

А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков

Организация операционной части в управляющих автоматах с операционным формированием переходов

Предложены способы организации операционной части схемы формирования переходов микропрограммного автомата с операционным их формированием. Приведены примеры построения таблиц переходов автомата для операционной части с индивидуальными, обобщенными и общими операциями.

The ways of the organization of an operational block of the circuit of forming the of transitions of the microprogram automaton with the operational formation of transitions are suggested. The examples of constructing the tables of transitions of the automaton for an operational block with the individual, generalized and general operations of transitions are presented.

Запропоновано засоби організації операційної частини схеми формування переходів мікропрограмного автомата з операційним їх формуванням. Наведено приклади побудови таблиць переходів автомата для операційної частини з індивідуальними, узагальненими та спільними операціями.

Введение. Один из основных элементов современных вычислительных систем – устройство управления (УУ), координирующее работу всех блоков системы [1]. УУ может быть реализовано в виде микропрограммного управляющего автомата (МПА), в котором функции переходов представляются системой булевых уравнений [2]. Это приводит к нерегулярной схеме МПА, что затрудняет ее реализацию в современных элементных базисах [3, 4].

В работе [3] предложено реализовывать переходы между состояниями не с помощью традиционных систем булевых функций, а с использованием арифметико-логических операций над кодом текущего состояния. При этом код состояния рассматривается не совокупностью отдельно формируемых разрядов, а как целостная арифметическая величина. Такой подход позволяет организовать схему формирования переходов автомата в виде операционного устройства, состоящего из отдельных блоков, реализующих операции переходов. Это позволяет использовать библиотечные элементы системы автоматизации проектирования (САПР) (сумматоры, сдвигатели) для синтеза схемы МПА, что приводит к существенному упрощению схемы.

В статье предлагаются различные варианты организации схемы формирования переходов

управляющего автомата с операционным формированием переходов (УА с ОФП), рассматриваются их достоинства и недостатки.

Организация автомата с операционным формированием переходов

Управляющий автомат с операционным формированием переходов, предложенный в [5], описывается структурой, изображенной на рис. 1.

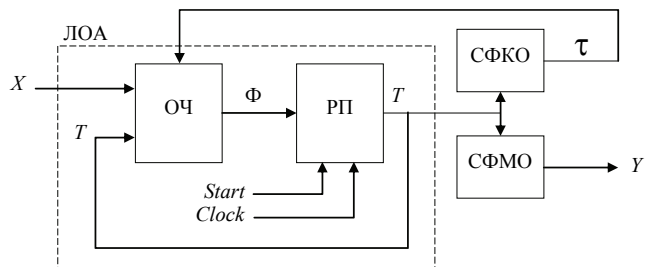


Рис. 1. Структура МПА с ОФП

Данная структура имеет следующие отличительные особенности:

- коды состояний рассматриваются не как совокупность отдельных битов, а как единая арифметическая величина, представленная в двоичном коде;

- основу структуры УА с ОФК представляет локальный операционный автомат (ЛОА), реализующий преобразование кода текущего состояния $K(a^t)$ в код следующего состояния (состояния перехода) $K(a^{t+1})$;

• преобразование кодов состояний в ЛОА выполняется с использованием множества операций переходов (ОП), число которых в общем случае меньше числа переходов в граф-схеме (ГСА) заданного алгоритма управления. Выбор ОП для того или иного перехода определяется кодом операции, формируемым на основании значения кода текущего состояния.

На рис. 1 операционная часть (ОЧ) реализует формирование кода следующего состояния Φ на основании кода текущего состояния T , сигналов логических условий (ЛУ) X и кода операции (КО), представленного переменными τ :

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

Код следующего состояния Φ поступает на входы регистра памяти (РП), который реализуется на D -триггерах и совместно с ОЧ образует ЛОА. На основании кода текущего состояния схема формирования микроопераций (СФМО) формирует микрокоманду, т.е. подмножество множества микроопераций Y , соответствующее текущему состоянию $УА$ и поступающее в операционный автомат цифровой системы. Также на основании значений переменных T схемой формирования кодов операций (СФКО) формируется код операции перехода, поступающий в схему ОЧ.

