

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПРОГРАММНОГО АВТОМАТА С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

Аннотация. Проведены исследования эффективности микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов в сравнении с каноническим автоматом по критерию аппаратурных затрат в логической схеме автомата. Для исследованных структур определена область их эффективного применения, выражаемая совокупностью диапазонов значений параметров автомата.

Ключевые слова: микропрограммный автомат, операционный автомат переходов, оптимизация аппаратурных затрат, область эффективного применения.

ВВЕДЕНИЕ

В современных вычислительных системах одним из центральных узлов выступает устройство управления (УУ), осуществляющее координацию работы всех узлов системы. Одной из структурных реализаций УУ является микропрограммный автомат (МПА), схема которого характеризуется относительно высоким быстродействием при значительных аппаратурных затратах [1, 2]. Наблюдаемый в настоящее время рост сложности алгоритмов, имплементируемых МПА, актуализирует задачу минимизации аппаратурных затрат в логической схеме автомата. Одним из путей решения данной задачи является разработка новых структур МПА и методов их синтеза [3, 4].

В работах [5–7] предложена структура МПА с операционным автоматом переходов (МПА с ОАП), в которой схема формирования переходов организована в виде операционного автомата. В МПА с ОАП минимизация аппаратурных затрат достигается за счет специального кодирования состояний, при котором один и тот же функциональный узел в ОАП реализует множество автоматных переходов, а аппаратурные затраты в узле не зависят от числа переходов, реализуемых данным узлом.

Для практического использования структур МПА с ОАП требуется численно выраженное обоснование их эффективности по аппаратурным затратам в сравнении с известными структурами МПА. В данной работе решается задача определения области эффективного применения МПА с ОАП в сравнении с каноническим МПА, выражаемой в виде совокупности диапазонов значений ряда основных параметров МПА.

ИССЛЕДУЕМЫЕ СТРУКТУРЫ МПА

На рис. 1 представлена структурная схема канонического МПА, обозначенная в данной работе символом U_K и включающая следующие блоки [2]:

— схема формирования переходов (СФП), синтезируемая по системе канонических уравнений функции переходов автомата

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

где X — множество входных сигналов автомата, T — код текущего состояния;

— регистр памяти (РП), предназначенный для хранения кода текущего состояния;

— схема формирования микроопераций (СФМО), синтезируемая по системе канонических уравнений функции выходов

$$Y = Y(X, T)$$

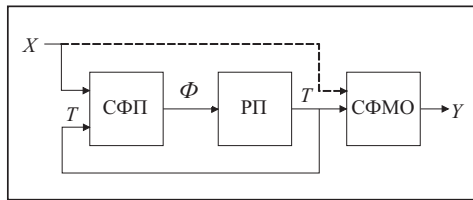


Рис. 1. Каноническая структура МПА (структура U_K)

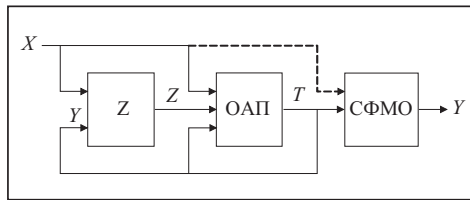


Рис. 2. Базовая структура МПА с ОАП (структура U_1)

в случае автомата Мили и по системе

$$Y = Y(T)$$

в случае автомата Мура.

Таким образом, наличие в структуре связи, показанной пунктиром, характеризует структуру на рис. 1 как автомат Мили, отсутствие этой связи — как автомат Мура.

На рис. 2 приведена базовая структура МПА с ОАП, обозначенная в данной работе символом U_1 .

В этой структуре функция переходов реализуется за счет совместной работы операционного автомата переходов (блок ОАП) и Z-подсхемы (блок Z) [5, 6]. Операционный автомат переходов представляет собой операционный автомат, выполняющий над кодом текущего состояния T и входными сигналами X одну из операций переходов (ОП), определяемую кодом Z . Последний формируется Z-подсхемой, функция которой определяется таким выражением:

$$Z = Z(X, T). \quad (1)$$

В структуре U_1 регистр памяти автомата является частью ОАП и его единственной регистровой схемой, выступающей в каждом такте работы ОАП в качестве регистра исходных данных и регистра результата.

