

Розділ 3. Інформаційно-вимірювальні системи, електронні та мікропроцесорні прилади

УДК 681.324

А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков

Университет Зеленогурский, Польша, г. Зеленая Гура,
институт компьютерной инженерии и электроники;
Государственный университет информатики и искусственного интеллекта, г. Донецк,
кафедра систем искусственного интеллекта
E-mail: a.barkalov@iie.uz.zgora.pl, cpld@mail.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ ЧАСТИ В УПРАВЛЯЮЩЕМ АВТОМАТЕ С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

Аннотация

Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Организация операционной части в управляющих автоматах с операционным автоматом переходов. Предложены способы организации операционной части в микропрограммном управляющем автомате с операционным автоматом переходов. Приведены примеры построения таблиц переходов управляющего автомата для операционной части с индивидуальными, обобщенными и общими операциями переходов.

Ключевые слова: микропрограммный управляющий автомат, операционный автомат, граф-схема алгоритма, коды состояний, операции переходов.

Общая постановка проблемы

Одним из основных элементов современных вычислительных систем является 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].

Сегодня существует множество различных методов оптимизации аппаратных затрат в схеме УУ [5, 6]. В основе большинства из них лежит принцип увеличения логических уровней схемы, что зачастую приводит к уменьшению быстродействия схемы устройства. При этом актуальной остается задача разработки новых моделей и методов синтеза устройств управления, направленных на уменьшение аппаратных затрат при сохранении приемлемого быстродействия схемы УУ, ориентированных на использование базиса современных ПЛИС.

Постановка задач исследования

В работе [7] предложено реализовывать переходы между состояниями не с помощью традиционных систем булевых функций, а с использованием арифметико-логических операций над кодом текущего состояния и сигналами логических условий (ЛУ). При этом код состояния рассматривается не как совокупность отдельно формируемых разрядов, а как целостная арифметическая величина. Такой подход позволяет организовать схему формирования переходов автомата в виде операционного автомата переходов (ОАП), реализующего множество операции переходов. Это дает возможность использовать стандартные библиотечные элементы САПР (сумматоры, сдвигатели) для синтеза схемы переходов МПА, что позволяет снизить затраты аппаратуры в схеме УУ.

При синтезе операционного автомата переходов целесообразной является разработка специальных методов оптимизации схемы ОАП, которые на сегодняшний день являются неисследованными. В настоящей работе предлагаются различные варианты организации операционной части операционного автомата переходов в составе микропрограммного автомата, рассматриваются их достоинства и недостатки.

Целями настоящей работы являются:

1. Разработка структурной модели операционного автомата переходов.
2. Анализ известных способов организации схемы операционного автомата.
3. Разработка структурных моделей операционного автомата переходов.

1. Организация операционного автомата переходов

Управляющий автомат с операционным автоматом переходов, предложенный в [7], описывается структурной моделью, изображенной на рис. 1.

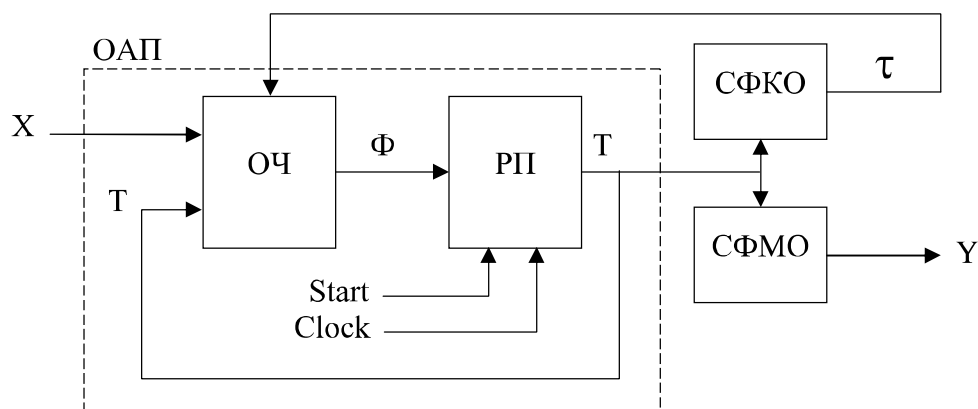


Рисунок 1 – Структурная модель МПА с ОАП

Данная модель имеет следующие характерные особенности:

- 1) Коды состояний МПА рассматриваются не как совокупность отдельных битов, а как единая арифметическая величина, представленная в двоичном коде.
- 2) Микропрограммные переходы выполняются с помощью операционного автомата переходов, реализующего преобразование кода текущего состояния $K(a^i)$ в код следующего состояния (состояния перехода) $K(a^{i+1})$.
- 3) Преобразование кодов состояний в ОАП 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 осуществляет формирование кода следующего состояния Φ на основании кода текущего состояния T , сигналов логических условий (ЛУ) X и кода операции (КО), представленного переменными τ :

$$\Phi = \Phi (T, X, \tau). \tag{1}$$

Код следующего состояния Φ поступает на входы регистра памяти РП, который реализуется на D-триггерах и совместно с ОЧ образует операционный автомат переходов. 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 производится 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 t согласно значению КО.