Установка в начальное состояние выполняется по сигналу *Start*, а смена кодов состояний в РП происходит по сигналу *Clock*.

Схема ОЧ представляет собой совокупность операционных блоков, реализующих множество операций переходов для заданной ГСА. При этом конечный результат определяется путем мультиплексирования выходов операционных блоков переменными τ согласно значению КО.

В рассматриваемой структуре $УА$ переходы между состояниями выполняются с использованием арифметико-логических операций. В том случае, если безусловный переход осуществляется из состояния a_t в состояние a_{t+1} , функция перехода зависит только от кода текущего состояния:

$$K(a^{t+1}) = o^t(K(a^t)), \quad (2)$$

где o^t – функция, реализующая ОП при переходе из состояния a^t , $t = 0, 1, 2, \dots$ – автоматное время.

Если же переход из состояния a^t – условный, то в общем случае он может быть осуществлен в одно из нескольких состояний в зависимости от значений сигналов логических условий, проверяемых при данном переходе. Функция преобразования имеет следующий вид:

$$K(a^{t+1}) = o^t(K(a^t), X^t), \quad (3)$$

где $K(a^{t+1})$ – код состояния перехода; X^t – множество сигналов ЛУ, проверяемых при переходе из текущего состояния; o^t – ОП, реализующая условный переход из текущего состояния.

Типовые структуры операционных автоматов

В теории синтеза операционных автоматов (ОА) принято характеризовать структуры такими параметрами, как производительность, быстродействие, затраты оборудования, регулярность, универсальность. Различное сочетание этих параметров нашло воплощение в таких типовых структурах, как канонический автомат (K -автомат), автомат с закрепленными операциями (I -автомат), автомат с обобщенными микрооперациями (M -автомат) и автомат с выполнением в одном такте нескольких обобщенных микрокоманд (IM -автомат) [2].

В ОА с канонической структурой каждой операции реализуемого алгоритма обработки данных сопоставлена отдельная комбинационная схема (КС). Такой тип ОА обладает максимальными затратами аппаратуры, максимальной производительностью (средним числом одновременно выполняемых микроопераций (МО)) и быстродействием (минимальным временем такта) среди эквивалентных ОА.

В I -автомате для каждого регистра-приемника используется индивидуальная комбинационная схема, содержащая по одному экземпляру необходимых операционных элементов. В данном типе ОА, в сравнении с K -автоматом, достигается уменьшение аппаратурных затрат при одновременном уменьшении быстродей-

ствия за счет дополнительных мультиплексорных схем.

Структура *M*-автомата предполагает наличие единой комбинационной схемы, общей для всех регистровых схем и позволяющей выполнять как одноместные, так и двухместные операции. Число операционных элементов в схеме – минимально достаточное для реализуемого алгоритма. За один такт работы *M*-автомат способен выполнить только одну микрооперацию. Данный тип структуры ОА характеризуется минимальными аппаратными затратами при минимальном быстродействии.

IM-автоматы позволяют либо выполнять в каждом такте работы по одной двухместной и одноместной операции для различных регистров-приемников (автомат с параллельной комбинационной схемой, *IM_P*-автомат), либо одну и двухместную операции для одного регистра-приемника (автомат с последовательной комбинационной схемой, *IM_S*-автомат). Увеличение числа комбинационных схем приближает данную структуру к *I*-автомату, уменьшение – к *M*-автомату. *IM*-автоматы обладают промежуточными характеристиками в сравнении с *I*- и *M*-автоматами.

Особенности организации локального операционного автомата

Локальный операционный автомат в составе МПА имеет следующие характерные особенности:

- ЛОА должен быть способен выполнять все операции по преобразованию кодов состояний при выполнении условных и безусловных переходов в пределах заданной ГСА. Следовательно, множество ОП, реализуемых схемой ЛОА, определяется множеством переходов УА или, в конечном итоге, ГСА.