Отметим, что выражение (1) в силу набора аргументов позволяет сопоставлять отдельную ОП с каждым переходом автомата. С одной стороны, это может способствовать упрощению процесса синтеза МПА с ОАП, с другой стороны — обуславливает увеличение затрат аппаратуры на реализацию Z-подсхемы. В работе [7] предложена модификация структуры U_1 , изображенная на рис. 3 и обозначенная в данной работе символом U_2 .

В этой структуре на вход Z-подсхемы поступает только код текущего состояния T , что позволяет сопоставлять операции переходов с состояниями автомата, но не с отдельными переходами. Вследствие этого в МПА со структурой U_2 каждая ОП должна реализовывать все переходы из того состояния, с которым она сопоставлена.

Уменьшение числа входов Z-подсхемы в структуре U_2 позволяет реализовать ее в базе запоминающих устройств, что при определенных условиях может способствовать уменьшению аппаратных затрат в логической схеме автомата по сравнению со структурой U_1 .

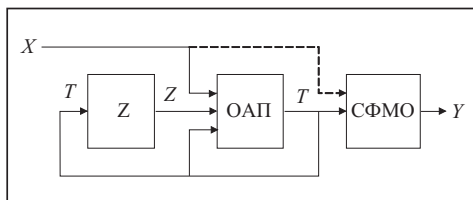


Рис. 3. Модифицированная структура МПА с ОАП (структура U_2)

Как и в случае структуры U_K , наличие в структурах U_1 и U_2 связи, показанной пунктиром, позволяет считать эти структуры автоматами Мили, а отсутствие этой связи — автоматами Мура.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУКТУР МПА С ОАП

Критерием эффективности структур U_1 и U_2 в сравнении со структурой U_K будем считать аппаратные затраты на реализацию логической схемы автомата. Эффективность E^{U_i} структуры U_i определим следующим выражением:

$$E^{U_i} = H^{U_K} / H^{U_i},$$

где H^{U_K} , H^{U_i} — численно выраженные затраты аппаратуры в МПА с канонической структурой и эквивалентном МПА со структурой U_i соответственно. Структура U_i более эффективна, чем структура U_K , в случае $E^{U_i} > 1$, причем экономия аппаратных затрат составляет $(E^{U_i} - 1) / E^{U_i}$ процентов от затрат в канонической структуре. При $E^{U_i} = 1$ сравниваемые структуры равноценны по аппаратным затратам. При $E^{U_i} < 1$ структура U_i менее эффективна, чем структура U_K , и ее использование с точки зрения аппаратных затрат нецелесообразно.

Каждая из величин H^{U_K} и H^{U_i} — это сумма численно выраженных аппаратных затрат во всех блоках соответствующей структуры. Так, величина H^{U_K} определяется выражением

$$H^{U_K} = H_{СФП}^{U_K} + H_{РП}^{U_K} + H_{СФМО}^{U_K}, \quad (2)$$

а для структур U_1 и U_2 — выражениями

$$H^{U_1} = H_Z^{U_1} + H_{ОАП}^{U_1} + H_{СФМО}^{U_1}, \quad (3)$$

$$H^{U_2} = H_Z^{U_2} + H_{ОАП}^{U_2} + H_{СФМО}^{U_2} \quad (4)$$

соответственно.

