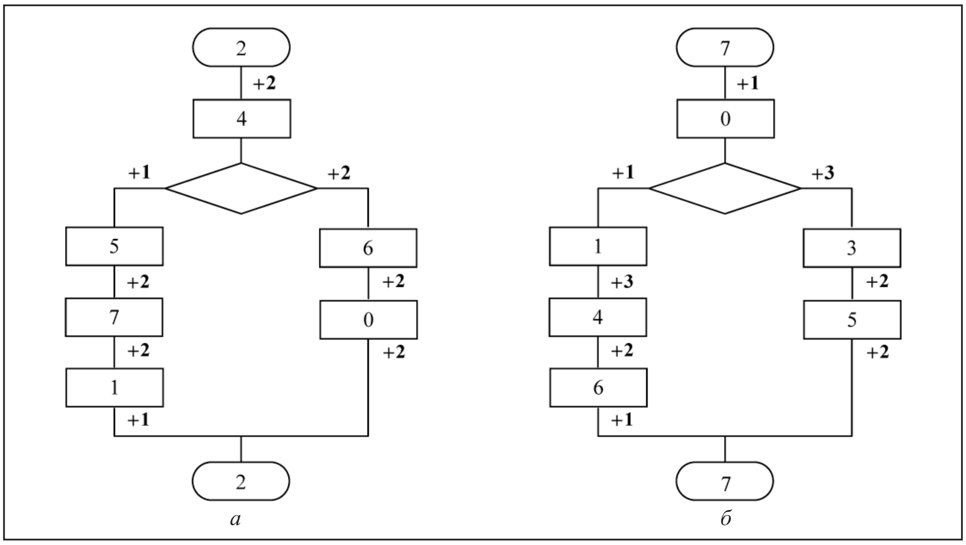

Рис. 3. Схеми формальних розв'язків задачі алгебраїчного синтезу для ГСА *G* із використанням двох (*а*) та трьох (*б*) різних операцій переходів

ревіряються під час переходу зі стану a_i у стан a_j; O_{ij} — ОП, що реалізує перетворення $K(a_i)$ у $K(a_j)$; Y — набір мікрооперацій, що формуються під час перебування автомата у стані a_i; h — номер переходу.

Зазначимо, що в загальному випадку для заданої ГСА і заданої множини ОП можливе існування декількох формальних розв'язків задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП. На рис. 3, *а* показано формальний розв'язок для випадку використання двох ОП, а на рис. 3, *б* — для випадку використання трьох ОП, але з іншим кодуванням станів.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМАЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ АЛГЕБРАЇЧНОГО СИНТЕЗУ

Формальні розв'язки (див. рис. 3) мають різні способи кодування станів та кількість використовуваних ОП. Так, у формальному розв'язку (див. рис. 3, *а*) використовуються тільки дві ОП з трьох (O_1, O_2), що сприяє зменшенню апаратурних витрат у схемі МПА. Проведені дослідження показали, що для ГСА G та ОП O_1–O_3 загалом існує 216 формальних розв'язків, які утворюють множину формальних розв'язків задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП. Якщо для кожного формального розв'язку синтезувати схему автомата (наприклад, у базисі ПЛІС FPGA [5, 10]) та отримати кількісні значення апаратурних витрат, можна із елементів множини формальних розв'язків сформувати множину ефективних розв'язків, що зумовить виграш в апаратурних витратах порівняно з еквівалентним МПА з канонічною структурою. Своєю чергою, на множині ефективних розв'язків можна знайти такий, що зумовить максимальний виграш в апаратурних витратах (оптимальний розв'язок). Якщо таких розв'язків виявиться декілька, можна говорити про множину оптимальних розв'язків задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП.

Таким чином, у процесі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП існує проблема пошуку формальних розв'язків. Він може здійснюватись за різними алгоритмами, зокрема і повним перебором варіантів, де будь-який з них може виявитись формальним розв'язком. Повний перебір складається з двох переборів, що виконуються незалежно.