В рассматриваемой модели МПА 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:

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

Здесь 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 является условным, 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:

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

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

2. Типовые структурные модели операционных автоматов

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

В ОА с канонической структурой каждой микрооперации реализуемого алгоритма обработки данных сопоставлена отдельная комбинационная схема (КС). Данный тип ОА обладает максимальными затратами аппаратуры, максимальной производительностью (средним числом одновременно выполняемых 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, по сравнению с К-автоматом, достигается уменьшение аппаратурных затрат при одновременном уменьшении быстродействия 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 двуместные микрооперации. Число операционных элементов в схеме является минимально достаточным для реализуемого алгоритма. За один такт работы M-автомат способен выполнить только одну микрооперацию. Данная модель ОА характеризуется минимальными аппаратурными затратами при минимальном быстродействии.

IM-автоматы позволяют либо выполнять в каждом такте работы одну двуместную и одну одноместную микрооперации для различных регистров-приемников (автомат с параллельной комбинационной схемой, IMp-автомат), либо одноместную и двуместную

микрооперации для одного регистра-приемника (автомат с последовательной комбинационной схемой, IM_S -автомат). Увеличение числа комбинационных схем приближает данную модель к I-автомату, уменьшение – к M-автомату. IM-автоматы обладают промежуточными характеристиками по сравнению с I- и M-автоматами.

3. Особенности организации операционного автомата переходов

Операционный автомат переходов в составе МПА имеет следующие характерные особенности:

1) ОАП 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 ОАП, определяется множеством переходов УА или, в конечном итоге, граф-схемой реализуемого алгоритма управления.

2) В ОАП присутствует единственная регистровая схема – регистр памяти, хранящий код состояния управляющего автомата. Для любой ОП регистр памяти является единственно возможным регистром-приемником. В качестве исходных данных для выполняемой операции выступают как РП, так и множество сигналов ЛУ, поступающих извне и в общем случае являющихся асинхронными по отношению к схеме ОАП.

3) В традиционном ОА значения обрабатываемых данных в общем случае 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 схемой УА. В случае ОАП разработчик имеет дело с «жестко» заданной ГСА и, как следствие, жестко заданными кодами состояний. Следовательно, ОАП должен быть спроектирован таким образом, чтобы не допустить возникновения каких-либо ошибочных ситуаций при обработке кодов состояний. Любой предусмотренный переход (преобразование кода состояния) должен безошибочно обрабатываться схемой ОЧ. В связи с этим ОАП не формирует никаких признаков, характеризующих выполнение той или иной операции, и в его структуре схема формирования ЛУ отсутствует.

4. Способы организации операционной части в операционном автомате переходов

Исходными данными для построения комбинационной части традиционного ОА является множество микроопераций заданного алгоритма обработки данных. В целом можно утверждать, что рассмотренные выше типовые структуры ОА различаются методиками проектирования множества реализуемых микроопераций на множество комбинационных схем автомата. Проводя аналогию с традиционным ОА цифровой системы [8], можно утверждать, что схема ОАП реализует отображение множества операций переходов на множество комбинационных схем устройства (число переходов ГСА будем считать равным числу состояний управляющего автомата). При этом возможны следующие варианты такого отображения.

4.1. Индивидуальная реализация операций перехода

В этом случае каждому из M переходов заданной ГСА ставится в соответствие отдельная операция перехода, которой, в свою очередь, соответствует комбинационная схема $КС(O_m)$, реализующая требуемую функцию преобразования кода текущего состояния в код состояния перехода. Все комбинационные схемы $КС(O_1)$ - $КС(O_M)$ включены параллельно друг другу, а выбор результата выполняется мультиплексором результата МХ (рис. 2).

