

**Бабаков Р.М.**

Донецкий национальный университет имени Василия Стуса (г. Винница)

## СИНТЕЗ ЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ МИКРОПРОГРАММНОГО АВТОМАТА С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

*В статье рассматриваются основные этапы синтеза логической схемы микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. Исходными данными для синтеза схемы выступает формальное решение задачи алгебраического синтеза автомата. В общем случае формальное решение определяет множества состояний и их кодов, множества операций переходов и их кодов, а также множество переходов, реализуемых каноническим способом. На примере автомата Мура рассмотрены последовательность и суть отдельных этапов синтеза его логической схемы.*

**Ключевые слова:** микропрограммный автомат, операционный автомат переходов, алгебраический синтез, логическая схема, граф-схема алгоритма.

**Постановка проблемы.** Микропрограммный автомат (МПА) является одним из типов устройства управления, функцией которого является координация совместной работы всех блоков вычислительной системы [1, с. 426; 2, с. 114]. По сравнению с другими типами устройств управления схема МПА характеризуется максимально возможным быстродействием и аппаратурными затратами [2, с. 168]. Рост сложности вычислительных систем делает актуальной задачу снижения их стоимости, что возможно, в числе прочего, за счет оптимизации аппаратурных затрат в логической схеме МПА [2, с. 178].

Одним из путей снижения аппаратурных затрат в логической схеме микропрограммного автомата является разработка новых структур МПА и методов их синтеза. Одной из таких структур является микропрограммный автомат с операционным автоматом переходов (МПА с ОАП), в котором функция переходов представляется в виде множества частичных функций [3, с. 23; 4, с. 22]. Преимуществом данной структуры является снижение аппаратурных затрат в схеме формирования автоматных переходов по сравнению с канонической реализацией МПА [5, с. 205].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализом синтеза логической схемы микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов занимались такие ученые, как В.М. Глушков, С.И. Баранов, А.А. Баркалов, И.В. Ярош и другие. Но особого внимания в данной области заслуживают работы ученого Р.М. Бабакова «Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» и «Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного

автомата с операционным автоматом переходов ученого», на которые мы и будем ссылаться в нашей статье.

**Постановка задачи.** В работе Р.М. Бабакова «Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» [6, с. 37] выполнена постановка задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП, формальным решением которой является система изоморфизмов алгебр переходов и выходов. В работе того же автора «Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» [7, с. 103] приведен пример формального решения задачи алгебраического синтеза для МПА, заданного граф-схемой алгоритма (ГСА, [2, с. 116]). В общем случае в результате алгебраического синтеза можно считать известными следующие характеристики МПА с ОАП:

- множество состояний  $A = \{a_1, \dots, a_M\}$ , где  $M$  – число состояний;
- множество структурных (двоичных) кодов состояний  $K_S(a_i)$ ,  $a_i \in A$ ;
- множество операций переходов  $O = \{O_1, \dots, O_{N_i}\}$ , где  $N_i$  – количество промежуточных алгебр переходов;
- множество переходов автомата, реализуемых каноническим способом (по системе булевых уравнений) [2, с. 129; 7, с. 104].

Согласно исследования Р.М. Бабакова, структурный синтез МПА с ОАП включает два этапа: алгебраический синтез и синтез логической схемы автомата. Первому этапу посвящены две первые работы «Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» и «Формальное решение задачи

Операционная таблица переходов

$a_m$	$Ks(a_m)$	$a_s$	$Ks(a_s)$	$X_h$	$O_h$	$z_h$	$h$
$a_0$	110	$a_1$	000	1	–	$z_1$	1
$a_1$	000	$a_2$	101	$\bar{x}_1$	$O_1$	–	2
		$a_3$	100	$X_h$	$O_2$	$z_2$	3
$a_2$	101	$a_5$	010	1	$O_1$	–	4
$a_3$	100	$a_4$	001	1	$O_1$	–	5
$a_4$	001	$a_2$	101	$X_1$	$O_2$	$z_2$	6
		$a_0$	110	$\bar{x}_1$	$O_1$	–	7
$a_5$	010	$a_6$	111	1	$O_1$	–	8
$a_6$	111	$a_7$	011	1	$O_2$	$z_2$	9
$a_7$	011	$a_2$	000	1	$O_1$	–	10

алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов ученого», а второй этап к настоящему моменту остается неисследованным [6; 7]. Данная работа посвящена вопросу синтеза логической схемы МПА с ОАП на основе результатов алгебраического синтеза.

**Изложение основного материала исследования.** Согласно исследованиям А.А. Баркалова и Р.М. Бабакова [3, с. 24], структура МПА с ОАП включает следующие блоки:

- операционная часть;
- схема формирования кодов операций переходов (Z-подсхема);
- регистр памяти;
- схема формирования микроопераций.