Перебір усіх варіантів зіставлення допустимих кодів станам автомата. Нехай задана ГСА містить M станів, для кодування яких достатньо $R = \rceil \log_2 M \lceil$ двійкових розрядів. Величина 2^R визначає кількість допустимих кодів станів, кожен з яких може бути зіставлений одному із M станів автомата. Кількість варіантів зіставлення 2^R допустимих кодів M станам можна визначити згідно з комбінаторною формулою розміщення без повторів:

$$N_1 = A_{2^R}^M = \frac{(2^R)!}{(2^R - M)!}. \tag{4}$$

У випадку ГСА G з параметрами $M = 7$, $R = 3$ згідно з (4) маємо $N_1 = 40320$ варіантів перебору.

Перебір усіх варіантів зіставлення ОП автоматним переходам. Нехай задана ГСА містить B переходів, кожному з яких може бути зіставлена одна з $N_{\text{ОП}}$. Оскільки в МПА з ОАП окрема ОП може бути зіставлена будь-якій кількості переходів, кількість таких зіставлень можна визначити згідно з комбінаторною формулою розміщень з повторами:

$$N_2 = (N_{\text{ОП}})^B. \tag{5}$$

Для ГСА G, якщо $B = 8$, $N_{\text{ОП}} = 3$, маємо $N_2 = 6561$ варіант.

Оскільки в загальному випадку кодування станів не залежить від зіставлення ОП автоматним переходам, кількість варіантів, які можуть бути формальними розв'язками, визначається згідно з (4) і (5) за комбінаторним правилом добутку:

$$N_F = \frac{(2^R)!}{(2^R - M)!} \times (N_{\text{ОП}})^B. \tag{6}$$

Для ГСА G отримуємо $N_F = 40320 \times 6561 \approx 265$ млн варіантів.

Для того, щоб виявити, чи є черговий варіант перебору формальним розв'язком, треба з'ясувати, чи виконується для цього варіанта наведена у розд. 1 вимога 3. Для цього потрібно виконати процедуру перевірки всіх автоматних переходів щодо коректності, тобто для кожного переходу переконатись, що код поточного стану перетворюється у код стану переходу за допомогою ОП, зіставленої цьому переходу. З математичної точки зору під час перевірки кожного переходу потрібно код поточного стану підставити у вираз відповідної ОП, обчислити його і порівняти результат з кодом стану переходу. Якщо всі переходи виявляться коректними, формальний розв'язок знайдено.

Назвемо цю процедуру визначенням формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП. Хоча процедура доволі проста, вона вимагає багаторазового виконання арифметико-логічних операцій, що утворюють множину ОП. У разі повного перебору таку процедуру потрібно виконувати щоразу для кожного із варіантів перебору, що потребує значних обчислювальних ресурсів. Якщо використовується метод пошуку формальних розв'язків на основі часткового перебору варіантів, їхня кількість може бути меншою, ніж за виразом (6), але теж достатньо великою. У цій роботі запропоновано спосіб, що дає змогу спростити визначення формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу з одночасним зменшенням кількості варіантів перебору.

3. МАТРИЦЯ ПЕРЕХОДІВ

Представимо систему переходів заданого МПА у вигляді квадратної матриці, яка має таку структуру:

— кількість рядків і кількість стовпчиків дорівнюють кількості допустимих кодів станів, тобто значенню 2^R. Рядки і стовпчики позначаються цими кодами послідовно від 0 до $2^R - 1$;

— рядку і стовпчику з однаковим кодом зіставляється закодований цим кодом стан автомата. Стан вказується ліворуч від номера рядка та над номером стовпчика. Якщо якийсь код не використовується для кодування станів, біля відповідного рядка і стовпчика стан автомата не вказується;

— у комірці (i, j) записується 1, якщо існує перехід зі стану з кодом, вказаним у рядку i, в стан з кодом, вказаним у стовпчику j. Якщо такого переходу не існує, в комірці записується 0 (або комірка залишається порожньою).

