



СТРУКТУРНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ СИНТЕЗА МИКРОПРОГРАММНОГО АВТОМАТА С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

Аннотация. Предложено использовать представление методов синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов в виде структуры, блоки которой соответствуют элементам математической модели автомата. Разработаны пять структур, учитывающих различия в исходных данных и результатах методов синтеза. Описанные и подобные структуры можно использовать для классификации существующих и разрабатываемых в будущем методов синтеза данного класса автоматов.

Ключевые слова: микропрограммный автомат, операционный автомат переходов, метод синтеза, классификация.

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики современных вычислительных систем во многом определяются устройством управления (УУ), координирующим работу всех узлов системы [1]. Реализация УУ в виде микропрограммного автомата (МПА) позволяет добиться максимального быстродействия схемы устройства при максимальных аппаратурных затратах [2, 3]. При этом актуальна задача минимизации аппаратурных затрат в логической схеме МПА, одним из способов решения которой является разработка новых структур МПА и методов их синтеза [3–5].

МПА с операционным автоматом переходов (МПА с ОАП) [6] — одна из известных структур МПА, функция переходов в которой разделяется на множество частичных функций, реализующих собственное подмножество автоматных переходов. В общем случае каждая частичная функция имплементируется отдельной комбинационной схемой, аппаратурные затраты в которой не зависят или незначительно зависят от количества реализуемых его автоматных переходов. Уменьшение количества частичных функций способствует снижению аппаратурных затрат в схеме формирования переходов МПА. Совокупность комбинационных схем частичных функций переходов имеет структурную организацию, схожую с операционным автоматом.

В работе [7] рассмотрены общие вопросы синтеза МПА с ОАП и особое внимание уделено потенциальной возможности разработки множества методов синтеза, отличающихся исходными данными и результатами. В настоящей работе предложен способ классификации методов синтеза МПА с ОАП, основанный на структурном представлении процесса синтеза.

МИКРОПРОГРАММНЫЙ АВТОМАТ С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

Структурная схема МПА с ОАП [6] представлена на рис. 1. Рассмотрим основные ее блоки.

Блок ОАП (операционный автомат переходов) реализует множество операций переходов (ОП), используемых для преобразования кодов состояний авто-

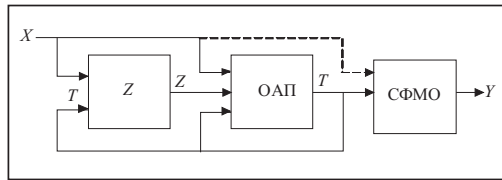


Рис. 1. Структурная схема МПА с ОАП

мата. Текущее состояние хранится в регистре памяти (РП), который является частью ОАП. Любая операция в ОАП выполняется над содержимым РП и помещает результат в него. ОАП реализует функцию переходов d , которая описывается выражением

$$T = d(T, X, Z),$$

где T — код состояния автомата, X — множество входных сигналов, Z — код ОП.

Блок Z предназначен для формирования кода Z операции, выполняемой ОАП в текущем такте работы устройства. Функция блока Z описывается выражением:

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

В соответствии с (1) отдельную ОП можно сопоставить каждому переходу автомата.

Блок СФМО (схема формирования микроопераций) формирует систему микроопераций (выходных сигналов) автомата, определяемую $Y = Y(T, X)$ в случае автомата Мили и $Y = Y(T)$ в случае автомата Мура. Наличие в структуре МПА с ОАП связи, показанной на рис. 1 пунктиром, позволяет считать данную структуру автоматом Мили, а если связи не существует — автоматом Мура.

