

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ВАСЫЛЯ СТУСА

*Р. М. Бабаков*

**ОПЕРАЦИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ  
КОДОВ СОСТОЯНИЙ  
В МИКРОПРОГРАММНОМ АВТОМАТЕ**

Монография

Винница 2019

друкарня-видавництво

 **ТВОРИ**  
творимо разом

ISBN 978-966-949-186-2



9 789669 491862

[www.tvoru.com.ua](http://www.tvoru.com.ua)

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ВАСЫЛЯ СУСА**

*Р. М. Бабаков*

**ОПЕРАЦИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ  
КОДОВ СОСТОЯНИЙ  
В МИКРОПРОГРАММНОМ АВТОМАТЕ**

**Монография**

**Винница  
ДонНУ  
2019**

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
<b>РАЗДЕЛ 1. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ АВТОМАТОВ.....</b>	<b>9</b>
1.1. Канонический синтез цифровых автоматов .....	9
1.2. Анализ методов организации операционных автоматов.....	14
1.3. Методы схемной имплементации алгоритмов.....	22
1.4. Направление и задачи исследований.....	30
<b>РАЗДЕЛ 2. ОПЕРАЦИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОДОВ СОСТОЯНИЙ В МИКРОПРОГРАММНОМ АВТОМАТЕ.....</b>	<b>37</b>
2.1. Алгебраическая интерпретация автоматов .....	37
2.2. Алгебраическая интерпретация автомата на счетчике.....	51
2.3. Промежуточные алгебры переходов .....	60
2.4. Принцип операционного преобразования кодов состояний.....	90
<b>РАЗДЕЛ 3. ОРГАНИЗАЦИЯ МИКРОПРОГРАММНОГО АВТОМАТА С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ.....</b>	<b>92</b>
3.1. Структурная и математическая модели микропрограммного автомата с операционным преобразованием кодов состояний .....	92
3.2. Структурная организация операционного автомата переходов.....	99
3.3. Формирование кодов операций переходов .....	102
3.3.1. Базовая организация Z-подсхемы .....	102
3.3.2. Сопоставление операций переходов состояниям автомата .....	107
3.3.3. Замена входных переменных .....	112
3.3.4. Уменьшение максимального количества существенных входных переменных .....	123
3.4. Реализация функции выходов в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов.....	133
3.4.1. Операционная реализация функции выходов .....	133
3.4.2. Каноническая реализация функции выходов в автомате Мили .....	140
3.4.3. Каноническая реализация функции выходов в автомате Мура.....	142

УДК 004.2  
Б 12

Рекомендовано к печати Ученым советом  
Донецкого национального университета имени Василя Стуса  
(протокол № 10 от 26.04.2019 г.)

**Автор:** Р. М. Бабаков, доцент кафедры прикладной математики и теории систем управления.

**Рецензенты:** В. С. Харченко, заслуженный изобретатель Украины, доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем, сетей и кибербезопасности Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт».

С. А. Нестеренко, доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных интеллектуальных систем и сетей Одесского национального политехнического университета.

**Бабаков Р. М.**

**Б 12** Операционное преобразование кодов состояний в микропрограммном автомате: монография. Винница: ООО «ТВОРИ», 2019. 208 с.

ISBN 978-966-949-186-2

Микропрограммный автомат в составе цифровой вычислительной системы обладает максимальным быстродействием в сравнении с другими типами устройств управления. Однако высокие аппаратные затраты на реализацию схемы автомата увеличивают стоимость системы, ограничивая область его применения. В монографии предлагается оригинальный структурный подход к организации микропрограммного автомата, при котором роль схемы формирования микропрограммных переходов выполняет операционный автомат.

УДК 004.2

© Бабаков Р. М., 2019  
© ДонНУ имени Василя Стуса, 2019  
© ООО «ТВОРИ», 2019

ISBN 978-966-949-186-2

#### РАЗДЕЛ 4. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ МИКРОПРОГРАММНОГО АВТОМАТА С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

4.1. Основные этапы структурного синтеза.....	143
4.2. Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов.....	145
4.2.1. Постановка задачи алгебраического синтеза.....	145
4.2.2. Методология алгебраического синтеза.....	148
4.2.3. Структурное представление процесса алгебраического синтеза.....	150
4.2.4. Алгебраический синтез методом полного перебора.....	160
4.2.5. Использование транзитных состояний.....	162
4.2.6. Учет вероятностей истинности логических условий.....	168
4.2.7. Увеличение разрядности структурных кодов состояний.....	171
4.2.8. Метод алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов.....	174

