

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.2

Бабаков Р.М.

Донецкий национальный университет имени Василя Стуса (г. Винница)

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНТЕЗА МИКРОПРОГРАММНЫХ АВТОМАТОВ С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

В статье рассматриваются известные подходы и методы построения микропрограммных автоматов с операционным автоматом переходов. Проводится обзор публикаций по вопросам структурной организации, математической модели, алгебраического синтеза, подходов к оптимизации и оценке эффективности данного класса автоматов. Очерчиваются направления и перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова: микропрограммный автомат, операционный автомат переходов, методология синтеза, структура, оптимизация аппаратных затрат.

Постановка проблемы. Микропрограммный автомат (МПА) как разновидность устройств управления предназначен для координации работы блоков цифровой системы [1, с. 426; 2, с. 114]. Одной из разновидностей МПА является микропрограммный автомат с операционным автоматом переходов (МПА с ОАП), в котором преобразование кодов состояний выполняется не в соответствии с системой канонических уравнений, а с помощью множества арифметико-логических операций. При этом актуальной научной проблемой является минимизация аппаратных затрат в МПА с ОАП, что позволяет снизить стоимость схемы МПА и цифровой системы в целом [3, с. 22].

Анализ последних исследований и публикаций. Микропрограммному автомату с операционным автоматом переходов посвящен ряд публикаций, которые тематически можно разделить на следующие группы:

- принцип операционного преобразования кодов состояний;
- структурная и функциональная организация;
- математическая модель;
- алгебраический синтез;
- методы оптимизации;
- оценка эффективности по критерию аппаратных затрат.

Детальный анализ публикаций выполнен ниже в основной части работы.

Постановка задачи. К настоящему времени множество научных работ, посвященных данному классу МПА, является несистематизированным, что затрудняет понимание концепции операционного преобразования кодов состояний и выбор дальнейших направлений исследований. С этой точки зрения актуальным является выполняемый в данной работе обзор методологических аспектов синтеза МПА с ОАП на основе анализа научных результатов, полученных в известных публикациях по данному вопросу.

Изложение основного материала исследования. В МПА с канонической структурой функция переходов реализуется в форме системы канонических булевых уравнений, по которой проводится синтез схемы формирования переходов (СФП) автомата [1; 2]. Предложенный в работах [3, с. 22; 4, с. 36] принцип операционного преобразования кодов состояний автомата предлагает альтернативный способ реализации функции переходов, заключающийся в следующем. Коды состояний автомата, представляемые двоичными векторами, рассматриваются одновременно как скалярные величины, что позволяет выполнять над ними произвольные арифметико-логические операции. При этом результат выполнения операции над кодом текущего состояния автомата рассматривается как код состояния перехода. Операции, используемые для преобразований кодов состояний, названы в [3, с. 23] операциями

переходов (ОП). В общем случае одна ОП может использоваться для реализации множества переходов МПА [3, с. 23].

Каждая ОП синтезируется в виде отдельного функционального узла. При этом затраты аппаратуры на реализацию схемы узла не зависят (или зависят незначительно) от количества автоматных переходов, реализуемых с помощью данной ОП. В работе [5, с. 150] функциональные узлы всех ОП, используемых для реализации переходов заданного МПА, предлагается объединять в единый структурный блок, называемый операционной частью (ОЧ). Для выбора результата одной из ОП используется мультиплексор, также являющийся частью ОЧ [5, с. 154; 6, с. 26; 7, с. 34]. Выход мультиплексора поступает в регистр памяти (РП) автомата, хранящий код текущего состояния автомата. Выход РП поступает в блок ОЧ в качестве обратной связи [6, с. 26; 7, с. 34]. В работе [5, с. 150] совокупность блоков ОЧ и РП предлагается называть операционным автоматом переходов (ОАП). Анализ структуры ОАП в отношении возможности совместной реализации функциональных узлов проведен в работах [5, с. 153; 7, с. 35].

Использование ОАП в составе МПА порождает новую структуру микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов (МПА с ОАП) [7, с. 35]. Помимо ОАП и схемы формирования микроопераций (СФМО), в данной структуре присутствует дополнительная Z-подсхема, формирующая коды операций переходов для управления мультиплексором в блоке ОЧ. В работе [8, с. 81] показано, что в МПА с ОАП часть микропрограммных переходов может быть реализована каноническим способом по системе булевых уравнений. Это оказывается удобным в том случае, если аппаратные затраты на реализацию данных переходов операционным способом превышают затраты на их реализацию по системе булевых уравнений. Существует возможность реализации всех переходов из некоторого состояния с помощью одной операции переходов [9, с. 14].