Отдельные блоки в исследуемых структурах имеют внутреннюю архитектуру, схожую с такими типовыми функциональными узлами, как комбинационная схема, регистр, мультиплексор, модуль памяти, сумматор, сдвигатель и др. Например, в каноническом МПА блоки СФП и СФМО реализуются по системе булевых уравнений, а блок РП представляет собой стандартный R -разрядный регистр. Исключение могут составлять узлы в блоке ОАП, реализующие нестандартные ОП. Однако в большинстве случаев разбиение таких узлов на более простые не вызывает сложностей. Это дает возможность провести исследование аппаратных затрат не для структурных блоков, а для соответствующих им функциональных узлов и применить полученные результаты к структурным блокам.

В данной работе исследования аппаратных затрат проведены путем VHDL-моделирования с использованием САПР Xilinx ISE. В качестве единицы измерения аппаратных затрат выбраны LUT-элементы (Look-Up Tables), являющиеся регулярными функциональными узлами FPGA [8, 9]. С целью экономии LUT-элементов допускается использование базиса блочной памяти FPGA (где это позволяет архитектура синтезируемого блока) [10].

Результаты исследований позволили выразить функции (2)–(4) через ряд параметров МПА (табл. 1). Опишем параметры k_1 – k_6 подробнее.

Параметр k_1 — коэффициент, применяемый к значению аппаратных затрат в блоках, реализуемых по системе булевых уравнений. Он позволяет учесть результативность минимизации систем булевых уравнений для конкретного МПА. В общем случае для разных блоков значение k_1 различно, однако в процессе исследований значение k_1 взято одинаковым (усредненным) для всех исследуемых структур МПА.

Таблица 1. Параметры исследуемых структур МПА

Обозначение	Описание
M	Количество состояний
R	Разрядность структурного кода состояния
B	Количество переходов
N	Количество микроопераций
N_d	Количество функциональных узлов в операционном автомате переходов
k_1	Коэффициент минимизации комбинационной логической схемы (КЛС), $k_1 \in (0; 1]$
k_2	Коэффициент сложности функциональных узлов, $k_2 \in (0; \infty)$
k_3	Доля переходов, реализуемых с помощью операций переходов, от общего числа переходов B , $k_3 \in [0; 1]$
k_4	Доля условных переходов от общего числа переходов B , $k_4 \in [0; 1]$
k_5	Средняя доля термов в одном уравнении системы булевых уравнений от общего числа термов, используемых в системе, $k_5 \in (0; 1)$
k_6	Коэффициент эффективности использования базиса блочной памяти ПЛИС FPGA по отношению к базису LUT-элементов, $k_6 \in (0; \infty)$

Параметр k_2 — коэффициент масштабирования аппаратных затрат на реализацию одной операции переходов. В проведенных исследованиях значение k_2 считается одинаковым для каждой ОП, входящей в ОАП, и в силу этого является усредняющим коэффициентом масштабирования.

Параметр k_3 — коэффициент, равный отношению числа переходов МПА с ОАП, реализуемых с помощью тех или иных операций переходов, к общему числу B переходов автомата. Соответственно, число переходов автомата, реализуемых каноническим способом, равно $(1 - k_3)B$. При $k_3 = 1$ все переходы автомата реализуются с помощью множества операций переходов. При $k_3 = 0$ все переходы реализуются каноническим способом, и МПА с ОАП вырождается в канонический МПА.

Параметр k_4 — коэффициент, равный отношению количества условных переходов к общему числу B переходов автомата. При этом количество безусловных переходов равно $(1 - k_4)B$. При $k_4 = 1$ в автомате отсутствуют безусловные переходы, при $k_4 = 0$ — условные.

Параметр k_5 — коэффициент, равный отношению среднего количества термов в одном уравнении системы булевых уравнений к общему числу термов, используемых в системе. Общее число термов зависит от того, что выступает в качестве аргументов системы уравнений. Например, в системе булевых уравнений, реализующей схему СФМО, общее количество термов в случае автомата Мили не превышает количество переходов B , а в случае автомата Мура — количество состояний M . При $k_5 \rightarrow 1$ дизъюнктивная часть системы каждого уравнения является максимально сложной, а при $k_5 \rightarrow 0$ — максимально простой. При $k_5 = 1$ каждое уравнение содержит все возможные термы системы, вырождаясь в булеву функцию «константа 1». При $k_5 = 0$ в уравнениях системы отсутствуют булевы термы, что позволяет поставить в соответствие каждому уравнению булеву функцию «константа 0».