**ВЫВОДЫ**..... 183

**ЛИТЕРАТУРА**..... 186

#### ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЖЛ	Автомат с «жесткой» логикой
АЛУ	Арифметико-логическое устройство
АПЛ	Автомат с программируемой логикой
АЧ	Адресная часть
БФ	Булева функция
ГСА	Граф-схема алгоритма
ДНФ	Дизъюнктивная нормальная форма
ЗУ	Запоминающее устройство
КЛБ	Комбинационный логический блок
КЛС	Комбинационная логическая схема
КС	Комбинационная схема
ЛУ	Логическое условие
МК	Микрокоманда
МО	Микрооперация
МП	Микропрограмма
МПА	Микропрограммный автомат
МУУ	Микропрограммное устройство управления
ОА	Операционный автомат
ОАП	Операционный автомат переходов
ОП	Операция переходов
ОТП	Операционная таблица переходов
ОУ	Операционное устройство
ОЧ	Операционная часть
ПЛИС	Программируемая логическая интегральная схема
ПЛМ	Программируемая логическая матрица
ПСТ	Прямая структурная таблица
РАМК	Регистр адреса микрокоманды
РП	Регистр памяти
САПР	Система автоматизированного проектирования
СТ	Счетчик
СФМО	Схема формирования микроопераций
СФП	Схема формирования переходов
УА	Управляющий автомат
УП	Управляющая память
УУ	Устройство управления

## ВВЕДЕНИЕ

Микропрограммные автоматы (МПА, автоматы с «жесткой» логикой) как разновидность устройств управления (УУ) предназначены для координации работы блоков цифровых вычислительных систем. При этом характеристики логической схемы МПА во многом определяют характеристики системы в целом. МПА обладает максимальным быстродействием среди известных классов УУ за счет реализации многонаправленных микропрограммных переходов за один такт работы устройства. Наблюдаемый сегодня рост сложности алгоритмов обработки информации способствует повышению требований к быстродействию цифровой системы, что делает использование МПА более перспективным по сравнению с другими классами УУ. Однако наряду с высокими параметрами быстродействия МПА также характеризуется максимальными затратами аппаратуры на реализацию логической схемы устройства.

Современным элементом базисом для реализации логической схемы МПА являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). К ним относятся микросхемы типа FPGA, CPLD, SoPC и другие. Высокая плотность логических вентилей на кристалле ПЛИС позволяет реализовать на базе одного чипа устройство управления, операционное устройство, цифровые аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, фильтры и другие части сложной цифровой системы. Как и для предыдущих базисов реализации цифровых систем, в случае ПЛИС возникает проблема оптимизации характеристик отдельных блоков. Решение этой проблемы позволяет увеличить функциональные возможности системы в рамках одной микросхемы ПЛИС. При этом многие исследователи отмечают, что эффективность методов синтеза, включенных в промышленные пакеты автоматизированного проектирования, является крайне неудовлетворительной. Таким образом, проблема разработки эффективных методов синтеза цифровых систем в целом и МПА в частности является актуальной.

В рамках данной монографии рассматривается проблема оптимизации аппаратных затрат в логической схеме микропрограммного автомата. В настоящее время известно множество подходов к решению данной проблемы, представленных в работах В. М. Глушкова, С. И. Баранова, В. А. Склирова, А. А. Баркалова, А. В. Палагина, Е. А. Дроздова, П. Н. Бибило, В. В. Соловьева, Т. Лубы, Д. Де Мишели и других отечественных и зарубежных ученых. Одним из путей решения является адаптация структуры МПА к характеристикам интерпретируемого алгоритма управления. В настоящей книге алгоритмы управления представляются граф-схемами алгоритма (ГСА) по причине

наглядности последних, позволяющей объяснить методы синтеза и оптимизации схем МПА.

Микропрограммный автомат реализует две функции: функцию переходов и функцию выходов. В структуре канонического МПА данные функции имплементируются, соответственно, схемой формирования переходов (СФП) и схемой формирования микроопераций (СФМО). Данные схемы синтезируются по системам канонических булевых уравнений, обычно представляемых в дизъюнктивной нормальной форме. Увеличение количества состояний и микропрограммных переходов приводит к увеличению количества аргументов и термов в системе уравнений функции переходов и к росту аппаратурных затрат в СФП и в схеме МПА в целом. При этом сложность схемы СФМО зависит от количества и содержимого операторных вершин ГСА и не зависит от количества переходов.

Среди множества известных структур МПА выделяются автоматы, в которых вместо регистра памяти используется счетчик (так называемые автоматы на счетчике или С-автоматы). При их использовании в имплементируемой ГСА выделяются последовательности состояний, кодируемых в естественном (инкрементном) порядке (так называемые линейные последовательности состояний, ЛПС). В пределах одной ЛПС все переходы выполняются с помощью увеличения содержимого счетчика и не отражаются в системе булевых уравнений функции переходов. Поскольку аппаратурные затраты в схеме счетчика не зависят от количества реализуемых им микропрограммных переходов, в С-автомате достигается выигрыш по аппаратурным затратам в сравнении со схемой канонического МПА. Метод синтеза автомата на счетчике предполагает специальное кодирование состояний с формированием множества ЛПС.

