

УДК 681:324

Р.М. Бабаков (канд. техн. наук, доц.), И.В. Ярош

ГБУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Красноармейск

кафедра компьютерных наук

E-mail: cpld@mail.ru; yarosh.irina@inbox.ru

ОПЕРАЦИОННЫЙ АВТОМАТ ПЕРЕХОДОВ

Проанализированы особенности структурной организации операционного автомата переходов в составе микропрограммного управляющего автомата. Проведен сравнительный анализ структуры операционного автомата переходов с известными типами операционных автоматов. Характерной особенностью операционного автомата переходов является использование единственной регистровой схемы, выступающей в каждом такте работы в качестве регистра исходных данных и регистра результата. Выявлено, что в рассматриваемой структуре операционного автомата допустимо использование эквивалентных микроопераций и обобщенных операторов, что подтверждено соответствующим примером. В результате проведенных исследований сделаны выводы о классификации структуры операционного автомата переходов с позиций современной теории автоматов.

Ключевые слова: микропрограммный автомат, операционный автомат переходов, операция переходов, обобщенные микрооперации, аппаратные затраты.

Введение. Важным компонентом современных цифровых систем является устройство управления, одним из способов реализации которого является микропрограммный автомат (МПА) [1, 2]. Наблюдаемый сегодня рост сложности алгоритмов, интерпретируемых МПА, способствует увеличению аппаратных затрат в логической схеме автомата. В данном аспекте актуальной является задача снижения аппаратных затрат в схеме МПА, одно из решений которой состоит в разработке и анализе новых структур МПА, обладающих меньшими аппаратными затратами по сравнению с ранее известными структурами.

В работах [3-6] предлагается структура МПА, схема формирования переходов (СФП) которого организована в виде операционного автомата (ОА), называемого операционным автоматом переходов (ОАП). Использование МПА с ОАП вместо канонической реализации МПА позволяет снизить затраты аппаратуры в логической схеме устройства при условии построения ОАП в виде множества комбинационных схем, каждая из которых реализует множество автоматных переходов при неизменной сложности схемы.

Используемая в настоящее время классификация операционных автоматов, приведенная в [7, 8], позволяет применять к операционным автоматам известные методы оптимизации. По сравнению со структурой традиционного ОА, структура операционного автомата переходов имеет ряд специфических особенностей, вследствие которых возможность использования в ней тех или иных методов оптимизации не является очевидной и требует исследования.

Микропрограммный автомат с операционным автоматом переходов. На рис. 1 изображена базовая структура МПА [2], функционирующая следующим образом. Схема формирования переходов (СФП) в соответствии с кодом текущего состояния T и сигналами логических условий X формирует код d состояния перехода, поступающий в регистр памяти (РП). Схема формирования микроопераций (СФМО) формирует набор микроопераций Y , поступающий в объект управления МПА. Наличие связи, показанной пунктиром, позволяет считать данную структуру автоматом Мили, отсутствие – автоматом Мура.

В соответствии с каноническим методом структурного синтеза цифровых автоматов [1, 2], схема СФМО строится по системе канонических уравнений, сложность которой

возрастает с увеличением числа переходов автомата. В работах [3-6] предлагается способ снижения аппаратных затрат в схеме СФП за счет представления ее структуры в виде операционного автомата, называемого операционным автоматом переходов. Структурная организация ОАП приведена на рис. 2.