В работах [10, 11] выполнена алгебраическая формализация структурной модели МПА с ОАП, в соответствии с которой функция переходов автомата представляется состоящей из множества так называемых частичных функций переходов [10, с. 22; 11, с. 66]. Каждая частичная функция переходов реализует собственное подмножество переходов автомата и вместе с подмножеством состояний образует подалгебру переходов. Совокупность всех подалгебр переходов образуют

алгебру переходов МПА, носителями которой являются состояния и входные сигналы, сигнатурой – функция переходов [10, с. 25; 11, с. 67]. При этом различают абстрактную и структурную алгебры переходов, интерпретирующие абстрактный и структурный автоматы соответственно. Тождественность абстрактного и структурного автоматов в части функции переходов выражается изоморфизмом соответствующих алгебр переходов [11, с. 69].

В работе [11, с. 71] на примере известной структуры автомата на счетчике вводится понятие промежуточной алгебры переходов. Ее сигнатурой является арифметико-логическая операция, носителем – подмножество кодов состояний и входных сигналов в формате аргументов операции сигнатуры. В МПА с ОАП каждая операция переходов и подмножество реализуемых с ее помощью микропрограммных переходов формально представляются промежуточной алгеброй переходов. В работе [12, с. 102] дан ряд обобщений для автомата на счетчике, приводящих к МПА с операционным автоматом переходов.

Возможность использования некоторой операции переходов для преобразования кодов состояний автомата может быть выражена попарным изоморфизмом трех алгебр: абстрактной подалгебры переходов, структурной подалгебры переходов и промежуточной алгебры переходов [13, с. 55]. Математическая модель МПА с ОАП представляется системой подобных изоморфизмов для всех используемых операций переходов [13, с. 56]. Таким образом, синтез МПА с ОАП с алгебраической точки зрения сводится к построению системы изоморфизмов подалгебр переходов и соответствующих промежуточных алгебр переходов.

В работе [14, с. 37] синтез МПА с ОАП предлагается разделять на два этапа: алгебраический синтез автомата и синтез его логической схемы. Под алгебраическим синтезом автомата понимается формирование системы изоморфизмов алгебр в соответствии с математической моделью. Построенную систему изоморфизмов следует считать формальным решением задачи алгебраического синтеза [15, с. 105]. В общем случае для заданного автомата возможно получение множества формальных решений, различающихся используемыми операциями переходов, выбранными кодами состояний, способом разбиения функции переходов на частичные функции и так далее. Подмножество тех формальных решений, при которых аппаратные затраты в логической

схеме МПА с ОАП оказываются меньше, чем в альтернативных структурах МПА, называют множеством эффективных решений задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП. Этап синтеза логической схемы МПА с ОАП состоит в последовательном синтезе отдельных структурных блоков автомата [16, с. 97]. В работе [17, с. 58] рассмотрена возможность реализации функции выходов автомата с использованием операционного подхода.

Наиболее сложно формализуемым является этап алгебраического синтеза автомата. В работе [18, с. 49] отмечена возможность синтеза алгебраических составляющих в различном порядке, что потенциально допускает разработку множества методов алгебраического синтеза МПА с ОАП. Одним из таких методов является полный перебор сопоставления операций переходов кодам состояний [19, с. 71], однако время выполнения полного перебора оказывается неприемлемо большим даже в случае автоматов малой сложности. Более целесообразным является разработка отдельных подходов, которые могут быть использованы в качестве составляющих метода алгебраического синтеза. Такими подходами являются, например, введение дополнительных состояний с целью упрощения реализации переходов операционным способом [20, с. 59] или учет частоты состояний при выборе операций переходов [21, с. 4]. Один из возможных методов алгебраического синтеза МПА с ОАП, учитывающий ряд подобных подходов, предложен в [14, с. 39].

В структуре МПА с ОАП допустимо использование некоторых известных методов оптимизации аппаратных затрат, применяемых к микропрограммным автоматам: замена входных переменных [22 с. 20; 23, с. 36] и уменьшение максимального количества существенных входных переменных

[24, с. 43]. Использование данных методов в структуре МПА с ОАП позволяет в ряде случаев добиться дополнительного снижения аппаратных затрат в логической схеме автомата.

Эффективность микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов по критерию аппаратных затрат, исследованная в работах, может быть определена в сравнении с другими известными структурами МПА (например, с каноническим автоматом [2, с. 89]). В работе [25, с. 114] на основании результатов экспериментальных исследований получены аналитические выражения для численного определения аппаратных затрат в структуре МПА с ОАП. В основу экспериментов положено VHDL-моделирование в базе ПЛИС типа FPGA. Исследование эффективности структур МПА с ОАП показало возможность получения в среднем 30% выигрыша в аппаратных затратах по сравнению с каноническим МПА [26, с. 36].