- В ЛОА присутствует единственная регистровая схема – регистр памяти, хранящий код состояния управляющего автомата. Для любой ОП регистр памяти – единственно возможный регистр-приемник. В качестве исходных данных для выполняемой операции выступают как РП, так и множество сигналов ЛУ, поступающих извне и являющихся асинхронными

по отношению к схеме ЛОА (либо они должны предварительно фиксироваться в регистре).

- В традиционном ОА значения обрабатываемых данных обычно являются произвольными, что при выполнении операции может приводить к различным ситуациям (переполнение, деление на ноль и т.п.) Данные ситуации находят отражение во множестве сигналов ЛУ, формируемых обычно специальной схемой формирования ЛУ и анализируемых УА. В случае ЛОА разработчик имеет дело с «жестко» заданной ГСА и, как следствие, определенно заданными кодами состояний. Следовательно, ЛОА может (и должен) быть спроектирован таким образом, чтобы не допустить возникновения каких-либо ошибочных ситуаций при обработке кодов состояний. Любой предусмотренный переход (преобразование кода состояния) должен успешно выполняться схемой ОЧ. По этой причине ЛОА не формирует никаких признаков, характеризующих выполнение той или иной операции, и в его структуре схема формирования местных ЛУ отсутствует.

Способы организации операционной части в локальном операционном автомате

Исходные данные для построения комбинационной части традиционного ОА – множество операций заданного алгоритма обработки данных. В целом можно утверждать, что рассмотренные ранее типовые структуры ОА различаются методиками проецирования множества реализуемых операций на множество комбинационных схем автомата. Проводя аналогию с традиционным ОА цифровой системы [6], можно утверждать, что структура ЛОА реализует отображение множества операций переходов на множество комбинационных схем устройства (число переходов ГСА будем считать равным числу состояний автомата). При этом можно предложить следующие возможные варианты такого отображения.

Индивидуальная реализация операций перехода

В этом случае каждому из *M* переходов реализуемой ГСА соответствует отдельная операция перехода, которой в свою очередь со-

ответствует комбинационная схем $КС(O_m)$, реализующая требуемую функцию преобразования кода текущего состояния в код следующего состояния. Все комбинационные схемы $КС(O_1)–КС(O_M)$ включены параллельно друг другу, а выбор результата выполняется мультиплексором (МХ) результата (рис. 2).

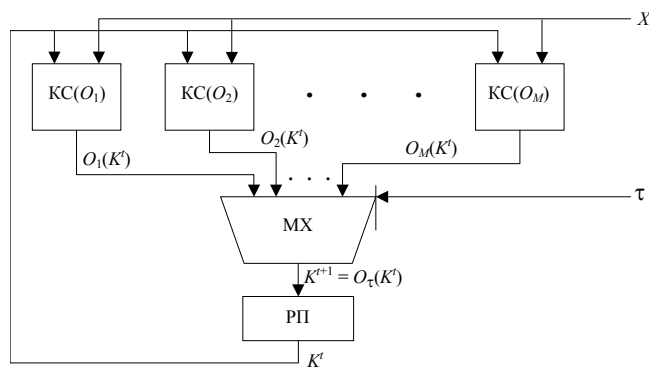


Рис. 2. Структура ЛОА с операционной частью I-типа

Назовем данную структуру ЛОА структурой с операционной частью I-типа (ЛОА с I-ОЧ). В ней внутренняя организация комбинационных схем может быть различной. Если КС реализует безусловный переход, то ее содержимое может представлять собой формирователь константы кода состояния перехода, не зависящей ни от кода текущего состояния, ни от логических условий. Если же КС реализует условный переход, то ее содержимое может представлять собой мультиплексор констант, управляемый сигналами ЛУ, проверяемыми в данном переходе.