В настоящей работе для автомата на счетчике вводится ряд обобщений:

- преобразование кодов состояний может выполняться не только с помощью операции инкремента, но и с помощью любой другой операции;
- в рамках одной ГСА для разных переходов могут использоваться различные операции;
- в качестве аргументов операций могут выступать код текущего состояния и входные сигналы автомата.

Данные обобщения позволили получить новые структуры МПА, в основе которых лежит преобразование кодов состояний с помощью множества операций. Как и в С-автомате, выигрыш по аппаратурным затратам в данных структурах достигается за счет использования операций, сложность схемной

реализации которых не зависит от количества реализуемых ими микропрограммных переходов.

Целью исследований, представленных в монографии, является оптимизация аппаратных затрат в логической схеме МПА за счет разработки новых структур МПА, основанных на операционном преобразовании кодов состояний. В монографии рассматриваются следующие проблемы:

1. Анализ принципов построения цифровых автоматов (раздел 1).
2. Выбор математического аппарата для представления информации о новых процессах при операционном преобразовании кодов состояний (раздел 2).
3. Разработка новых структур и математических моделей МПА, базирующихся на операционном принципе реализации микропрограммных переходов (раздел 3).
4. Формирование методики синтеза разработанных структур МПА, а также поиск подходов к дальнейшей оптимизации разработанных структур (раздел 4).

Автор будет благодарен за отзывы на монографию, а также за предложения по развитию дальнейших исследований.

## РАЗДЕЛ 1 СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ АВТОМАТОВ

### 1.1. Канонический синтез цифровых автоматов

В теории вычислительной техники одним из основных понятий является цифровой автомат, под которым понимается преобразователь дискретной информации [84]. Цифровые автоматы принято разделять на автоматы без памяти (комбинационные схемы) и автоматы с памятью (последовательностные схемы). Простейшим цифровым автоматом без памяти является логический вентилятор, реализующий одну из функций булевой алгебры. Соединение вентиля в виде сети без обратных связей порождает сложные комбинационные схемы (сумматор, дешифратор и т. д.). Простейшим автоматом с памятью является триггер, имеющий два устойчивых состояния. Совокупность триггеров представляет собой регистр, отражающий состояние последовательностной схемы.

Математической моделью абстрактного цифрового автомата является пятикомпонентный вектор [3, 73, 75, 77, 81, 82, 111, 140, 160, 232]:

$$S_A = \langle A, Z, W, \delta, \lambda \rangle, \quad (1.1)$$

где  $A = \{a_1, \dots, a_M\}$  — множество состояний;  $Z = \{z_1, \dots, z_F\}$  — множество входных сигналов (входной алфавит) автомата;  $W = \{w_1, \dots, w_G\}$  — множество выходных сигналов (выходной алфавит) автомата;  $\delta$  — функция переходов, реализующая отображение множества  $D_\delta \subseteq A \times Z$  в  $A$  ( $a_s = \delta(a_m, z_f)$ ), где  $a_m, a_s \in A, z_f \in Z$ ;  $\lambda$  — функция выходов, реализующая отображение множества  $D_\lambda \subseteq A \times Z$  на  $W$  ( $w_g = \lambda(a_m, z_f)$ ), где  $a_m \in A, z_f \in Z, w_g \in W$ ). Множества  $A, Z, W$  иногда называются алфавитом состояний, входным и выходным алфавитами соответственно. Автомат называется *конечным*, если конечны его множества.

Обычно практическое использование автомата возможно только в том случае, если его работа начинается с определенного состояния, называемого начальным состоянием автомата [140, 160]. При определении поведения автомата на интервале дискретного времени начальное состояние соответствует состоянию автомата в начальный момент времени [160]. Абстрактный цифровой автомат с выделенным начальным состоянием называется *инициальным* и представляется шестикомпонентным вектором:

Наукове видання

*Бабаков Роман Маркович*

**ОПЕРАЦІЙНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ КОДІВ СТАНІВ  
У МІКРОПРОГРАМНОМУ АВТОМАТІ**

Монографія

(Російською мовою)

Редактор

О. А. Солдатова

Технічний редактор

Т. О. Важеніна

Підписано до друку 04.07.2019

Формат 60 x 84/16. Папір офсетний.

Друк – цифровий. Умовн. друк. арк. 12,09.

Тираж 300 прим. Зам. 8405/1

Донецький національний університет імені Василя Стуса

21021, м. Вінниця, 600-річчя, 21

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру

серія ДК № 5945 від 15.01.2018

Віддруковано з оригіналів замовника.

Видавець та виготовлювач ТОВ «ТВОРИ».

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції серія ДК № 6188 від 18.05.2018 р.

21027, а/с 8825, м. Вінниця, вул. Келецька, 51а.

Тел.: (0432) 603-000, (096) 97-30-934, (093) 89-13-852.

e-mail: [info@tvoru.com.ua](mailto:info@tvoru.com.ua)

<http://www.tvoru.com.ua>