Выводы. Результаты исследования эффективности МПА с ОАП позволяют говорить о достаточной эффективности данного класса МПА и перспективах его практического применения. Анализ рассмотренных публикаций позволяет сформулировать следующие направления исследований в рамках методологии синтеза микропрограммных автоматов с операционным автоматом переходов:

- разработка формализованных методов, позволяющих получить эффективные решения задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП;
- использование в МПА с ОАП известных методов оптимизации логических схем цифровых устройств;
- применение принципа операционного преобразования кодов состояний в других классах устройств управления.

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., Бабаков Р.М. Операционное формирование кодов состояний в микропрограммных автоматах. *Кибернетика и системный анализ*. 2011. № 2. С. 21–26.
4. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Организация устройств управления с операционной адресацией. *Управляющие системы и машины*. 2008. № 6. С. 34–39.
5. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Организация операционной части в управляющем автомате с операционным автоматом переходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ». 2011. № 21 (183). С. 149–156.
6. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Реализация функции переходов микропрограммного автомата на базе операционного автомата. *Управляющие системы и машины*. 2015. № 5. С. 22–29.
7. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Операционный автомат переходов. *Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Красноармійськ : ДВНЗ «ДонНТУ». 2015. № 1 (28). С. 33–40.

8. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Операционный автомат переходов с дополненным множеством операций переходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка»*. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». 2011. № 14 (188). С. 80–84.
9. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Формирование кодов операций переходов в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ». 2015. Випуск 1 (20). С. 11–16.
10. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Алгебраическая интерпретация микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. № 2. С. 22–29.
11. Бабаков Р.М. Промежуточная алгебра переходов в микропрограммном автомате. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2016. № 1. С. 64–73.
12. Бабаков Р.М. Обобщение математической модели микропрограммного автомата на счетчике. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2018. № 1. С. 100–109.
13. Бабаков Р.М. Математическая модель микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ». 2016. № 1 (22). С. 54–57.
14. Бабаков Р.М. Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Информационные технологии и компьютерная инженерия*. 2017. № 39. Т. 2. С. 35–41.
15. Бабаков Р.М. Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 2. С. 103–107.
16. Бабаков Р.М. Синтез логической схемы микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 4. С. 96–99.
17. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Операционная реализация функции выходов микропрограммного автомата. *Управляющие системы и машины*. 2017. № 3. С. 57–62.
18. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Структурное представление процесса синтеза управляющих автоматов с операционным автоматом переходов. *Управляющие системы и машины*. 2011. № 3. С. 47–53.
19. Бабаков Р.М. Синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов методом полного перебора. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 1. С. 70–74.
20. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Использование транзитных состояний в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ». 2016. № 1 (29). С. 56–64.
21. Бабаков Р.М. Урахування імовірності станів у мікропрограмному автоматі з операційним автоматом переходів. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2017. № 2. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/505/500>
22. Babakov R.M. Using of method of replacement of input variables in microprogram finite-state machine with datapath of transitions. *Технологический аудит и резервы производства*. 2017. № 4/2 (36). С. 18–23.
23. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Модификация микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов и заменой входных переменных. *Управляющие системы и машины*. 2017. № 6. С. 35–40.
24. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Уменьшение максимального количества существенных входных переменных в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Управляющие системы и машины*. 2018. № 2. С. 42–50.
25. Бабаков Р.М. Исследование аппаратных затрат в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2017. № 4. С. 106–115.
26. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Определение области эффективного применения микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Кибернетика и системный анализ*. 2018. № 3. С. 27–37.

МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СИНТЕЗУ МІКРОПРОГРАМНИХ АВТОМАТІВ З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ

У статті розглядаються відомі підходи та методи побудови мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів. Проводиться огляд публікацій з питань структурної організації, математичної моделі, алгебраїчного синтезу, підходів до оптимізації та оцінки ефективності даного класу автоматів. Окреслюються напрями та перспективи подальших досліджень.

Ключові слова: мікропрограмний автомат, операційний автомат переходів, методологія синтезу, структура, оптимізація апаратних витрат.

**METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE SYNTHESIS OF THE MICROPROGRAMMABLE
FINITE-STATE MACHINES WITH DATAPATH OF TRANSITIONS**

The article discusses the well-known approaches and methods for constructing microprogram finite state machine with datapath of transitions. A review of publications on structural organization, mathematical model, algebraic synthesis, approaches to optimization and evaluation of the effectiveness of this class of finite state machines is carried out. The directions and prospects for further research are considered.

Key words: *microprogram finite-state machine, datapath of transitions, synthesis methodology, structure, hardware expenses optimization.*