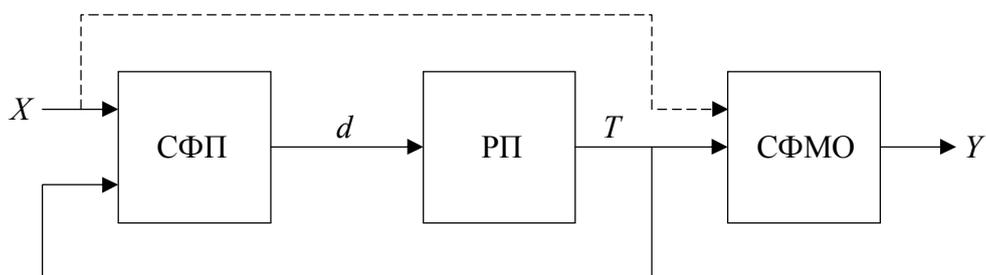


Рисунок 1 – Базовая структура микропрограммного автомата

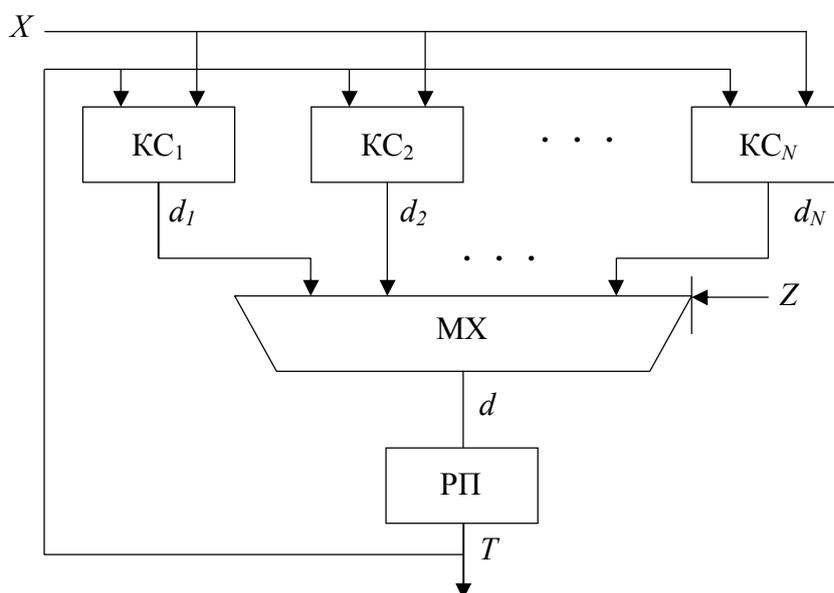


Рисунок 2 – Структура операционного автомата переходов

Здесь каждая из комбинационных схем $КС_1$ - $КС_N$ выполняет некоторую операцию (операцию переходов) d_i над сигналами T и X , реализуя, таким образом, отдельное подмножество автоматных переходов, не пересекающееся с подмножествами переходов, реализуемых другими комбинационными схемами. Снижение аппаратных затрат достигается в том случае, если затраты аппаратуры в схеме $КС_i$ не зависят от числа реализуемых переходов. Примером такой схемы является инкрементор, используемый при построении автомата на счетчике (С-автоматов, [9-11]) и композиционных микропрограммных устройств управления [11, 12].

В каждом такте работы устройства выполняется выбор результата одной из N операций переходов. Выбор осуществляется с помощью мультиплексора MX под управлением множества сигналов Z , задающих коды $K(d_1)$ - $K(d_N)$ функций d_1 - d_N и выполняющих для ОАП роль управляющих сигналов. Наличие в структуре на рис. 1 регистра памяти, выход которого связан со входами комбинационных схем, позволяет считать данную структуру операционным автоматом, а ее использование для реализации переходов микропрограммного автомата предопределяет ее название – операционный автомат переходов.

На рис. 3 показана структура МПА с ОАП, в которой регистр памяти РП, изображенный на рис. 1, является составной частью ОАП.

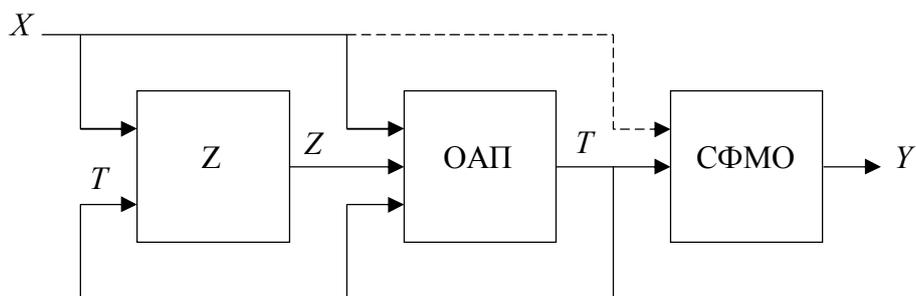


Рисунок 3 – Структура МПА с ОАП

На рис. 3 Z -подсхема реализует функцию $Z=Z(T, X)$ и формирует код Z операции перехода. Z -подсхема строится каноническим способом и реализует систему булевых уравнений, строящуюся по таблице истинности [1, 7]. Не смотря на то, что формально данная схема схожа со схемой СФП в базовой структуре МПА (рис. 1), разрядность кода Z обычно оказывается меньше разрядности кода состояния T в силу того, что число операций переходов в общем случае значительно меньше числа состояний микропрограммного автомата.

Анализ структуры операционного автомата переходов. Проанализируем отличия структурной организации ОАП от традиционной структуры операционного автомата [7], после чего определим место ОАП в современной классификации операционных автоматов.