Приклад матриці для ГСА G, де коди станів задано відповідно до рис. 2, наведено на рис. 4. Таку матрицю будемо називати матрицею переходів, оскільки вона відображає множину переходів МПА.

		a_4	a_0	a_1	a_5		a_2	a_6	a_3
		0	1	2	3	4	5	6	7
a_4	0		1						
a_0	1			1					
a_1	2				1		1		
a_5	3							1	
	4								
a_2	5								1
a_6	6		1						
a_3	7	1							

Рис. 4. Матриця переходів ГСА G

У рядку 2 матриці вказано переходи зі стану з кодом 2, тобто зі стану a_1. Оскільки зі стану a_1 є два умовні переходи, рядок містить дві одиниці, що відповідають переходам у стан a_5 з кодом 3 та в стан a_2 з кодом 5. Стовпчик 1 містить дві одиниці, оскільки в стан a_0 з кодом 1 є два переходи: зі стану a_4 з кодом 0 та зі стану a_6 з кодом 6. Рядок 4 і стовпчик 4 є порожніми, оскільки код 4 у цьому разі не використовується для кодування станів. Інші рядки і стовпчики містять по одній одиниці, що відповідає безумовним переходам МПА.

4. МАТРИЦЯ ОПЕРАЦІЙ

Нехай задано деяку ОП. Представимо її у вигляді квадратної матриці, яка має таку структуру:

— розміри матриці збігаються з розмірами матриці переходів. Рядки і стовпчики позначено послідовними кодами від 0 до 2^R;

— у комірці (i, j) записується 1, якщо значення i перетворюється за допомогою цієї ОП у значення j. В іншому випадку в комірці записується 0 (або комірка залишається порожньою). Оскільки ОП повинна являти собою відношення функціонального типу, в кожному рядку може бути не більше одного значення 1.

Таку матрицю назвемо матрицею операції. Приклади таких матриць для ОП O_1–O_3 наведено на рис. 5.

Під час заповнення матриць (див. рис. 5) враховували те, що перетворення кодів станів відбувається в межах трьох двійкових розрядів. У загальному випадку результат будь-якої ОП має бути у діапазоні допустимих кодів станів.

З використанням матриць операції побудуємо об'єднану матрицю операцій, розмір якої збігається з розміром матриць операцій. Вміст кожної комірки фор-

	0	1	2	3	4	5	6	7
0		1						
1			1					
2				1				
3					1			
4						1		
5							1	
6								1
7	1							

а

	0	1	2	3	4	5	6	7
0			1					
1				1				
2					1			
3						1		
4							1	
5								1
6	1							
7		1						

б

	0	1	2	3	4	5	6	7
0				1				
1					1			
2						1		
3							1	
4								1
5	1							
6		1						
7			1					

в

Рис. 5. Матриці операцій для ОП O_1 (*а*), ОП O_2 (*б*), ОП O_3 (*в*)

	0	1	2	3	4	5	6	7
0		1	1	1				
1			1	1	1			
2				1	1	1		
3					1	1	1	
4						1	1	1
5	1						1	1
6	1	1						1
7	1	1	1					

Рис. 6. Об'єднана матриця операцій для ОП O_1–O_3

мується за таким принципом: якщо хоча б в одній матриці операції відповідна комірка містить 1, у комірку об'єднаної матриці операцій записується 1; якщо в усіх матрицях операцій відповідні комірки містять 0 (є порожніми), у комірку об'єднаної матриці операцій записується 0 (або вона залишається порожньою). Цей принцип схожий на виконання логічної операції диз'юнкції над значеннями відповідних комірок усіх матриць операцій.

Об'єднана матриця операцій, що побудована з використанням матриць операцій (див. рис. 5), представлена на рис. 6.

5. ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМАЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ АЛГЕБРАЇЧНОГО СИНТЕЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТРИЦЬ

Можливість побудови об'єднаної матриці операцій зумовлена тим, що структура МПА з ОАП дає змогу зіставити будь-якому автоматному переходу довільну ОП. Не має значення, за допомогою якої ОП буде реалізовано конкретний перехід. Таким чином, об'єднана матриця операцій являє собою «мапу» усіх можливих перетворень кодів станів за допомогою заданої множини операцій переходів.

