

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ /

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ISSN 1563-0064

# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА

Научно-технический журнал

Основан в 1997 г.

№ 4(39), октябрь – декабрь 2007

Выходит 4 раза в год

© Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники, 2007

Свидетельство о государственной регистрации КВ № 2657 от 02.06.97.

РИ, 2007, № 4

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАДИОТЕХНИКА

- СЛИПЧЕНКО Н.И. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ СВЧ ДИАГНОСТИКИ АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ.....4
- ПАЛАГІН В.В., КУЛИКОВ Д.В. ЗАСТОСУВАННЯ ТА АДАПТАЦІЯ МЕТОДУ МАКСИМІЗАЦІЇ ПОЛІНОМУ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ РАДІОСИГНАЛУ НА ТЛІ ЕКСЦЕСНИХ І-ГО ТИПУ І-ГО ВИДУ ЗАВАД ПРИ НЕОДНАКОВО РОЗПОДІЛЕНИХ ВИБІРКОВИХ ЗНАЧЕННЯХ.....12

### ЭЛЕКТРОНИКА

- OLEINICK A. MATHEMATICAL MODELLING OF DIFFUSION-REACTION INSIDE MESOPOROUS SPHERICAL NANOPARTICLES. ANALYTICAL SOLUTION FOR THE CASE OF EXTREMELY FAST IRREVERSIBLE ADSORPTION.....18
- ГРИБСКИЙ М.П., ГРИГОРЬЕВ Е.В., СТАРОСТЕНКО В.В., ТАРАН Е.П., УНЖАКОВ Д.А. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА МИКРОСХЕМЫ АЦП И ЦАП.....22
- ПРОХОРЕЦ И.М. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ CDTE (CDZNTE) ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЙ.....24

### СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ

- КРИВУЛЯ А.В., ЗЛОТНИК М.В., РОМАНОВА Т.Е. СРЕДСЦВА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ МНОГОУГОЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ.....31
- ЯНЦЕВИЧ А.А., ПЕТРОВА А.Ю. СПЕКТРАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕКТОРНЫХ ФУНКЦИЙ.....37
- АРТЮХ А.В., ГИБКИНА Н.В., СИДОРОВ М.В. ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЛОСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В КОНЕЧНЫХ ОДНОСВЯЗНЫХ ОБЛАСТЯХ.....40
- ОКСАНИЧ А.П., ПЕТРЕНКО В.Р., ПРИТЧИН С.Э. АРХИТЕКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫРАЩИВАНИЕМ СЛИТКОВ КРЕМНИЯ.....49
- КАЧУР С.А. МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И ПРИНЦИПЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.....53
- КРЮКОВ М.А., РУЖЕНЦЕВ И.В. ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ СБОРА ДАННЫХ.....57
- РАДИЕВСКИЙ А. Е. ГАРМОНИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛЯТОР КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА. II.....60

### КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

- БАРКАЛОВ А.А., ТИТАРЕНКО Л.А., ЦОЛОЛО С.А. УМЕНЬШЕНИЕ ЧИСЛА МАКРОЯЧЕЕК PAL В СХЕМЕ АВТОМАТА МУРА.....65
- ПОБЕЖЕНКО И.А., ХАХАНОВА И.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДОБЕШИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗРАДНОСТИ ДАННЫХ.....69
- ГОРБАЧЕВ В.А., ЕФАНОВ А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СЕРВИСНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ.....76
- ХАХАНОВА И.В. СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ MQ-КОДЕРА.....81

# КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА



УДК 681.234

## УМЕНЬШЕНИЕ ЧИСЛА МАКРОЯЧЕЕК PAL В СХЕМЕ АВТОМАТА МУРА

БАРКАЛОВ А.А., ТИТАРЕНКО Л.А.,  
ЦОЛОЛО С.А.

Предлагается метод оптимизации аппаратурных затрат в логической схеме автомата Мура, реализуемого в базе CPLD. Метод основывается на наличии классов псевдоэквивалентных состояний автомата Мура и большому коэффициенту объединения по входу макроячеек PAL. Приведен пример применения предложенного метода.

### 1. Введение

Устройство управления является важной частью любой цифровой системы [1]. На практике достаточно часто используется модель микропрограммного автомата (МПА) Мура [2]. В настоящее время для реализации схем МПА широко используются программируемые логические устройства типа CPLD (complex programmable logic devices) [3-5]. В основе CPLD находятся макроячейки PAL (programmable array logic), характеризующиеся большим коэффициентом объединения по входу (несколько десятков) и ограниченным числом конъюнктивных термов (до десяти). Одной из актуальных задач, возникающих при синтезе схемы автомата Мура с использованием CPLD, является уменьшение аппаратурных затрат, то есть числа макроячеек PAL в схеме автомата [4,5]. Решение этой задачи позволяет уменьшить количество микросхем, что улучшает такие параметры, как быстродействие, надежность, стоимость и потребляемая мощность [1,4]. Для успешного решения этой задачи необходимо учитывать как особенности модели автомата, так и особенности CPLD. К особенностям модели автомата Мура относятся наличие псевдоэквивалентных состояний и зависимость выходных сигналов только от состояний [8, 9].

Целью данного исследования является оптимизация комбинационной схемы автомата Мура за счет обобщенного кодирования состояний и их классов, а также использование нескольких источников кода состояний, что возможно благодаря особенностям CPLD. Задачей исследования является разработка формализованного метода синтеза МПА Мура, позволяющего оптимизировать число макроячеек PAL в схемах блоков формирования функций возбуждения памяти и микроопераций.