В работе [8] предложена математическая модель МПА с ОАП, основанная на алгебраической интерпретации МПА с ОАП [9] и являющаяся системой изоморфизмов

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\delta_1} \leftrightarrow G_{I_1} \leftrightarrow G_{d_1}; \\ G_{\delta_2} \leftrightarrow G_{I_2} \leftrightarrow G_{d_2}; \\ \dots\dots\dots \\ G_{\delta_{N_I}} \leftrightarrow G_{I_{N_I}} \leftrightarrow G_{d_{N_I}}; \\ G_{\delta} \leftrightarrow G_d; \\ G_{\lambda} \leftrightarrow G_l. \end{array} \right. \quad (2)$$

В системе (2) первые N_I изоморфизмов выражают эквивалентность между абстрактным, промежуточным и структурным представлениями частичных функций переходов автомата (алгебры G_{δ_i} , G_{I_i} и G_{d_i} соответственно). Предпоследний изоморфизм между абстрактным (алгебра G_{δ}) и структурным (алгебра G_d) представлениями функции переходов автомата обеспечивает эквивалентность структурных (двоичных) кодов состояний независимо от количества N_I частичных функций переходов. Последний изоморфизм между абстрактным (алгебра G_{λ}) и структурным (алгебра G_l) представлениями функции выходов автомата обеспечивает использование одних и тех же структурных кодов состояний в функциях переходов и выходов МПА.

СТРУКТУРНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ СИНТЕЗА МПА С ОАП

В соответствии с [8, 9] в системе изоморфизмов (2) можно выделить три алгебраических уровня: абстрактных, промежуточных и структурных алгебр.

На уровне абстрактных алгебр расположены элементы, относящиеся к абстрактному автомату: абстрактная алгебра переходов $G_{\delta} = \langle \{A, Z\}, \{\delta\} \rangle$ и абстрактная алгебра выходов $G_{\lambda} = \langle \{A, Z, W\}, \{\lambda\} \rangle$. Здесь и далее первая компонента алгебры содержит ее носители, вторая — сигнатуру [9].

Элементами уровня промежуточных алгебр являются множество $K_I(A) = \{K_{I_1}(A_{I_1}), \dots, K_{I_{N_I}}(A_{I_{N_I}})\}$ промежуточных кодов состояний, множество

$O = \{O_1, \dots, O_{N_I}\}$ операций переходов и множество $K_I(Z) = \{K_{I_1}(Z_{I_1}), \dots, K_{I_{N_I}}(Z_{I_{N_I}})\}$ промежуточных кодов входных сигналов. Данные элементы образуют множество промежуточных алгебр переходов $G_I = \{G_{I_1}, \dots, G_{I_{N_I}}\}$.

Элементами уровня структурных алгебр являются множество $K_S(A)$ структурных (двоичных) кодов состояний, множество $K_S(Z)$ структурных (двоичных) входных сигналов и структурная функция переходов d , образующие структурную алгебру переходов $G_d = \langle \{K_S(A), K_S(Z)\}, \{d\} \rangle$. На этом же уровне находится структурная алгебра выходов $G_I = \langle \{K_S(A), K_S(Z), K_S(W)\}, \{l\} \rangle$.

Неоднозначность в последовательности и способах формирования элементов системы изоморфизмов (2) усложняет процесс разработки формальных методов синтеза МПА с ОАП. Пониманию процесса синтеза могут способствовать приемы, заимствованные из системного анализа, например когнитивный анализ, предполагающий представление некоторого процесса в форме так называемых когнитивных карт, описывающих структуру взаимосвязанных явлений исследуемой ситуации [10, 11]. Суть данного подхода сводится к представлению некоторой системы в виде ориентированного графа, вершинами которого являются выделяемые элементы системы, а ребра выражают причинно-следственные связи между ними [12].

Пусть в качестве исходных данных для синтеза МПА с ОАП задано множество $O = \{O_1, \dots, O_{N_I}\}$ операций переходов. В этом случае промежуточные коды состояний $K_I(A)$ и промежуточные коды входных сигналов $K_I(Z)$ формируются на основании множества O и абстрактной алгебры переходов G_δ . Влияние множества O и алгебры G_δ на элементы $K_I(A)$ и $K_I(Z)$ отображено на рис. 2, а. Здесь элементы системы (2) показаны в виде вершин графа, соединенных дугами. Каждая дуга является признаком того, что элемент системы (2) из «исходящей» вершины используется некоторым образом при формировании элемента во «входящей» вершине.

Если множество O не является «жестко» заданным, оно формируется согласно в том числе заданному алгоритму управления, интерпретируемого автоматом. В системе изоморфизмов (2) структура интерпретируемого алгоритма формально представлена абстрактной алгеброй переходов. Ее влияние на формирование множества операций переходов можно показать, добавив дугу от вершины G_δ к вершине O (см. рис. 2, б).