В общем случае для разных систем булевых уравнений значение k_5 различно. Однако в рамках проводимых исследований данный коэффициент считается одинаковым для каждого структурного блока, синтезируемого по системе булевых уравнений, являясь, таким образом, усреднением соответствующих коэффициентов для разных КЛС.

Параметр k_6 — коэффициент, позволяющий выразить в LUT-элементах аппаратные затраты на реализацию КЛС (блока, синтезируемого по системе булевых уравнений) при использовании базиса блочной памяти (Block RAM, BRAM) ПЛИС типа FPGA [10].

Значение $k_6 < 1$ следует выбирать в том случае, если указанная ПЛИС содержит большое количество встроенных блоков памяти, не задействованных в рамках текущего проекта. В этом случае реализация КЛС в базисе блочной памяти оказывается более предпочтительной, чем ее реализация на LUT-элементах, поскольку относительная ценность используемых при этом ресурсов ПЛИС оказывается ниже. При $k_6 = 1$ ценность данных базисов для используемой ПЛИС считается одинаковой. При $k_6 > 1$ реализация КЛС в базисе LUT-элементов считается более предпочтительной по сравнению с базисом блочной памяти.

Использование коэффициента k_6 возможно в следующих случаях.

1. Используемая ПЛИС содержит достаточное количество блочной памяти.

2. Число входных сигналов синтезируемой КЛС не превышает числа адресных входов блока памяти, которое в современных ПЛИС FPGA фирмы Xilinx не превышает 16 [10]. Например, в МПА Мура схема СФМО имеет число входных сигналов, равное R , и в случае $R \leq 16$ (а также при достаточной разрядности строки данных для реализации множества микроопераций) может быть синтезирована в базисе блочной памяти. В МПА Мили на входы схемы СФМО дополнительно подаются L сигналов логических условий, что при средних значениях L ($L = 30$ [2]) приводит к невозможности использования блочной памяти ПЛИС для синтеза СФМО.

В процессе исследований значения параметров из табл. 1 являются одинаковыми для всех блоков сравниваемых структур МПА. При этом рассматриваются четыре класса сложности автоматов, определяемые совокупностью значений M, R, B :

- класс 1: автоматы малой сложности ($M = 100, R = 7, B = 200$);
- класс 2: автоматы средней сложности ($M = 500, R = 9, B = 1000$);
- класс 3: автоматы большой сложности ($M = 1000, R = 10, B = 2000$);
- класс 4: автоматы сверхбольшой сложности ($M = 2000, R = 11, B = 4000$).

ОБЛАСТЬ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МПА С ОАП

Проведенные исследования позволили выявить факторы, способствующие повышению эффективности предлагаемых структур МПА с ОАП в сравнении с каноническим МПА. Обобщенные результаты приведены в табл. 2, где в строках указаны исследуемые структуры, а в столбцах — параметры МПА (см. табл. 1).

В ячейках таблицы указаны условия повышения эффективности соответствующей структуры: знак + указывает на то, что эффективность повышается с ростом значения соответствующего параметра, знак – указывает на то, что эффективность повышается с уменьшением значения параметра, а 0 означает, что изменение значения параметра не влияет на эффективность структуры.

Для структур U_1 и U_2 подобраны несколько наборов значений параметров из табл. 1, при которых значение эффективности составляет не менее 1,1. Данные наборы позволили определить область эффективного применения исследуемых структур в виде множества отношений параметров из табл. 1. Рассмотрим полученные результаты.

МПА Мили U_1 . Область эффективного применения данной структуры МПА с ОАП может быть определена из табл. 3. Для каждого класса сложности строки расположены в порядке убывания значений E^{U_1} . Из табл. 3 можно сделать следующие выводы.