Рассмотрим синтез данных блоков на примере решения задачи алгебраического синтеза, полученного в работе Р.М. Бабакова «Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов» [7, с. 105].

*Операционная часть.*

В общем случае данный блок содержит все комбинационные схемы используемых операций переходов, а также комбинационную схему, реализующую часть переходов каноническим способом. Каждая КС формирует частичную структурную функцию переходов  $d_i$ , значение которой поступает в мультиплексор результата. Для построения мультиплексора результата все функции  $d_i$  необходимо закодировать двоичным кодом  $K(d_i)$  разрядности  $R_z = \lceil \log_2 N_d \rceil$ .

Например, комбинационная схема операции  $O_1$ , формирующая функцию  $d_1$ , представляет собой трехразрядный сумматор, на одно плечо

которого подается код текущего состояния  $T$ , на второе – двоичная константа 101, соответствующая значению 5 в промежуточной алгебре  $G_{I_1}$ .

Комбинационная схема операции  $O_2$ , формирующая функцию  $d_2$ , состоит из трехразрядного элемента «исключающее ИЛИ», выполняющего поразрядно данную операцию между кодом текущего состояния  $T$  и двоичной константой 100.

Для синтеза комбинационной схемы, реализующей подмножество автоматных переходов каноническим способом, необходимо придерживаться канонического подхода, включающего следующие этапы [2, с. 181]:

- составление структурной таблицы переходов;
- формирование и минимизация системы булевых функций переходов;
- синтез комбинационной схемы, выход которой соответствует частичной структурной функции переходов  $d_3$ .

Подчеркнем, что данные действия выполняются лишь для того подмножества переходов, которые, согласно результатам алгебраического синтеза, решено реализовывать каноническим способом.

В рассматриваемом примере каноническим способом реализуется единственный переход  $a_0 \rightarrow a_1$ . Поскольку такой переход один, комбинационная схема функции  $d_3$  является формирователем константы, равной структурному коду состояния перехода  $K_s(a_1) = 000$ .

Закодируем функции  $d_1-d_3$  двухразрядным двоичным кодом  $\langle z_1 z_2 \rangle$ . Пусть  $K(d_1) = 00$ ,  $K(d_2) = 01$ ,  $K(d_3) = 10$ . Данные коды являются кодами операций переходов и влияют на организацию мультиплексора результата.

На рис. 1 показана функциональная схема операционной части для рассматриваемого примера.

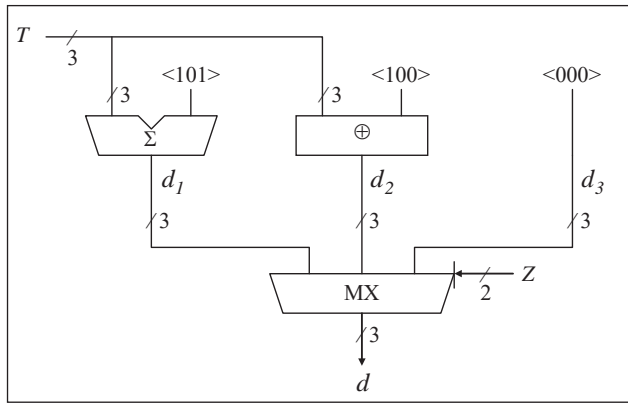


Рис. 1. Функціональна схема операційної частини

Схема формирования кодов операций переходов (Z-подсхема).

Данный блок может быть реализован либо в базе логических элементов, либо в базе запоминающих устройств (ЗУ) – ПЗУ, ППЗУ, блочная память ПЛИС типа FPGA. Независимо от элементного базиса, синтез Z-подсхемы проводится по операционной таблице переходов (табл. 1).

Таблица в целом подобна классической таблице переходов [2, с. 182] и содержит следующие столбцы:

- $a_m$  – код текущего состояния автомата;
- $K_s(a_m)$  – структурный (двоичный) код текущего состояния;
- $a_s$  – код состояния перехода;
- $K_s(a_s)$  – структурный (двоичный) код состояния перехода;
- $X_h$  – условие перехода;
- $O_h$  – операция перехода (прочерк означает реализацию перехода каноническим способом);
- $z_h$  – код операции перехода, формируемый Z-подсхемой (прочерк означает нулевые значения переменных  $z_1$  и  $z_2$ , присутствие переменной – ее единичное значение);
- $h$  – номер перехода.