Если для интерпретируемого алгоритма допустимы какие-либо преобразования, их можно графически представить дугами, направленными к вершине G_δ от других вершин графа. Например, ребро от вершины O к вершине G_δ отражает влияние на абстрактную алгебру множества операций переходов (см. рис. 2, в), а одновременное существование ребра от вершины G_δ к вершине O означает, что множество O не является изначально заданным и формируется в процессе синтеза автомата. В общем случае наличие у какой-либо вершины входящего ребра подтверждает возможность модификации элемента, соответствующего данной вершине, в процессе синтеза МПА с ОАП.

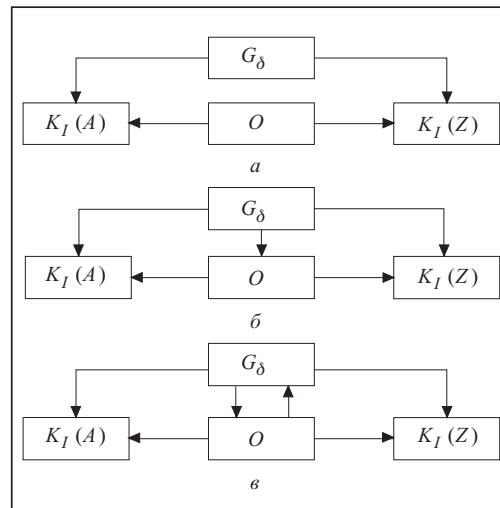


Рис. 2. Примеры графического представления взаимного влияния элементов системы изоморфизмов (2) в процессе синтеза МПА с ОАП

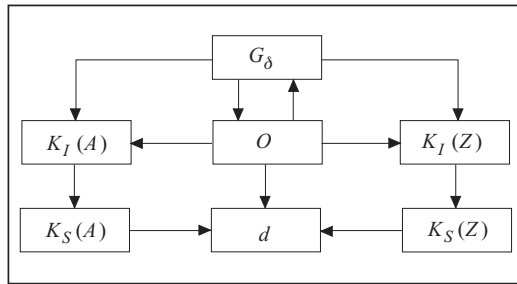


Рис. 3. Пример графического представления взаимного влияния элементов трех алгебраических уровней системы изоморфизмов (2)

Топология графа (см. рис. 2, в) позволяет выделить в нем определенные ранее уровни абстрактных алгебр (вершина G_δ) и промежуточных алгебр (вершины $K_I(A)$, O и $K_I(Z)$). Добавим в граф уровень структурных алгебр, представив его вершинами $K_S(A)$, d и $K_S(Z)$. Добавленные вершины соединим с остальными вершинами графа и между собой так, как показано на рис. 3. Полученный граф позволяет утверждать следующее:

- 1) наличие ребра, входящего в вершину O , означает, что множество операций переходов O не является «жестко» заданным и формируется в процессе синтеза МПА;
- 2) ребра, входящие в соответствующие вершины, означают, что промежуточные и структурные коды состояний и входных сигналов не являются «жестко» заданными и формируются в процессе синтеза МПА;
- 3) ребро, входящее в вершину G_δ , для алгоритма, имплементируемого синтезируемым МПА, означает, что допустимы определенные преобразования;
- 4) недостижимость вершины O из вершин $K_S(A)$ и $K_S(Z)$ означает, что формирование множества операций переходов является первичным по отношению к формированию множеств структурных кодов состояний и входных сигналов;
- 5) если у вершины d не имеется исходящих ребер, то конечным этапом синтеза является формирование структурной функции переходов d .

Граф, приведенный на рис. 3, не отображает конкретный метод синтеза, поскольку не содержит информации об этапах синтеза, их последовательности и реализации. Однако данный граф содержит информацию о следующих элементах системы (2): не формирующихся в процессе синтеза и являющихся исходными данными (соответствующие вершины не имеют входящих дуг), формирующихся в процессе синтеза (соответствующие им вершины имеют хотя бы одну входящую дугу), а также информацию об элементах, оказывающих непосредственное влияние на формирование того или иного элемента системы (2) (определяется дугами графа), оказывающих опосредованное влияние на формирование того или иного элемента системы (2) (определяется достижимостью соответствующей вершины из других вершин) и используемых в заключительном этапе синтеза (соответствующие им вершины не имеют исходящих дуг).