Скористаємось об'єднаною матрицею операцій для виконання процедури визначення формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП. Для цього виконаємо зіставлення матриці переходів (див. рис. 4) і об'єднаної матриці операцій (див. рис. 6) за таким алгоритмом:

1) якщо в комірках (i, j) обох матриць записано 1, перехід зі стану з кодом i в стан з кодом j можна реалізувати за допомогою мінімум однієї із заданих ОП. Такий перехід вважатимемо покритим заданою множиною ОП;

2) якщо в комірці (i, j) матриці переходів записано 1, а в комірці (i, j) об'єднаної матриці операцій записано 0, перехід зі стану з кодом i в стан з кодом j не можна реалізувати за допомогою будь-якої із заданих ОП. Такий перехід будемо вважати непокритим заданою множиною ОП.

Результат зіставлення матриць представимо у вигляді матриці покриття (рис. 7). Тут у комірках матриці **1** відповідають одиницям у матриці переходів, 1 — одиницям в об'єднаній матриці операцій. Як можна бачити, в цьому прикладі всі автоматні переходи покриваються заданою множиною ОП. Отже, таке кодування станів і задана множина ОП дають змогу отримати формальний розв'язок задачі алгебраїчного синтезу.

		a_4	a_0	a_1	a_5		a_2	a_6	a_3
		0	1	2	3	4	5	6	7
a_4	0		**1**1	1	1				
a_0	1			**1**1	1	1			
a_1	2				**1**1	1	**1**1		
a_5	3					1	1	**1**1	
	4						1	1	1
a_2	5	1						1	**1**1
a_6	6	1	**1**1						1
a_3	7	**1**1	1	1					

Рис. 7. Матриця покриття для ГСА G і ОП O_1–O_3

Розглянемо приклад, коли стани автомата, заданого ГСА G (див. рис. 2), закодовано кодами, що збігаються з індексами станів. За таких самих заданих ОП O_1–O_3 об'єднана матриця операцій відповідає наведеній на рис. 6, а матриця переходів і матриця покриття мають вигляд, наведений на рис. 8.

Як можна бачити, матриця покриття містить два непокриті переходи. Цим переходам відповідають **1** у комірках (1, 5) та (4, 0). Наявність хоча б одного непокритого переходу означає, що обране кодування станів та задана множина ОП не визначають формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу МПА з ОАП.

		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	
		0	1	2	3	4	5	6	7
a_0	0		1						
a_1	1			1			1		
a_2	2				1				
a_3	3					1			
a_4	4	1							
a_5	5							1	
a_6	6	1							
	7								

а

		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	
		0	1	2	3	4	5	6	7
a_0	0		**1**1	1	1				
a_1	1			**1**1	1	1	**1**		
a_2	2				**1**1	1	1		
a_3	3					**1**1	1	1	
a_4	4	**1**					1	1	1
a_5	5	1						**1**1	1
a_6	6	**1**1	1						1
	7	1	1	1					

б

Рис. 8. Матриця переходів (*а*) і відповідна їй матриця покриття (*б*)

6. ПЕРЕВАГИ ЗАПРОПОНОВАНОГО СПОСОБУ

Коли матриця переходів зіставляється з об'єднаною матрицею операцій, кожному переходу одночасно зіставляються всі ОП із множини O. Зіставлення матриць еквівалентне виконанню кількості переборів варіантів, що визначається виразом (5). Як наслідок, другий множник у правій частині виразу (6), що відповідає співвідношенню (5), замінюють одиницею, під якою розуміється одне зіставлення матриць незалежно від кількості ОП і автоматних переходів. Вираз (6) набуває вигляду

$$N_F = \frac{(2^R)!}{(2^R - M)!} \times 1 = \frac{(2^R)!}{(2^R - M)!}. \qquad (7)$$

Відсутність у виразі (7) параметрів B та $N_{\text{ОП}}$ означає, що під час використання матричного способу визначення формальних розв'язків кількість автоматних переходів та кількість операцій переходів не впливають на складність пошуку формальних розв'язків.

Зазначимо, що вираз (7) відповідає кількості варіантів пошуку формальних розв'язків саме у випадку повного перебору варіантів кодування станів МПА. Застосування методів алгебраїчного синтезу, у яких використовується частковий перебір варіантів, дає змогу додатково зменшити значення N_F. Отже, запропонований матричний спосіб визначення формального розв'язку задачі алгебраїчного синтезу можна вважати універсальним для використання у різних методах синтезу МПА з ОАП.