Наиболее емким по затратам оборудования элементом структуры является мультиплексор результата. Если заданная ГСА содержит M состояний (M переходов), то разрядность кода состояния (и кода операции) – $R = \lceil \log_2 M \rceil$. При этом схема МХ является мультиплексором с M R -разрядных направлений, управляемым R -разрядным кодом FO . Для ГСА средней сложности ($M = 1000$, [7]) получим мультиплексор с 1000 10-разрядных направлений. Столь сложный мультиплексор на практике может быть реализован в виде многоуровневой иерархической схемы, что приведет, помимо зна-

чительных затрат аппаратуры, к снижению быстродействия.

Таким образом, недостатки структуры ЛОА с I-ОЧ – большие аппаратные затраты и значительные временные задержки в мультиплексоре результата, возрастающие с увеличением числа вершин ГСА. Также ЛОА с I-ОЧ обуславливает высокую сложность схемы СФКО за счет максимальной разрядности кода операции перехода. Основное достоинство ЛОА с I-ОЧ – универсальность проектирования: построение схемы автомата является однозначным для заданной ГСА и состоит в последовательной реализации КС всех функций переходов.

Рассмотрим пример. Пусть алгоритм управления, реализуемый МПА, задан ГСА G (рис. 3), отмеченной состояниями автомата Мура $a_0–a_4$.

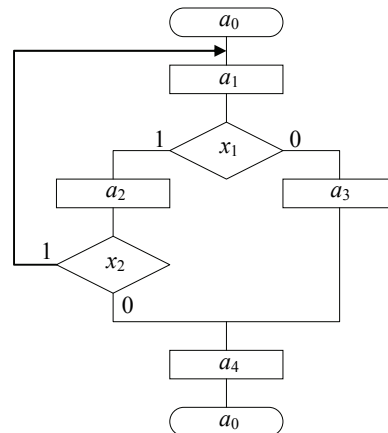


Рис. 3. Граф-схема алгоритма G

Зададим значения кодов состояний произвольным образом, например, в соответствии с их индексами: $K(a_0) = 0_{10} = 000_2$; $K(a_1) = 1_{10} = 001_2$; $K(a_2) = 2_{10} = 010_2$; $K(a_3) = 3_{10} = 011_2$; $K(a_4) = 4_{10} = 100_2$. Код каждого состояния представлен как в десятичной, так и в двоичной системе счисления, поскольку над ним могут выполняться как арифметические, так и логические (побитовые) операции.

Составим таблицу переходов автомата, в которой столбец «ОП» содержит операцию, выполняемую над кодом текущего состояния $K(a_i)$ (табл. 1). Здесь операция L_1 означает сдвиг на один разряд влево, R_1 – сдвиг на один разряд вправо.

Таблица 1. Переходы УА с I-ОЧ

a_i	$K(a_i)$	a_j	$K(a_j)$	X	ОП
a_0	$0_{10} = 000_2$	a_1	$1_{10} = 001_2$	1	+1
a_1	$1_{10} = 001_2$	a_2	$2_{10} = 010_2$	X_1	$L_1 + \bar{X}_1$
		a_3	$3_{10} = 011_2$	\bar{X}_1	
a_2	$2_{10} = 010_2$	a_1	$1_{10} = 001_2$	X_2	$L_1 X_2 \vee R_1 \bar{X}_2$
		a_4	$4_{10} = 100_2$	\bar{X}_2	
a_3	$3_{10} = 011_2$	a_4	$4_{10} = 100_2$	1	инверсия
a_4	$4_{10} = 100_2$	a_0	$0_{10} = 000_2$	1	L_1

Очевидно, что каждому переходу соответствует уникальная операция, реализуемая уникальной комбинационной схемой. В совокупности данные КС образуют операционную часть с индивидуальной реализацией переходов.

Обобщенная реализация операций перехода

Два или более переходов назовем псевдоэквивалентными, если для их реализации может быть использована одинаковая операция перехода. Например, переход из состояния с кодом 5 в состояние с кодом 20 осуществляется с помощью операции «умножение на 4», т.е. логическим сдвигом двоичного значения кода состояния на два разряда влево. С помощью этой же операции может быть осуществлен переход из состояния с кодом 8 в состояние с кодом 32. Следовательно, данные переходы псевдоэквивалентны. Таким образом, в произвольной ГСА можно выделить E псевдоэквивалентных переходов, причем $E \leq M$.