Данную информацию можно использовать при разработке и классификации методов синтеза МПА с ОАП. Вариативность в подходах к формированию множества этапов синтеза, их последовательности и реализации позволяет отождествить с рассматриваемым графом множество методов синтеза.

Заметим, что граф (см. рис. 3) содержит не все элементы системы изоморфизмов (2). Добавим в граф вершины, соответствующие элементам G_λ и G_I , соединив их с остальными вершинами графа следующим образом:

- 1) дуга, направленная от вершины O к вершине G_δ , допускает модификацию абстрактной алгебры переходов G_δ . Поскольку носители A и Z алгебры G_δ являются одновременно носителями абстрактной алгебры выходов G_λ , их изменение в рамках алгебры G_δ влечет соответствующие изменения алгебры G_λ . Данное свойство может отображаться дугой, направленной от вершины G_δ к вершине G_λ ;

- 2) структурная алгебра выходов G_I формируется в соответствии с абстрактной алгеброй выходов G_λ . Также при формировании G_I должны учитываться структурные коды состояний $K_S(A)$, а в случае автомата Мили — и структурные коды входных сигналов $K_S(Z)$. Влияние данных элементов на элемент G_I отображено на графе соответствующими дугами.

Полученный в результате граф показан на рис. 4. Отметим, что в контексте синтеза МПА с ОАП целесообразно рассматривать данный граф как математический объект ввиду неприменения к нему каких-либо методов анализа или преобразования графов. Выделение на графе трех алгебраических уровней позволяет рассматривать его как некоторую структуру, понимая под данным термином совокупность взаиморасположения и устойчивых связей своих составных частей (блоков структуры). Назовем граф, изображенный на рис. 4, структурой процесса синтеза МПА с ОАП с изменяемой абстрактной алгеброй переходов и обозначим ее M_1 .

Множество методов, представленных структурой M_1 , имеют некоторые общие свойства, определяемые данной структурой. В рассматриваемом случае, если не имеется блоков без входящих связей, значит, ни один из элементов системы (2) (в том числе абстрактные алгебры переходов и выходов) не является «жестко» заданным и формируется в процессе синтеза автомата.

Требования к процессу синтеза, определяемые структурой M_1 , не являются единственно возможными. Пусть одно из требований — недопустимость любых изменений абстрактной алгебры переходов при одновременном изменении остальных элементов системы (2). В этом случае структура процесса синтеза будет соответствовать показанной на рис. 5. В данной структуре блок G_δ не имеет входящих связей, что означает невозможность модификации соответствующей алгебры в процессе синтеза. Неизменяемость G_δ влечет неизменность абстрактной алгебры выходов G_λ , выражающуюся в отсутствии связи от блока G_δ к блоку G_λ . В остальном структура процесса синтеза схожа со структурой M_1 . Назовем структуру, изображенную на рис. 5, структурой процесса синтеза МПА с ОАП с фиксированной абстрактной алгеброй переходов и обозначим ее M_2 .

Необходимо, чтобы в процессе синтеза МПА с ОАП выполнялись следующие требования: множество микроопераций O задано и неизменяемо; любые изменения алгоритма, имплементируемого МПА, недопустимы. Тогда структура процесса синтеза примет вид, как на рис. 6. Назовем ее структурой процесса синтеза МПА с ОАП с фиксированной абстрактной алгеброй переходов и заданным множеством операций переходов и обозначим M_3 . Единственным отличием данной структуры от структуры M_2 является отсутствие связи от блока G_δ к блоку O . В результате в составе методов синтеза, относящихся к данной структуре, не будет этапа формирования множества операций переходов. Синтез автомата в данном случае сведется к выбору таких промежуточных и структурных кодов состояний, при которых у результирующей схемы МПА с ОАП