Таблица 2. Факторы, способствующие повышению эффективности структур U_1 и U_2

U_i	Тип МПА	Класс сложности	Параметр							
			N	N_d	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
U_1	Мили	1	+	-	+	-	+	0	+	0
		2	-	-	+	-	+	0	+	0
		3	-	-	+	-	+	0	+	0
		4	-	-	+	-	+	0	+	0
	Мура	1	+	-	+	-	+	0	+	+
		2	-	-	+	-	+	0	+	-
		3	-	-	+	-	+	0	+	-
		4	-	-	+	-	+	0	+	-
U_2	Мили	1	-	-	+	-	+	0	+	-
		2	-	-	+	-	+	0	+	-
		3	-	-	+	-	+	0	+	-
		4	-	-	+	-	+	0	+	-
	Мура	1	-	-	+	-	+	-	-	-
		2	-	-	+	-	+	-	-	-
		3	-	-	+	-	+	-	-	-
		4	-	-	+	-	+	-	-	-

Таблица 3. Область эффективного применения МПА Мили U_1

Класс сложности	Параметр								E^{U_1}
	N	N_d	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	
1	20	4	1	1	1	0,75	0,9	0,5	1,152
	20	4	0,95	1	0,97	0,75	0,9	0,5	1,115
	20	4	1	1	0,99	0,75	0,6	0,5	1,113
	20	4	0,8	0,5	0,99	0,75	0,5	0,5	1,109
2	20	4	1	1	1	0,75	0,9	0,5	1,252
	20	8	0,9	1	0,95	0,75	0,9	0,5	1,123
	20	8	0,9	1	0,95	0,75	0,8	0,5	1,118
	20	4	0,9	1	0,9	0,75	0,8	0,5	1,100
3	20	8	0,9	1	0,95	0,75	0,7	0,5	1,145
	20	8	0,8	1	0,95	0,75	0,5	0,5	1,127
	20	15	0,9	1	0,95	0,75	0,8	0,5	1,104
	30	15	0,9	1	0,97	0,75	0,8	0,5	1,100
4	30	8	0,9	1	0,95	0,75	0,5	0,5	1,122
	20	30	0,9	1	0,97	0,75	0,7	0,5	1,114
	30	15	0,9	1	0,95	0,75	0,8	0,5	1,104
	50	8	0,95	1	0,97	0,75	0,5	0,5	1,100

1. Для всех классов сложности доля переходов, реализуемых с помощью операций переходов (столбец k_3), должна составлять не менее 95 %, а для МПА малой сложности — не менее 97 %. При относительно небольшом числе допустимых операций переходов, равном $N_d - 1$, достижение $k_3 \geq 0,95$ является трудновыполнимой задачей.

2. Для всех классов сложности значение $E^{U_1} \geq 1,1$ достигается при небольшом числе микроопераций N (от 20 до 30). Значение $N = 50$ допустимо только для МПА сверхвысокого класса сложности при малом числе операций переходов ($N_d - 1 = 8$) и $k_3 \geq 0,97$.

3. В МПА сверхбольшой сложности при $N = 20$ может быть задействовано достаточно большое число операций переходов ($N_d = 30$) при сохранении $E^{U_1} = 1,11$. Это в общем случае может способствовать упрощению достижения значения $k_3 \geq 0,97$, являющегося в данном случае необходимым требованием.

4. Структура эффективна при $k_5 > 0,7$, т.е. тогда, когда дизъюнктивная часть в реализуемых системах булевых уравнений имеет сложность выше средней. При невыполнении данного условия эффективность в большинстве случаев оказывается ниже 1,1.

5. Среднее значение E^{U_1} для исследованных классов МПА Мили U_1 составляет около 1,12, что соответствует выигрышу по аппаратурным затратам около 11 % по сравнению с каноническим МПА.