Структура операционного автомата переходов, изображенная на рис. 2, по сравнению с канонической структурой ОА характеризуется следующими особенностями.

1. Множество функций ОАП представлено множеством функций d_1-d_N , реализуемых схемами $КС_1-КС_N$. Поскольку комбинационные схемы имплементируют соответствующие им операции переходов, можно полагать, что множество функций ОАП есть множество используемых операций переходов.

2. Память ОАП представлена единственным регистром РП, выступающим в каждой выполняемой операции в роли регистра исходных данных и регистра результата.

3. Роль управляющих сигналов выполняют сигналы кода операции Z , применяемые к мультиплексору результата МХ.

4. В традиционном ОА процесс обработки данных допускает возникновение различных ошибочных ситуаций (переполнение, деление на ноль и т.п.) Подобные ситуации находят отражение во множестве сигналов логических условий, формируемых в канонической структуре ОА специальной схемой и анализируемых в дальнейшем логической схемой управляющего автомата. В отличие от универсального ОА, операционный автомат переходов всегда проектируется для конкретного МПА таким образом, чтобы в процессе обработки кодов состояний возникновение каких-либо ситуаций, требующих анализа, было невозможно. Как следствие, ОАП не формирует никаких признаков результата выполнения операций, и в его структуре на рис. 2 схема формирования логических условий отсутствует.

5. В качестве внешних данных выступают сигналы логических условий X . Как показано в [3-5], данные сигналы могут по-разному использоваться в операциях переходов – в качестве скалярных или векторных фрагментов данных, в качестве условий выбора результата, иным удобным способом.

6. Результат, формируемый каноническим ОА, при необходимости может быть передан во внешнюю схему сразу с выхода комбинационной схемы без предварительной загрузки в один из своих регистров [7, 8]. В операционном автомате переходов результат совпадает с выходом d мультиплексора МХ и всегда помещается в регистр памяти РП. Это обусловлено особенностями структурной организации микропрограммного автомата, в котором отсутствуют иные схемы, кроме РП, использующие код d состояния перехода.

Проанализируем структурную организацию ОАП с позиций теории, изложенной в главах 6 и 7 работы [7]. Основополагающим в данном анализе является тот факт, что в структуре ОАП присутствует только один регистр результата, представленный регистром РП.

В соответствии с [7] любая микрооперация (МО) содержит (в синтаксическом смысле) оператор присваивания, в левой части которого находится один из регистров результата. Поскольку в ОАП регистром результата всегда является РП, все микрооперации содержат РП в левой части оператора присваивания и отличаются друг от друга только правой частью. Согласно структуре ОАП (рис. 2), в правой части может присутствовать одна из функций d_1-d_N . Таким образом, в ОАП каждая микрооперация представляется некоторой функцией d_i , а количество микроопераций всегда равно N .

Поскольку память ОАП одновременно является памятью микропрограммного автомата, один такт работы ОАП совпадает с одним тактом работы МПА. Единственность регистра результата позволяет ОАП выполнять в каждом такте только одну микрооперацию, реализуя, таким образом, один переход МПА. Невозможность выполнения нескольких МО в одном такте работы ОАП согласуется с невозможностью выполнения микропрограммным автоматом нескольких переходов в одном такте своей работы. Как следствие, в ОАП никакие МО не могут являться совместимыми [7]. Функциональная совместимость микроопераций невозможна вследствие ограничения на выполнение только одной МО в каждом такте работы ОАП, структурная совместимость невозможна вследствие наличия в ОАП единственного регистра результата.

Для канонического ОА допустима различная структурная организация [7]. Так, в I-автомате используется принцип закрепления комбинационных схем, используемых для выполнения микроопераций, за каждым из регистров результата. Структурная организация M-автоматов базируется на обобщении комбинационных схем по отношению ко всем регистрам результата. Наличие в ОАП единственного регистра результата наделяет структуру ОАП признаками, характерными для I-автоматов и M-автоматов одновременно. Действительно, в ОАП за регистром РП закреплено собственное множество комбинационных схем, не используемых для выполнения микроопераций с другими регистрами результата. В то же время множество комбинационных схем ОАП является общим для всех имеющихся регистров результата. Таким образом, ОАП можно классифицировать одновременно как I-автомат и как M-автомат. В теории данные классы ОА обладают диаметрально противоположными свойствами, однако в структуре с единственным регистром результата эти различия нивелируются.