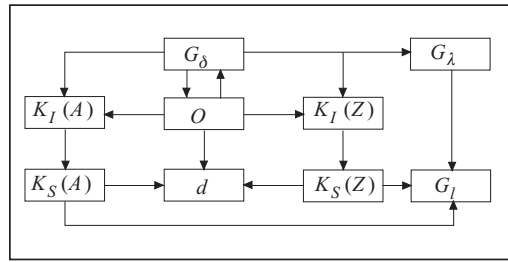


Рис. 4. Структура M_1 процесса синтеза МПА с ОАП с изменяемой абстрактной алгеброй переходов

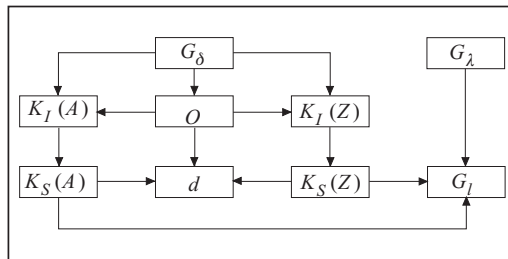


Рис. 5. Структура M_2 процесса синтеза МПА с ОАП с фиксированной абстрактной алгеброй переходов

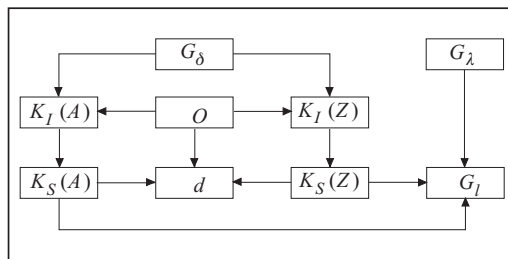


Рис. 6. Структура M_3 процесса синтеза МПА с ОАП с фиксированной абстрактной алгеброй переходов и заданным множеством операций переходов

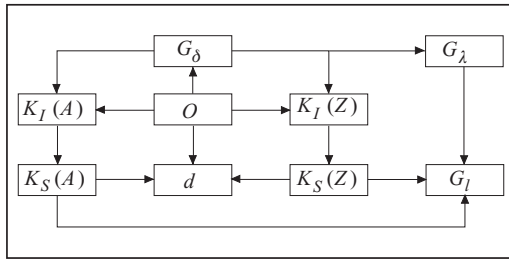


Рис. 7. Структура M_4 процесса синтеза МПА с ОАП с изменяемой абстрактной алгеброй переходов и заданным множеством операций переходов

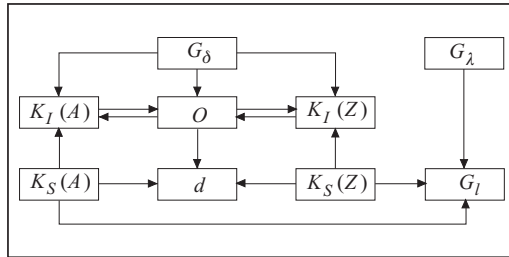


Рис. 8. Структура M_5 процесса синтеза МПА с ОАП с заданными множествами структурных кодов состояний и входных сигналов

будет меньше затрат аппаратуры по сравнению с ее реализацией каноническим способом.

Допустимость модификации алгебры G_δ при фиксированном множестве ОП порождает структуру процесса алгебраического синтеза, в которой по сравнению со структурой M_3 добавлены связи от блока O к блоку G_δ и от блока G_δ к блоку G_λ (по аналогии со структурой M_1 (см. рис. 4)). Обозначим M_4 структуру, изображенную на рис. 7, и назовем ее структурой процесса синтеза МПА с ОАП с изменяемой абстрактной алгеброй переходов и заданным множеством операций переходов.

Отметим, что метод синтеза МПА с ОАП, предложенный в [12], можно сравнить со структурой M_4 , поскольку он предполагает использование фиксированного множества операций переходов и возможность преобразования алгоритма, имплементируемого автоматом.

Пусть в качестве исходных данных для процесса синтеза используются структурные коды состояний и входных сигналов. Подобное требование исключает возможность любых модификаций алгоритма, приводящих к изменению количества состояний и входных сигналов. Структура процесса синтеза, удовлетворяющая данным требованиям, приведена на рис. 8. Обозначим эту структуру M_5 и назовем ее структурой процесса синтеза с заданными множествами структурных кодов состояний и входных сигналов.