Таким образом, область эффективного применения МПА Мили со структурой U_1 определяется следующими основными критериями: $N < 30$, $N_d \leq 8$, $k_3 \geq 0,95$, $k_5 > 0,7$. При этом очевидной является общая низкая эффективность МПА Мили со структурой U_1 , равная в среднем 1,12. Справедливо полагать, что в общем случае использование данного класса МПА в качестве альтернативы каноническому МПА Мили не приводит к существенной экономии аппаратурных затрат в логической схеме автомата.

МПА Мура U_1 . Для данной структуры область эффективного применения определим, исходя из табл. 4. Отметим следующее.

1. Для автоматов малой сложности выигрыш достигим при числе формируемых микроопераций, близком к 30. Для автоматов более высокого класса сложности это число может составлять 200 и выше.

2. Для автоматов классов сложности 3 и 4 количество операций переходов может достигать 30. С уменьшением класса сложности это число также уменьшается.

Таблица 4. Область эффективного применения МПА Мура U_1

Класс сложности	Параметр								E^{U_1}
	N	N_d	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	
1	50	4	0,8	1	0,95	0,75	0,7	0,1	1,168
	30	4	0,9	1	0,95	0,75	0,5	0,1	1,125
	30	4	0,9	1	1	0,75	0,5	1	1,110
	30	4	0,8	1	0,95	0,75	0,5	0,1	1,106
2	30	8	0,9	1	0,95	0,75	0,5	0,1	1,205
	100	8	0,9	1	0,95	0,75	0,5	0,1	1,168
	100	8	0,9	1	0,9	0,75	0,8	0,1	1,103
	90	16	0,9	1	0,97	0,75	0,5	0,1	1,100
3	100	16	0,9	1	0,95	0,75	0,5	0,1	1,137
	200	16	0,5	1	0,95	0,75	0,8	0,1	1,121
	100	8	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,109
	100	32	0,8	1	0,97	0,75	0,7	0,1	1,106
4	200	16	0,8	1	0,95	0,75	0,5	0,1	1,153
	100	32	0,8	1	0,97	0,75	0,5	0,1	1,105
	100	16	0,	1	0,91	0,75	0,5	0,1	1,100
	300	8	0,85	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,100

3. Почти во всех случаях приемлемое значение эффективности достигается при $k_3 \geq 0,95$. Три представленных в таблице случая $k_3 = 0,9$ возможны при условии $N_d = 8$, т.е. 90% автоматных переходов должны быть реализованы посредством небольшого числа операций переходов.

4. Непременным условием достаточной эффективности структуры является наличие в используемой ПЛИС достаточного объема блочной памяти, что выражается условием $k_6 \leq 0,1$. В табл. 4 представлен единственный случай, при котором выигрыш возможен при отсутствии блочной памяти ($k_6 = 1$), однако сопутствующим условием является реализация всех без исключения переходов ($k_3 = 1$) с помощью лишь трех операций переходов ($N_d = 4$).

5. Средний выигрыш по аппаратурным затратам близок к 10 % и соизмерим с выигрышем для структуры U_1 МПА Мили (см. табл. 3).

В целом область эффективного применения МПА Мура со структурой U_1 можно охарактеризовать следующим набором отношений: $N \leq 200$, $N_d \leq 32$, $k_3 \geq 0,95$, $k_6 \leq 0,1$. Достижимая при этом эффективность говорит о невысокой экономии аппаратурных затрат при использовании данной структуры вместо канонического МПА Мура.

МПА Мили U_2 . Для определения области эффективного применения МПА Мили со структурой U_2 составим табл. 5. Проанализируем содержимое таблицы.

1. Независимо от класса сложности, требуемая эффективность достигается при $N \leq 50$. При дальнейшем увеличении N наблюдается резкое снижение эффективности.