Назовем данную модель ОАП моделью с операционной частью I-типа (ОАП с I-ОЧ). В ней внутренняя организация комбинационных схем может быть различной. Если КС соответствует безусловному переходу, то она может быть реализована в виде формирователя константы кода состояния перехода, не зависящей ни от кода текущего состояния, ни от логических условий. Если же КС соответствует условному переходу, то ее схема может представлять собой мультиплексор констант, управляемый сигналами соответствующих ЛУ.

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 операции. Для ГСА средней сложности ($M=1000$, [6]) получим мультиплексор с 1000 10-разрядных направлений. Столь сложный мультиплексор на практике может быть реализован в виде многоуровневой иерархической схемы, что приведет, помимо значительных затрат аппаратуры, к снижению быстродействия.

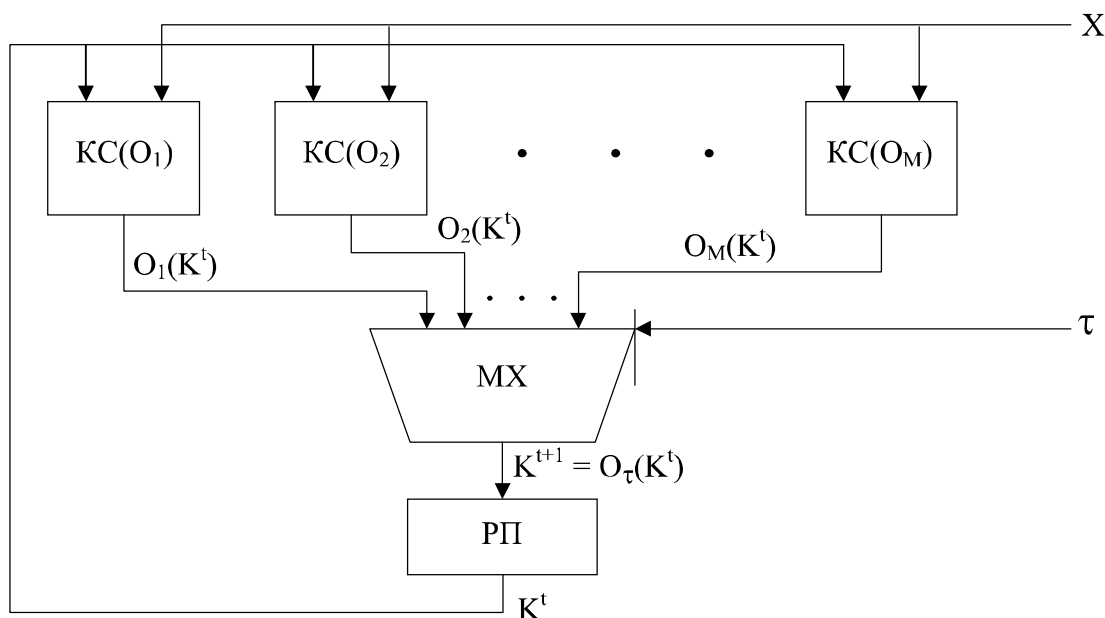


Рисунок 2 – Структурная модель ОАП с операционной частью I-типа

Таким образом, недостатками структуры ОАП с I-ОЧ являются большие аппаратные затраты и временные задержки в мультиплексоре результата, возрастающие с увеличением числа вершин ГСА. Также ОАП с I-ОЧ обуславливает высокую сложность схемы СФКО за счет максимальной разрядности кода ОП. Основным достоинством ОАП с I-ОЧ является универсальность проектирования: построение схемы автомата является однозначным для заданной ГСА и состоит в последовательной реализации КС всех ОП.

4.2. Обобщенная реализация операций перехода

Два или более переходов будем называть 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», то есть логическим сдвигом двоичного значения кода состояния на 2 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 ОАП, получив структурную модель ОАП с операционной частью IM-типа (ОАП с IM-ОЧ) (рис. 4).

Данная модель по сравнению с моделью на рис. 2 имеет следующие особенности:

1. За счет наличия в ГСА псевдоэквивалентных переходов количество КС уменьшается по сравнению с ОАП с I-ОЧ до числа $E \leq M$.

2. В общем случае усложняется внутренняя структура КС, которая здесь реализует не формирование констант, а арифметико-логические операции различной сложности, что может привести к снижению быстродействия операционной части по сравнению с I-ОЧ.