В то же время ОАП не может быть отнесен к классу IM-автоматов, обладающих промежуточными свойствами между автоматами I- и M- типов. Как известно, основной акцент в структуре IM-автоматов делается на функциональную совместимость микроопераций, обеспечивающую возможность выполнения нескольких МО в одном такте своей работы [7]. Поскольку в ОАП микрооперации не обладают ни функциональной, ни структурной совместимостью, характерные черты, присущие IM-автоматам, в структуре ОАП отсутствуют.

Также ОАП может быть классифицирован как операционный автомат с канонической структурой (K-автомат). Однако такое свойство K-автоматов, как максимальная по сравнению с другими структурными организациями производительность, здесь не проявляется, поскольку за один такт ОАП способен выполнить лишь одну микрооперацию.

Для уменьшения затрат аппаратуры в схеме ОАП могут быть применены понятия эквивалентных микроопераций и обобщенных операторов [7]. Выделение в операциях переходов одинаковых функций позволяет считать соответствующие им микрооперации эквивалентными и представлять их в форме обобщенных операторов.

Рассмотрим пример. Пусть в МПА с ОАП использованы три операции переходов O_1-O_3 :

$$\begin{aligned}
 O_1 : K(a^{t+1}) &:= K(a^t) + 2; \\
 O_2 : K(a^{t+1}) &:= K(a^t) + 2 \cdot K(a^t); \\
 O_3 : K(a^{t+1}) &:= \overline{K(a^t)} + 1,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $K(a^t)$ – код текущего состояния автомата, $K(a^{t+1})$ – код состояния перехода.

В операционном автомате переходов операциям O_1 - O_3 соответствуют функции d_1 - d_3 , при реализации которых текущее состояние и состояние перехода отождествляются с регистром памяти РП. Это позволяет представить выражение (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 d_1 : РП &:= РП + 2; \\
 d_2 : РП &:= РП + 2 \cdot РП; \\
 d_3 : РП &:= \overline{РП} + 1.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Данным функциям может быть поставлен обобщенный оператор вида:

$$d_{1-3} : РП := A_1 + A_2, \tag{3}$$

$$\text{где } A_1 = \begin{cases} РП & \text{при } Z = K(d_1); \\ РП & \text{при } Z = K(d_2); \\ \overline{РП} & \text{при } Z = K(d_3), \end{cases} \quad A_2 = \begin{cases} 2 & \text{при } Z = K(d_1); \\ 2 \cdot РП & \text{при } Z = K(d_2); \\ 1 & \text{при } Z = K(d_3). \end{cases}$$

Обобщенному оператору (3) в ОАП соответствует следующий структурный фрагмент:

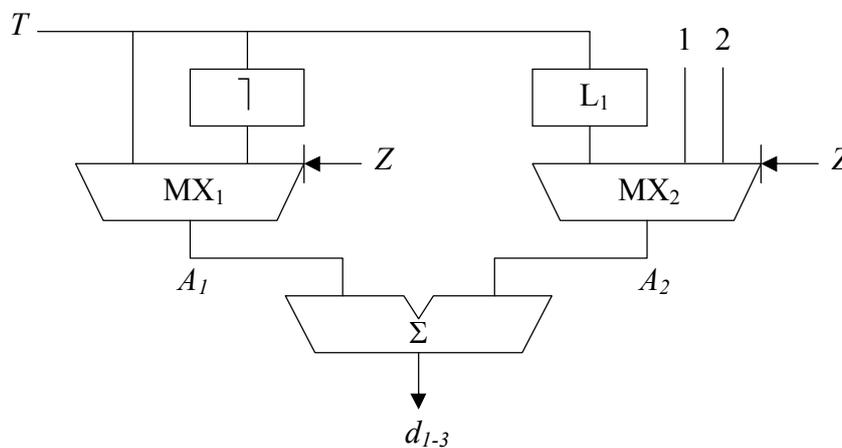


Рисунок 4 – Фрагмент схемы, соответствующий обобщенному оператору (3)

В данной схеме мультиплексоры MX_1 и MX_2 управляются кодом операции переходов Z и формируют, соответственно, аргументы A_1 и A_2 оператора (3). Блок «1» выполняет поразрядную инверсию кода текущего состояния T ; блок « L_1 » выполняет логический сдвиг операнда влево, реализуя, таким образом, операцию умножения на 2. На вход MX_2 подаются также константы «1» и «2», представленные в двоичном формате той же разрядности, что и код состояния T . Таким образом, в рассмотренном примере для операций переходов O_1 - O_3 может быть использован общий сумматор, значения на входе которого определяются мультиплексированием различных операндов.