Наличие двунаправленных связей между блоками $K_I(A)$ и O , а также блоками O и $K_I(Z)$ означает допустимость взаимного влияния данных элементов в процессе их формирования. Например, возможен итерационный процесс формирования множеств $K_I(A)$ и O , при котором частично сформированное множество O влияет на формирование части множества $K_I(A)$, на основании которого формируется следующая часть множества O и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к представлению процесса синтеза МПА с ОАП в виде структуры предназначен для графического представления разделения элементов системы изоморфизмов (2) по алгебраическим уровням, определения относительной последовательности формирования элементов системы (2) и использования в качестве обобщающей модели для некоторого множества методов синтеза МПА с ОАП.

Способы структурного представления процесса синтеза МПА с ОАП не ограничиваются структурами, приведенными на рис. 4–8. Если какой-либо метод алгебраического синтеза нельзя классифицировать одной из рассмотренных структур, всегда имеется возможность построения новой структуры, отражающей причинно-следственные связи между элементами системы изоморфизмов (2), характерные для данного метода.

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. Баркалов А.А. Синтез устройств управления на программируемых логических устройствах. Донецк: ДонНТУ, 2002. 262 с.
4. DeMicheli G. Synthesis and optimization of digital circuits. New York: McGraw-Hill, 1994. 576 p.
5. Barkalov A., Titarenko L., Kolopienczyk M., Mielcarek K., Bazydlo G. Logic synthesis for FPGA-based finite state machines. Cham: Springer, 2016. 280 p.
6. Barkalov A.A., Babakov R.M. Operational formation of state codes in microprogram automata. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2011. Vol. 47, N 2. P. 193–197.
7. Бабаков Р.М. Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Информационные технологии и компьютерная инженерия*. 2017. Т. 2, № 39. С. 35–41.
8. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Математическая модель микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Сб. научных трудов ДонНТУ. Серия «Информатика, кибернетика и вычислительная техника»*. 2016. Вып. 1 (22). С. 54–57.
9. 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.
10. Каталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. Москва: МГУ, 2011. 312 с.
11. Glykas M. Fuzzy cognitive maps: Advances in theory, methodologies. Tools and applications studies in fuzziness and soft computing. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. Vol. 247. 200 p.
12. Axelrod R. Structure of decision: The cognitive maps of political elites. New Jersey: Princeton University Press, 1976. 400 p.

Надійшла до редакції 02.04.2018

Р.М. Бабаков, О.О. Баркалов

СТРУКТУРНА КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ СИНТЕЗУ МІКРОПРОГРАМНОГО АВТОМАТА З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ

Анотація. Запропоновано використовувати представлення методів синтезу мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів у вигляді структури, блоки якої відповідають елементам математичної моделі автомата. Розроблено п'ять структур, що враховують відмінності у вхідних даних і результатах методів синтезу. Ці й подібні структури можуть бути використані для класифікації теперішніх та розроблюваних у майбутньому методів синтезу цього класу автоматів.

Ключові слова: мікропрограмний автомат, операційний автомат переходів, метод синтезу, математична модель, структура.

R.M. Babakov, A.A. Barkalov

STRUCTURAL CLASSIFICATION OF THE METHODS OF SYNTHESIS OF A MICROPROGRAM FINITE-STATE MACHINE WITH DATAPATH OF TRANSITIONS

Abstract. The authors propose to use the representation of methods of synthesis of a microprogram finite-state machine with datapath of transitions in the form of a structure whose blocks correspond to elements of the mathematical model of the finite state machine. Five structures have been developed that take into account differences in the initial data and the results of the synthesis methods. These and similar structures can be used to classify the available and future methods of synthesis of this class of finite-state machines.

Keywords: microprogram finite-state machine, datapath of transitions, synthesis method, mathematical model, structure.

Бабаков Роман Маркович,

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

Баркалов Александр Александрович,

доктор техн. наук, профессор, Университет Зеленогурский, Польша, e-mail: a.barkalov@imej.uz.zgora.pl.