Представляя код  $T$  текущего состояния двоичными переменными  $T_1-T_3$ , можно записать следующие уравнения для функций  $z_1$  и  $z_2$  (в виде ДНФ):

$$z_1 = T_1 T_2 \bar{T}_3;$$

$$z_2 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{x}_1 \vee \bar{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \bar{x}_1 \vee T_1 T_2 T_3.$$

Комбинационная схема, реализующая приведенные уравнения, строится тривиально в любом элементном базисе.

Реализация Z-подсхемы в базе ЗУ целесообразна обычно при небольшом количестве структурных входных сигналов. В рассматриваемом примере единственным входным структурным сигналом является  $x_1$ , что, вместе с переменными  $T_1-T_3$ , определяет для ЗУ Z-подсхемы 16 адресов памяти. Таблица ЗУ Z-подсхемы представлена табл. 2.

Таблица 2

Содержимое ЗУ Z-подсхемы

$T_1 T_2 T_3 x_1$	$z_1 z_2$	$T_1 T_2 T_3 x_1$	$z_1 z_2$
0 0 0 0	0 1	1 0 0 0	0 0
0 0 0 1	0 0	1 0 0 1	0 0
0 0 1 0	0 0	1 0 1 0	0 0
0 0 1 1	0 1	1 0 1 1	0 0
0 1 0 0	0 0	1 1 0 0	1 0
0 1 0 1	0 0	1 1 0 1	1 0
0 1 1 0	0 0	1 1 1 0	0 1
0 1 1 1	0 0	1 1 1 1	0 1

*Регистр памяти.*

В качестве регистра памяти может быть выбран стандартный регистр требуемой разрядности, организованный на базе триггеров D-типа. В этом случае отдельный синтез регистра памяти не требуется.

*Схема формирования микроопераций.*

Рассматриваемая структура МПА с ОАП допускает различные способы реализации схемы формирования микроопераций. Обычно целесообразной является каноническая реализация схемы СФМО по системе булевых уравнений [2, с. 90].

**Выводы.** После того, как в результате алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов сформированы все элементы системы изоморфизмов алгебр автомата [6, с. 36], синтез его логической схемы сводится к последовательному синтезу отдельных структурных блоков. При этом нельзя исключать возможности дополнительной оптимизации отдельных блоков с учетом используемого элементного базиса и различных схемотехнических решений, не влияющих на результаты алгебраического синтеза. Например, к операционной части могут применяться известные методы синтеза операционных автоматов, допускающие различные варианты его архитектурной реализации [8, с. 36]. Решение этих вопросов не является очевидным и требует проведения отдельных исследований.

**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. Алгебраическая интерпретация микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. Кибернетика и системный анализ. 2016. № 2. С. 22–29.
5. Babakov R, Barkalov A., Titarenko L. Research of Efficiency of Microprogram Final-State Machine with Datapath of Transitions. Proceedings of 14th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). February 21–25, 2017. Polyana, Ukraine. P. 203–206.
6. Бабаков Р.М. Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. Информационные технологии и компьютерная инженерия. 2017. № 39, Т. 2. С. 35–41.
7. Бабаков Р.М. Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. 2018. № 2, Том 29 (68). С. 103–107.
8. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Операционный автомат переходов. Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. Серия «Вычислительная техника и автоматизация». 2015. № 1 (28). С. 33–40.

### СИНТЕЗ ЛОГІЧНОЇ СХЕМИ МІКРОПРОГРАМНОГО АВТОМАТА З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ

*У статті розглядаються основні етапи синтезу логічної схеми мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів. Вхідними даними для синтезу схеми виступає формальний розв'язок задачі алгебраїчного синтезу автомата. У загальному випадку формальний розв'язок визначає множини станів та їх кодів, множини операцій переходів та їх кодів, а також множини переходів, реалізованих у канонічний спосіб. На прикладі автомата Мура розглянуті послідовність і суть окремих етапів синтезу його логічної схеми.*

**Ключові слова:** мікропрограмний автомат, операційний автомат переходів, алгебраїчний синтез, логічна схема, граф-схема алгоритму.

### SYNTHESIS OF THE LOGICAL CIRCUIT OF THE MICROPROGRAMMABLE FINITE-STATE MACHINE WITH DATAPATH OF TRANSITIONS

*In the article the main stages of synthesizing of the logical circuit of a microprogrammable finite-state machine with datapath of transitions are considered. The initial data for the circuit synthesis is a formal solution of the problem of algebraic synthesis of the finite-state machine. In the general case, the formal solution determines the sets of states and their codes, the sets of transition operations and their codes, and also the set of transitions realized by the canonical method. On the example of Moore's finite-state machine, the sequence and essence of individual stages of the synthesis of its logic circuit are considered.*

**Key words:** microprogram finite-state machine, datapath of transitions, algebraic synthesis, logic circuit, flow-chart.