Заключення.

Проведенный анализ особенностей операционного автомата переходов позволяет сделать следующие утверждения.

1. Операционный автомат переходов по структурной организации может быть классифицирован как операционный автомат с индивидуальной (I-автомат) и обобщенной (M-автомат) реализацией микроопераций. Также он содержит признаки, позволяющие отнести его к каноническому типу ОА.

2. Операционный автомат переходов не может быть классифицирован как IM-автомат с последовательной или параллельной комбинационной частью, занимающий промежуточную степень между автоматами I- и M- типов.

3. К операционному автомату переходов может быть применена методика снижения аппаратурных затрат, основанная на использовании эквивалентных микроопераций и обобщенных операторов.

Сделанные выводы приводят к постановке задачи оптимального синтеза логической схемы операционного автомата переходов с учетом особенностей его структурной организации. Решение данной задачи не является очевидным и требует отдельных исследований.

Список использованной литературы

1. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов / В.М. Глушков. – М.: Физматгиз, 1962. – 476 с.
2. Баранов С.И. Синтез микропрограммных автоматов / С.И. Баранов. – Л.: Энергия, 1979. – 232 с.
3. Баркалов А.А. Операционное формирование кодов состояний в микропрограммных автоматах / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков. – Кибернетика и системный анализ. – 2011. – №2. – С. 21 – 26.
4. Баркалов А.А. Организация устройств управления с операционной адресацией / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков. // Управляющие системы и машины. – 2008. – №6. – С. 34 – 39.
5. Баркалов А.А. Организация операционной части в управляющем автомате с операционным автоматом переходов / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Випуск 21 (183). – С. 149 – 156.
6. Баркалов А.А. Структурное представление процесса синтеза управляющих автоматов с операционным автоматом переходов / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Управляющие системы и машины. – 2011. – № 3. – С. 47 – 53.
7. Майоров С.А. Структура электронных вычислительных машин / С.А. Майоров, Г.И. Новиков. – Л.: Машиностроение, 1979. – 384 с.
8. Баркалов А.А. Синтез операционных устройств / А.А. Баркалов. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2003. – 306 с.
9. Баркалов А.А. Принципы оптимизации логических схем автоматов на счетчиках / А.А. Баркалов, В.А. Черкашин, Нахлavi Самир // Сборник научных трудов ДонДТУ. Серия «Вычислительная техника и автоматизация». – Донецк, ДонДТУ, 1999. – Выпуск 12. – С. 190 – 196.
10. Бабаков Р.М. Синтез двухуровневой схемы автомата Мура на счетчике / Р.М. Бабаков, Нахлavi Самир, В.В. Зайцев // Сборник научных трудов ДонДТУ. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем». – Донецк, ДонДТУ, 1999. – Выпуск 10. – С. 301 – 305.
11. Баркалов А.А. Синтез устройств управления на программируемых логических устройствах / А.А. Баркалов. – Донецк, ДонНТУ, 2002. – 262 с.
12. Баркалов А.А. Синтез микропрограммных устройств управления / А.А. Баркалов, А.В. Палагин. – Киев: Институт кибернетики НАН Украины, 1997. – 135 с.