2. Главная особенность структуры U_2 , позволяющая реализовать Z-подсхему в базисе блочной памяти ПЛИС — это наличие U_2 в достаточном объеме в используемой серии микросхем. Данное требование выражается значением k_6 , близким к нулю. При увеличении k_6 до значений, близких к единице, затраты аппаратуры в блоке ОЧ совместно с Z-подсхемой становятся соизмеримыми с затратами в блоке СФП канонического МПА Мили, что приводит к уменьшению значения E^{U_2} до единицы.

Таблица 5. Область эффективного применения МПА Мили U_2

Класс сложности	Параметр								E^{U_2}
	N	N_d	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	
1	20	8	0,8	1	0,95	0,75	0,9	0,1	1,158
	20	4	0,8	1	0,75	0,75	0,8	0,1	1,142
	20	8	0,8	1	0,95	0,75	0,7	0,1	1,125
	30	8	0,9	1	0,9	0,75	0,8	0,1	1,103
2	50	16	0,8	1	0,95	0,75	0,7	0,1	1,114
	30	16	0,8	1	0,8	0,75	0,5	0,1	1,107
	30	4	0,8	1	0,6	0,75	0,5	0,1	1,105
	50	8	0,8	1	0,8	0,75	0,7	0,1	1,104
3	50	16	0,8	1	0,75	0,75	0,7	0,1	1,103
	50	8	0,8	1	0,75	0,75	0,5	0,1	1,102
	50	32	0,9	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,100
	50	16	0,8	1	0,8	0,75	0,5	0,1	1,100
4	50	32	0,8	1	0,9	0,75	0,5	0,1	1,126
	50	32	0,8	1	0,8	0,75	0,5	0,1	1,107
	50	16	0,8	1	0,7	0,75	0,6	0,1	1,106
	50	32	0,9	1	0,75	0,75	0,5	0,1	1,100

3. При достаточно большом числе используемых операций переходов (от 16 до 32) возможно снижение коэффициента k_3 до 0,8 и ниже, что может способствовать упрощению потенциальных методов алгебраического синтеза данного класса МПА. Тем не менее, даже для автоматов средней сложности достижение значения $k_3 = 0,6$ возможно лишь при $N_d = 3$.

Область эффективного применения МПА Мили со структурой U_2 может быть выражена следующим рядом ограничений: $N \leq 50$, $N_d \leq 32$, $k_3 \geq 0,7$, $k_6 \leq 0,1$. Эффективность данной структуры можно считать численно соизмеримой с эффективностью двух ранее рассмотренных структур.

МПА Мура U_2 . Составим для данной структуры табл. 6, аналогичную табл. 3–5.

Анализ табл. 6 позволят сделать следующие выводы.

1. Для всех классов сложности является допустимым широкий диапазон значений параметра N . При этом значения остальных параметров остаются в приемлемом диапазоне.

2. Для всех классов возможно снижение k_3 до величины 0,3 и ниже, обычно сопровождаемое относительно небольшим значением N_d . Это может способствовать упрощению методов алгебраического синтеза и сокращению времени проектирования МПА.

Таблица 6. Область эффективного применения МПА Мура U_2

Класс сложности	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

3. Для всех классов сложности возможна реализация без использования базиса блочной памяти ПЛИС ($k_6 = 1$). Эффективность структуры в этом случае обеспечивается достаточно высоким значением k_3 (не ниже 0,9).

4. Возможность увеличения значения N_d до 64 и выше при $k_3 \leq 0,9$ с ростом класса сложности автомата может способствовать увеличению количества эффективных решений задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП.

5. Для каждого класса сложности допускается использование операций переходов, сложность схемной реализации которых в пять и более раз превышает среднее значение. Прирост аппаратных затрат, вызванный увеличением сложности операций переходов, компенсируется уменьшением их количества, равного $N_d - 1$.