Подобное обобщение микропрограммных переходов позволяет сократить количество КС в схеме ЛОА, получив структуру ЛОА с операционной частью IM-типа (ЛОА с IM-ОЧ) (рис. 4).

Данная структура в сравнении со структурой на рис. 2 имеет следующие особенности:

- при наличии в ГСА псевдоэквивалентных переходов количество КС уменьшается в сравнении с ЛОА с I-ОЧ до числа $E \leq M$;
- усложняется внутренняя структура КС, реализующая не формирование констант, а арифметико-логические операции различной сложности, что может привести к снижению быстродействия операционной части МПА в сравнении с предыдущим вариантом;

- при уменьшении количества операций, формируемых операционной частью, уменьшается разрядность кода операции, упрощаются схемы мультиплексора результата и СФКО;

- количество псевдоэквивалентных переходов зависит от значений кодов состояний и влияет на количество и сложность комбинационных схем. Следовательно, имеется потенциальная возможность выбора таких значений кодов состояний, для которых схема ЛОА с IM-ОЧ будет содержать минимальное количество комбинационных схем и, как следствие, обладать минимальными затратами аппаратуры. Однако процесс подобного оптимального кодирования состояний не очевиден из структуры реализуемой ГСА и требует отдельного исследования.

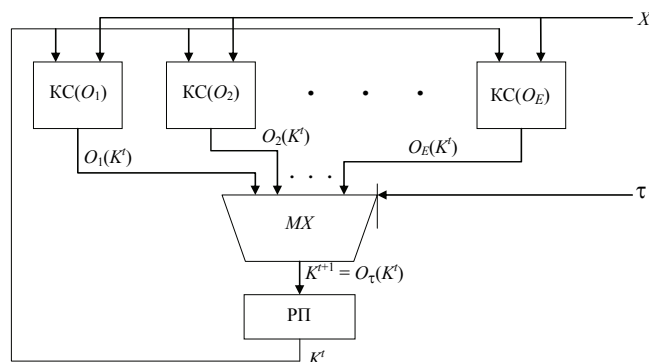


Рис. 4. Структура ЛОА с операционной частью IM-типа

Рассмотрим пример. Закодируем состояния ГСА G следующим образом: $K(a_0) = 2_{10} = 010_2$; $K(a_1) = 3_{10} = 011_2$; $K(a_2) = 4_{10} = 100_2$; $K(a_3) = 0_{10} = 000_2$; $K(a_4) = 1_{10} = 001_2$. Составим таблицу переходов, в которой операции переходов выбраны в соответствии с заданными кодами состояний (табл. 2).

Таблица 2. Переходы УА с IM-ОЧ

a_i	$K(a_i)$	a_j	$K(a_j)$	X	ОП
a_0	$2_{10} = 010_2$	a_1	$3_{10} = 011_2$	1	+1
a_1	$3_{10} = 011_2$	a_2	$4_{10} = 100_2$	X_1	$[x_1] [0] [0]$
		a_3	$0_{10} = 000_2$	\bar{X}_1	
a_2	$4_{10} = 100_2$	a_1	$3_{10} = 011_2$	X_2	$[0] [x_2] [1]$
		a_4	$1_{10} = 001_2$	\bar{X}_2	
a_3	$0_{10} = 000_2$	a_4	$1_{10} = 001_2$	1	+1
a_4	$1_{10} = 001_2$	a_0	$2_{10} = 010_2$	1	+1

Как видно из таблицы, при выбранных значениях кодов состояний все безусловные пере-

ходы выполняются с помощью одинаковой операции «+1», обобщенной для всех (в ГСА G) безусловных переходов.