Також для зіставлення матриці переходів і об'єднаної матриці операцій не потрібно виконання жодної ОП. Останні використовуються на етапі формування матриць операцій. Об'єднана матриця операцій розглядається як абстракція, що не дає змоги визначити, яка конкретна операція зіставляється певному автоматному переходу, але дає можливість швидко з'ясувати, чи знайдено формальний розв'язок задачі алгебраїчного синтезу. Якщо в результаті зіставлення матриць якийсь автоматний перехід виявляється покритим, достатньо переглянути всі матриці операцій та обрати ту ОП, що має значення 1 у комірці, яка збігається з цим переходом.

ВИСНОВКИ

Запропонований у статті матричний спосіб визначення формальних розв'язків задачі алгебраїчного синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів надає змогу зменшити кількість варіантів перебору та обчислювальну складність під час пошуку формальних розв'язків за рахунок одночасного зіставлення всіх ОП усім автоматним переходам. Аналіз отриманих результатів уможливлює розвиток подальших досліджень:

— алгоритмічну та програмну реалізацію запропонованого способу;

— розроблення нових методів алгебраїчного синтезу МПА з ОАП із використанням матричного способу визначення формальних розв'язків;

— інтеграцію розроблених методів та підходів у складі САПР цифрових пристроїв керування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Baranov S. Logic and system design of digital systems. Tallinn: TUT Press, 2008. 276 p.
2. Sklyarov V., Sklyarova I., Barkalov A., Titarenko L. Synthesis and optimization of FPGA-вased systems. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Berlin: Springer, 2014. Vol. 294. 432 p.
3. Bailliul J., Samad T. Encyclopedia of systems and control. London: Springer, 2015. 1554 p.
4. DeMicheli G. Synthesis and optimization of digital circuits. NY: McGraw-Hill, 1994. 576 p.
5. Barkalov A., Titarenko L., Kolopienczyk M., Mielcarek K., Bazydlo G. Logic synthesis for FPGA-based finite state machines. Springer, 2016. 280 p.
6. Barkalov A.A., Babakov R.M. Operational formation of state codes in microprogram automata. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2011. Vol. 47, N 2. P. 193–197. https://doi.org/10.1007/s10559-011-9301-y.
7. Barkalov A.A., Babakov R.M. Determining the area of efficient application of a microprogrammed finite-state machine with datapath of transitions. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2018. Vol. 54, N 3. P. 366–375. https://doi.org/10.1007/s10559-018-0038-8.
8. Barkalov A.A., Babakov R.M. Algebraic interpretation of a microprogram finite-state machine with datapath of transitions. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2016. Vol. 52, N 2. P. 191–198. https://doi.org/10.1007/s10559-016-9814-5.
9. Barkalov A.A., Babakov R.M. Structural classification of methods for synthesis of a microprogram finite-state machine with datapath of transitions. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2019. Vol. 55, N 2. P. 167–173. https://doi.org/10.1007/s10559-019-00121-y.
10. Grout I. Digital systems design with FPGAs and CPLDs. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science, 2011. 784 p.

R.M. Babakov, A.A. Barkalov

A MATRIX METHOD FOR DETECTING FORMAL SOLUTIONS OF THE PROBLEM OF ALGEBRAIC SYNTHESIS OF A FINITE-STATE MACHINE WITH A DATAPATH OF TRANSITIONS

Abstract. For a finite state machine with datapath of transitions, a new method for detecting formal solutions to an algebraic synthesis problem is proposed. It represents the set of finite-state machine transitions in the form of a matrix that contains information about the current state encoding. This matrix is matched with the merged matrix of operations, which contains all possible transformations of state codes using a given set of transition operations. Such an approach allows one to simultaneously compare all transition operations with each finite-state machine transition, which reduces the number of situations that claim to be a formal solution to the problem of algebraic synthesis. The result is a reduction in the execution time of any algorithms of algebraic synthesis of a finite-state machine with a datapath of transitions based on the enumeration of ways of using the operations to implement automatic transitions.

Keywords: finite state machine, datapath of transitions, graph-scheme of algorithm, algebraic synthesis, matrix of transitions, merged matrix of operations.

Надійшла до редакції 19.08.2022