References

1. Glushkov, V.M. (1962), *Sintez tsifrovih avtomatov* [Synthesis of digital automata], Fizmatgiz, Moscow, Russia.
2. Baranov, S.I. (1979), *Sintez mikroprogramnih avtomatov* [Synthesis of microprogram automata], Energiya, Leningrad, Russia.
3. Barkalov, A.A. and Babakov R.M. (2011), “Operational forming of state codes in microprogram automata”, *Kibernetika i sistemny analiz*, vol. 2, pp. 21 – 26.
4. Barkalov, A.A. and Babakov R.M. (2008), “Organization of control unit with operational addressing”, *Upravljajushie sistemy I mashiny*, vol. 6, pp. 34 – 39.
5. Barkalov, A.A. and Babakov R.M. (2008), “Organization of operational part in control unit with datapath of transitions”, *Sbirnik naukovih prats Donetskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu, seriya “Obchislualna tehnika ta avtomatizatsiya”*, vol. 21, no. 183, pp. 149-156.
6. Barkalov, A.A. and Babakov R.M. (2011), “Structural representation of process of synthesis of control units with datapath of transitions”, *Upravljajushie sistemy I mashiny*, vol. 3, pp. 47 – 53.
7. Majorov, S.A. and Novikov G.I. (1979), *Struktura elektronnih vychislitelnih mashin* [Structure of electronic computers], Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
8. Barkalov, A.A. (2003), *Sintez operatsionnih ustroystv* [Synthesis of operational devices], RVA DonNTU, Donetsk, Ukraine.
9. Barkalov, A.A., Cherkashin V.A. and Nachlavi Samir (1999), “Principles of optimization of logical circuits of final-state machine with counters”, *Sbornik nauchnih trudov Donetskogo gosudarstvennogo tehnicnogo universiteta, seriya “Vichislitelnaya tehnika I avtomatizatsiya”*, vol. 12, pp. 190 – 196.
10. Babakov, R.M., Nachlavi Samir and Zaytsev V.V. (1999), “Synthesis of two-level circuit of Moore final-state machine with counter”, *Sbornik nauchnih trudov Donetskogo gosudarstvennogo tehnicnogo universiteta, seriya “Problemi modelirovaniya i avtomatizatsiyi proektirovaniya dinamicheskikh sistem”*, vol. 10, pp. 301 – 305.
11. Barkalov, A.A. (2002), *Sintez ustroystv upravleniya na programiruemih logicheskikh ustroystvah* [Synthesis of control units on programmable logical devices], DonNTU, Donetsk, Ukraine.
12. Barkalov, A.A. (1997), *Sintez mikroprogramnih ustroystv upravleniya* [Synthesis of microprogram units], Institute of cybernetics of NAN of Ukraine, Kiev, Ukraine.

Поступила в редакцію:
23.03.2015

Рецензент:
д-р.техн. наук, проф. Зори А.А.

Р.М. Бабаков, І.В. Ярош

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Операційний автомат переходів. Проаналізовано особливості структурної організації операційного автомату переходів у складі мікропрограмного керуючого автомата. Проведено порівняльний аналіз структури операційного автомата переходів із відомими типами операційних автоматів. Характерною особливістю операційного автомата переходів є використання єдиної реєстрової схеми, яка в кожному такті роботи відіграє роль реєстра вхідних даних і реєстра результату. Виявлено, що в структурі операційного автомата переходів є допустимим використання еквівалентних мікрооперацій і узагальнених операторів, що підтверджене відповідним прикладом. В результаті проведених досліджень зроблені висновки щодо класифікації структури операційного автомата переходів з позицій сучасної теорії автоматів.

Ключові слова: мікропрограмний автомат, операційний автомат переходів, операція переходів, узагальнені мікрооперації, апаратні витрати.

R.M. Babakov, I.V. Yarosh

Donetsk National Technical University

Datapath of transitions. *In this paper, the object of study is the microprogram final-state machine with datapath of transitions. This type of final-state machine is one way of implementing of the control unit, which is part of all modern digital systems, and coordinates the work of other units of the system. The basic structure of datapath of transitions is a lot of combinational circuits, each of which implements a separate subset of the automaton transitions. As a register of input data and result register the memory register is used. Selecting one of the results of combinational circuits is performed via the multiplexer controlled by signals of operation code generated by a special circuit. The paper analyzes the features of the structural organization of the datapath of transitions that distinguish it from a datapath with the canonical structure. These features are the use of a single register circuit, no circuit of generation of logic conditions, the use of signals of logic conditions as external data, and other. In view of the selected features classification of datapath of transitions on the structural organization is given. We found that datapath of transitions is simultaneously datapath with individual and generalized combinational part and also has features of the canonical structure. At the same time datapath of transition is not datapath with sequential or parallel combinational part, since it lacks a functional and structural compatibility of microoperations. The article also noted that in order to minimize hardware expenses in datapath of transitions the known technique based on generalized microoperations and equivalent operators can be used. This possibility is confirmed by the according example. Obtained in this paper structural classification of datapath of transitions allows developing the methods of synthesis of this class of datapaths with optimized characteristics. This technique can use known approaches and methods that take into account the structural properties of the datapath of transitions. The problem of synthesis of datapath of transitions is actual and non-obvious task and differs from the problem of synthesis of canonical datapath.*

Keywords: *microprogram final-state machine, datapath of transitions, operation of transitions, common microoperations, hardware expenses.*



Бабаков Роман Маркович, Украина, канд. тех. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных наук. ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина). Основное направление научной деятельности – разработка и исследование методов синтеза цифровых устройств управления.



Ярош Ирина Викторовна, Украина, ассистент кафедры компьютерных наук. ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина). Основное направление научной деятельности – разработка и исследование систем с элементами искусственного интеллекта.