В то же время операции условного перехода не являются обобщенными. Несмотря на то что код следующего состояния при условных переходах формируется в нашем примере достаточно просто (конкатенацией битовых констант и сигналов ЛУ), для каждой из ОП условных переходов требуется отдельный код операции в схеме СФКО и отдельный вход мультиплектора результата.

Общая реализация операций перехода

В некоторых случаях (для многих ГСА) возможно сведение всего множества операций переходов к двум операциям, реализуемым двумя комбинационными схемами. При этом одна КС должна реализовывать операции, выполняемые под влиянием значений ЛУ (условные переходы, УП), другая КС – операции, выполняемые без использования значений ЛУ (безусловные переходы, БП). Проводя аналогию с операционным M -автоматом, возможна как последовательная, так и параллельная реализация данных частей, что приводит к двум структурам ЛОА с операционной частью M -типа: ЛОА с последовательной M -ОЧ (рис. 5, а) и ЛОА с параллельной M -ОЧ (рис. 5, б).

Структура с последовательной M -ОЧ позволяет выполнить операцию условных переходов, зависящих от ЛУ, и некоторые общие безусловные преобразования. В любом случае в каждом такте работы структура реализует либо условный, либо безусловный переход. За счет последовательно расположенных схем КС_{УП} и КС_{БП} быстродействие схемы будет ниже, чем в случае параллельной M -ОЧ.

В структуре с параллельной M -ОЧ операции, соответствующие условным и безусловным переходам, разнесены в две параллельно расположенных КС. При этом время срабатывания автомата будет определяться максимальным временем среди двух КС. Мультиплексор результата, как и комбинационные схемы, управляется специальным разрядом τ_1 из поля КО схемы СФКО.

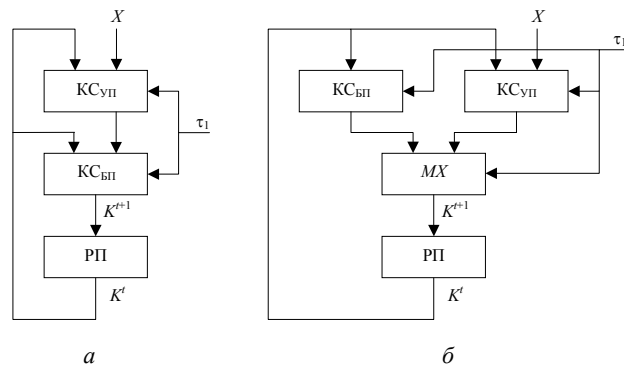


Рис. 5. Структура ЛОА: а – с последовательной, б – параллельной M -ОЧ

Очевидно, что условием применения структуры ЛОА с M -ОЧ является возможность реализации всех операций переходов ГСА с помощью двух КС. Можно утверждать, что для произвольной ГСА это в общем случае невозможно, поэтому данную структуру ЛОА можно считать в некоторой степени «идеальной».

Обобщая рассмотренные структуры ЛОА, можно сделать следующий вывод. Максимальной по аппаратным затратам является структура ЛОА с индивидуальной реализацией переходов. Выделение псевдоэквивалентных переходов приводит к структуре ЛОА с обобщенными ОП. Результат синтеза зависит от применяемых методов оптимизации и характеристик реализуемой ГСА и стремится к структуре ЛОА с общими микрооперациями.

Рассмотрим пример. Пусть для ГСА G кодирование состояний проведено следующим образом: $K(a_0) = 2_{10} = 010_2$; $K(a_1) = 3_{10} = 011_2$; $K(a_2) = 5_{10} = 101_2$; $K(a_3) = 0_{10} = 000_2$; $K(a_4) = 1_{10} = 001_2$. Составим таблицу переходов, в которой операции переходов выбраны в соответствии с заданными кодами состояний (табл. 3).

Здесь L_{1C} – операция циклического сдвига на один разряд вправо, R_2 – операция сдвига на два разряда вправо с заполнением освободившихся разрядов нулями.