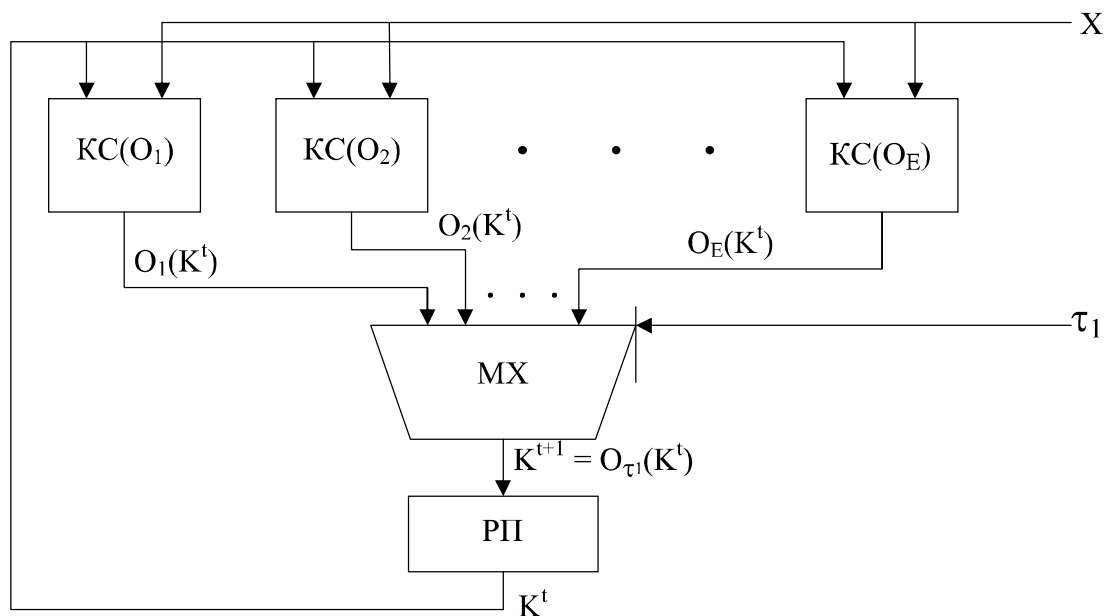


Рисунок 4 – Структурная модель ОАП с операционной частью ИМ-типа

3. Вследствие уменьшения количества операций, формируемых операционной частью, разрядность кода операции τ_1 уменьшается по сравнению с разрядностью кода τ в схеме ОАП с I-ОЧ. При этом упрощаются схемы мультиплексора результата и СФКО.

4. Количество псевдоэквивалентных переходов зависит от значений кодов состояний и влияет на количество и сложность комбинационных схем. Следовательно, существует возможность выбора таких значений кодов состояний, при которых схема ОАП с ИМ-ОЧ будет содержать минимальное количество комбинационных схем и, как следствие, обладать минимальными затратами аппаратуры. Однако процесс подобного оптимального кодирования состояний не является очевидным из структуры реализуемой ГСА и требует отдельного исследования.

4.3. Общая реализация операций перехода

В некоторых случаях (для некоторых ГСА) возможно сведение всего множества операций переходов к двум операциям, реализуемым двумя комбинационными схемами. При этом одна КС должна реализовывать операцию, выполняемую под влиянием значений ЛУ (условный переход, УП), другая КС – операцию, выполняемую без использования значений ЛУ (безусловный переход, БП). Проводя аналогию с операционным М-автоматом, возможна как последовательная, так и параллельная реализация данных частей, что приводит к двум моделям ОАП с операционной частью М-типа: ОАП с последовательной М-ОЧ (рис. 5, а) и ОАП с параллельной М-ОЧ (рис. 5, б).

Модель с последовательной М-ОЧ позволяет использовать операцию безусловного перехода как самостоятельно, так и в качестве составной части операции условного перехода. За счет последовательно расположенных схем КС_{УП} и КС_{БП} быстродействие схемы будет ниже, чем в случае параллельной М-ОЧ. Отметим, что в данной модели мультиплексор результата не требуется.

В модели с параллельной М-ОЧ операции, соответствующие условным и безусловным переходам, разнесены в две параллельно расположенных КС. При этом время срабатывания автомата будет меньше, чем в предыдущем случае, и определяться максимальным временем

среди двух КС. Мультиплексор результата, как и комбинационные схемы, управляется одноразрядным кодом операции τ_2 , поступающим из СФКО.