Область эффективного применения МПА Мура со структурой U_2 может быть определена набором следующих отношений: $N \leq 1000$, $N_d \in [16; 128]$, $k_2 = 1$, $k_3 \leq 0,9$, $k_6 \leq 0,1$. В целом можно отметить, что для данной структуры значение эффективности 1,5 и выше может быть достигнуто без существенного ограничения остальных параметров автомата. При этом экономия аппаратных затрат составляет более 30 %, что позволяет рассматривать МПА Мура со структурой U_2 в качестве высокоэффективной структурной альтернативы эквивалентному МПА Мура с канонической структурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование эффективности структур микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. Наиболее эффективной является структура U_2 МПА Мура, для которой, в зависимости от класса сложности автомата, могут быть достигнуты значения эффективности в диапазоне от 1,25 до 1,58, что соответствует выигрышу в аппаратных затратах от 20 до 37% по сравнению с каноническим МПА Мура. Для других исследованных структур выигрыш оказывается значительно меньшим.

Определенные в работе области эффективного применения структур МПА с ОАП позволяют обосновать целесообразность практического использования структур U_1 и U_2 и продолжить исследования в направлении разработки формализованных методов синтеза и оптимизации данных структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов. Москва: Физматгиз, 1962. 476 с.
2. Баранов С.И. Синтез микропрограммных автоматов. Ленинград: Энергия, 1979. 232 с.
3. Barkalov A., Titarenko L., Kolopienczyk M., Mielcarek K., Bazydlo G. Logic synthesis for FPGA-based finite state machines. Cham, Switzerland: Springer, 2016. 280 p.
4. DeMicheli G. Synthesis and optimization of digital circuits. New York: McGraw-Hill, 1994. 576 p.
5. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Реализация функции переходов микропрограммного автомата на базе операционного автомата. *Управляющие системы и машины*. 2015. № 5. С. 22–29.
6. 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.
7. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Формирование кодов операций переходов в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Сборник научных трудов ДонНТУ. Сер. «Информатика, кибернетика и вычислительная техника»*. Красноармейск, ДонНТУ, 2015. Вып. 1 (20). С. 11–16.
8. Грушвицкий Р.И., Мурсаев А.Х., Угрюмов Е.П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. Санкт-Петербург: БВХ-Петербург, 2002. 608 с.

9. Grout I. Digital system design with FPGAs and CPLDs. Oxford: Elsevier, 2008. 784 p.
10. Максфилд К. Проектирование на ПЛИС. Курс молодого бойца. Москва: Изд. дом «Додэ-ка-XXI», 2007. 408 с.

Надійшла до редакції 19.05.2017

Р.М. Бабаков, О.О. Баркалов

ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТІ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОПРОГРАМНОГО АВТОМАТА З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ

Анотація. Проведено дослідження ефективності мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів у порівнянні з канонічним автоматом за критерієм апаратних витрат у логічній схемі автомата. Для досліджених структур визначено область їхнього ефективного застосування, виражену сукупністю діапазонів значень параметрів автомата.

Ключові слова: мікропрограмний автомат, операційний автомат переходів, оптимізація апаратних витрат, область ефективного застосування.

R.M. Babakov, A.A. Barkalov

DETERMINATION OF THE FIELD OF EFFICIENT APPLICATION OF A MICROPROGRAMMED FINITE-STATE MACHINE WITH DATAPATH OF TRANSITIONS

Abstract. Investigations of the efficiency of a microprogrammed finite-state machine with datapath of transitions in comparison with a canonical finite-state machine by the criterion of hardware expenses in the logical circuit of the finite-state machine are carried out. For the structures studied, the area of their efficient application is determined, which is expressed by a set of value ranges of finite-state machine parameters.

Keywords: microprogrammed finite-state machine, datapath of transitions, optimization of hardware expenses, area of efficient application.

Бабаков Роман Маркович,

кандидат техн. наук, доцент кафедри Донецького національного університету імені Василя Стуса, Вінниця, e-mail: r.babakov@donnu.edu.ua.

Баркалов Александр Александрович,

доктор техн. наук, профессор Института компьютерной инженерии и электроники, Университет Зеленогурский (Польша), e-mail: a.barkalov@imei.uz.zgora.pl.