Как и в предыдущем примере, все безусловные переходы реализуются с помощью общей операции увеличения содержимого РП на единицу. Условные переходы реализуются с помощью общей операции « $x_i \& L_{1C}(K(a_i)) \vee \bar{x}_i \& R_2(K(a_i))$ », в которой значение ЛУ влияет на способ фор-

мирования результата. Поскольку в операциях условного перехода анализируются различные сигналы ЛУ, то при построении схемы ОЧ для рассматриваемого примера необходимо применить метод кодирования логических условий [7, 8], что приведет к введению дополнительных разрядов кода ЛУ в схеме СФКО. Тем не менее, оба условных перехода реализуются с помощью одной ОП, которой соответствуют один код и вход мультиплексора результата.

Т а б л и ц а 3. Переходы УА с М-ОЧ

a_i	$K(a_i)$	a_j	$K(a_j)$	X	ОП
a_0	$2_{10} = 010_2$	a_1	$3_{10} = 011_2$	1	+1
a_1	$3_{10} = 011_2$	a_2	$5_{10} = 101_2$	X_1	$X_1 L_{1C} \vee \bar{X}_1$ R_2
		a_3	$0_{10} = 000_2$	\bar{X}_1	
a_2	$5_{10} = 101_2$	a_1	$3_{10} = 011_2$	X_2	$X_2 L_{1C} \vee \bar{X}_2$ R_2
		a_4	$1_{10} = 001_2$	\bar{X}_2	
a_3	$0_{10} = 000_2$	a_4	$1_{10} = 001_2$	1	+1
a_4	$1_{10} = 001_2$	a_0	$2_{10} = 010_2$	1	+1

Каноническая реализация локального операционного автомата

Традиционный К-ОА предполагает наличие нескольких регистров-приемников, каждому из которых сопоставлен собственный набор комбинационных схем. Поскольку в ЛОА используется единственный регистр памяти, ЛОА с операционной частью канонического типа (ЛОА с К-ОЧ) является ни чем иным как ЛОА с индивидуальной реализацией переходов (ЛОА с I-ОЧ).

Заключение. Применение принципа операционного формирования переходов к структуре МПА позволяет рассматривать схему формирования переходов в качестве локального операционного автомата. Если набор операций, формируемых традиционным ОА, определяется лишь алгоритмом обработки данных и не зависит от значений обрабатываемых величин, то в случае ЛОА его операционная структура

определяется арифметическими значениями кодов состояний.

Стремление уменьшить сложность схемы ЛОА приводит к различным вариантам организации его операционной части. Структура ЛОА с I-ОЧ обладает максимальными аппаратными затратами, ЛОА с М-ОЧ – минимальными, а затраты аппаратуры в ЛОА с ИМ-ОЧ имеют промежуточные значения. Эти же утверждения справедливы и для быстрейшего соответствующих ЛОА. В качестве дальнейших исследований данных структур авторы видят разработку и исследование методов оптимизации аппаратных затрат, что возможно при условии уменьшения количества операций переходов за счет выделения псевдоэквивалентных переходов и специального кодирования состояний.

1. Баранов С.И. Синтез микропрограммных автоматов. – Л.: Энергия, 1979. – 232 с.
2. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов. – М.: Физматгиз, 1962. – 476 с.
3. Грушевицкий Р.И., Мурсаев А.Х., Узрюмов Е.П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
4. Соловьев В.В. Проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 638 с.
5. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Организация устройств управления с операционной адресацией // УСиМ. – 2008. – № 6. – С. 34–39.
6. Майоров С.А., Новиков Г.И. Принципы организации цифровых машин. – Л.: Машиностроение, 1974. – 432 с.
7. Баркалов А.А. Палагин А.В. Синтез микропрограммных устройств управления. – К., 1997. – 136 с.
8. Баркалов А.А. Синтез устройств управления на программируемых логических устройствах. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 262 с.

Поступила 21.11.2009
Тел. для справок: (062) 304-9258 (Донецк)
E-mail: a.barkalov@jie.uz.zgora.pl, cpld@mail.ru
© А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков, 2010