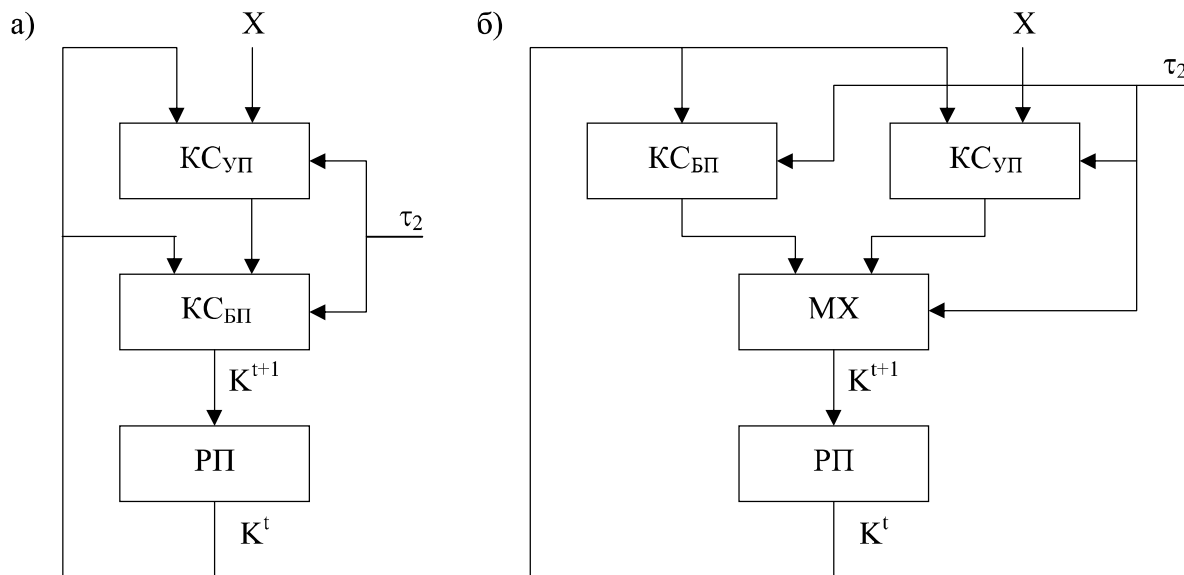


Рисунок 5 – Структурная модель ОАП с последовательной (а) и параллельной (б) М-ОЧ

Очевидно, что условием применения ОАП с М-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 модель ОАП можно считать в некоторой степени «идеальной».

Обобщая рассмотренные модели ОАП, можно сделать следующий вывод. Максимальной по аппаратным затратам является структурная модель ОАП с индивидуальной реализацией переходов. Выделение псевдоэквивалентных переходов приводит к модели ОАП с обобщенными операциями. Результат синтеза зависит от применяемых методов оптимизации и характеристик реализуемой ГСА, и стремится к модели ОАП с общими операциями переходов.

4.5. Каноническая реализация операционного автомата переходов

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

Выводы.

В настоящей работе предложены различные способы структурной организации операционного автомата переходов в составе микропрограммного управляющего автомата.

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 ОАП его организация определяется арифметическими значениями кодов состояний.

Стремление уменьшить сложность схемы ОАП приводит к различным вариантам организации его операционной части. Модель ОАП с I-ОЧ обладает максимальными

аппаратурными затратами, ОАП с М-ОЧ – минимальными, а затраты аппаратуры в ОАП с ИМ-ОЧ имеют промежуточные значения. Эти же утверждения справедливы и для быстродействия соответствующих ОАП. В качестве дальнейших исследований данных структур авторы видят разработку и исследование методов оптимизации аппаратурных затрат, что возможно при условии уменьшения количества операций переходов за счет выделения псевдоэквивалентных переходов и специального кодирования состояний.

Литература

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

Надійшла до редакції:
10.02.2011

Рекомендовано до друку:
д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

Abstract

Barkalov A.A., Babakov R.M. Organization of an operational block in operating automatic machines with operational automaton of transitions.

Ways of the organisation of an operational block of microprogram control automaton with operational automaton of transitions are offered. Examples of construction of tables of transitions of the control automaton for an operational block with the individual, generalised and general operations of transitions are resulted.

Key words: microprogram control automaton, operational automaton, flow-chart, codes of states, operations of transitions.

Анотація

Баркалов О.О., Бабаков Р.М. Організація операційної частини в керуючих автоматах з операційним формуванням переходів.

Запропоновані засоби організації операційної частини в мікропрограмному керуючому автоматі з операційним автоматом переходів. Наведені приклади побудови таблиць переходів керуючого автомата для операційної частини з індивідуальними, узагальненими та спільними операціями переходів.

Ключові слова: мікропрограмний керуючий автомат, операційний автомат, граф-схема алгоритму, коди станів, операції переходів.

© Баркалов А.А., Бабаков Р.М., 2011