### 2. Общие положения

Пусть автомат Мура задан прямой структурной таблицей (ПСТ) [2] со столбцами:  $a_m$  – исходное состояние, входящее в множество состояний  $A = \{a_1, \dots, a_M\}$ ;  $K(a_m)$  – код состояния  $a_m \in A$  разрядности

$$R = \lceil \log_2 M \rceil; \quad (1)$$

$a_s$  – состояние перехода;  $K(a_s)$  – код состояния  $a_s \in A$ ;  $X_h$  – конъюнкция входных сигналов (логических условий), входящих в множество  $X = \{x_1, \dots, x_L\}$ , которая определяет переход  $\langle a_m, a_s \rangle$ ;  $\Phi_h$  – набор функций возбуждения памяти, входящих во множество  $\Phi = \{D_1, \dots, D_R\}$  и принимающих единичное значение для переключения памяти из  $K(a_m)$  в  $K(a_s)$ ;  $h = 1, \dots, H$  – номер перехода. Кроме того, в столбце  $a_m$  записывается выходной набор  $Y(a_m) \subseteq Y$ , формируемый в состоянии  $a_m$ . Здесь  $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$  – множество микроопераций. Эта таблица является основой для формирования систем булевых функций:

$$\Phi = \Phi(T, X), \quad (2)$$

$$Y = Y(T). \quad (3)$$

В системах (2)-(3) множество  $T = \{T_1, \dots, T_R\}$  включает внутренние переменные, используемые для кодирования состояний МПА. Системы (2)-(3) определяют структурную схему МПА Мура  $U_1$  (рис.1).

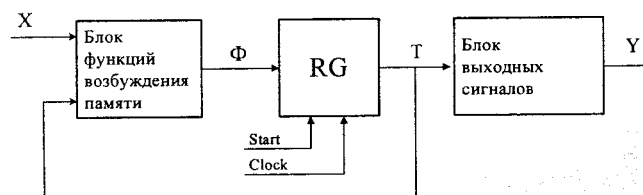


Рис. 1. Структурная схема автомата Мура  $U_1$

В структуре  $U_1$  блок функций возбуждения памяти (БФП) реализует систему (2), а блок выходных сигналов (БВС) реализует систему (3). Схемы обоих блоков реализуются на макроячейках PAL. Память автомата представлена регистром RG, который обнуляется по сигналу Start. Периодический сигнал Clock используется для синхронизации работы схемы.

Для уменьшения числа PAL в блоке БФП можно использовать метод оптимального кодирования состояний, основанный на наличии классов псевдоэквивалентных состояний  $B_i \in \Pi_A$  [8, 9]. Здесь  $\Pi_A = \{B_1, \dots, B_I\}$  – разбиение множества  $A$  на классы псевдоэквивалентных состояний. Состояния

$a_m, a_p \in A$  называются псевдоэквивалентными, если они отмечают операторные вершины алгоритма управления [2], выходы которых связаны со входом одной и той же вершины алгоритма. При оптимальном кодировании каждый класс  $V_i \in \Pi_A$  представляется минимально возможным числом обобщенных интервалов  $R$ -мерного булева пространства. При этом длина ПСТ (число в срок) становится меньше  $N$  и в пределе может достичь длины ПСТ эквивалентного автомата Мили. Обозначим этот предел символом  $H_0$ . Для оптимального кодирования может быть использован, например, известный алгоритм ESPRESSO [1]. Недостатком оптимального кодирования является невозможность оптимизации схемы БВС. Кроме того, оптимальное кодирование не всегда гарантирует уменьшение ПСТ до  $H_0$  [9].

В настоящей работе предлагается метод синтеза, позволяющий одновременно уменьшить аппаратные затраты в схемах БФП и БВС. Метод основан на всех ранее отмеченных особенностях автомата Мура и базиса CPLD.

### 3. Основная идея предлагаемого метода

Используем разбиение  $\Pi_A$  для формирования системы булевых функций

$$V_i = \bigvee_{m=1}^M C_{im} a_m \quad (i = 1, \dots, I), \quad (4)$$

где  $C_{im}$  – булева переменная, равная единице, если и только если  $a_m \in V_i$ . Закодируем состояния  $a_m \in A$  таким образом, чтобы каждая функция систем (3) и (4) выразилась минимально возможным числом обобщенных интервалов  $R$ -мерного булева пространства. Назовем такой подход обобщенным кодированием состояний, для реализации которого может быть использован алгоритм ESPRESSO [1].

Разобьем множество  $\Pi_A$  на классы  $\Pi_B$  и  $\Pi_C$ , при этом  $V_i \in \Pi_B$ , если

$$K_i = 1, \quad (5)$$

где  $K_i$  – число интервалов, представляющих класс  $V_i \in \Pi_A$ . Закодируем классы  $V_i \in \Pi_C$  двоичными кодами  $K(V_i)$  разрядности

$$R_1 = \lceil \log_2(I_C + 1) \rceil, \quad (6)$$

где  $I_C = |\Pi_C|$ . Используем для такого кодирования элементы  $\tau_r \in \tau$ , где  $|\tau| = R_1$ . Теперь может быть сформирована система функций

$$\tau = \tau(T). \quad (7)$$

В этом случае автомат Мура может быть представлен структурной схемой  $U_2$  (рис. 2).

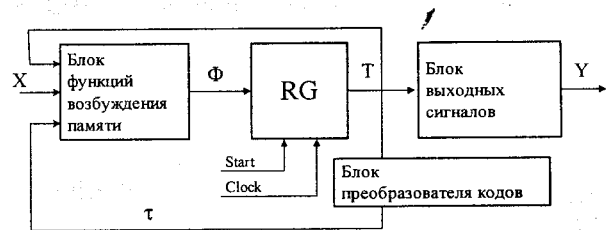


Рис. 2. Структурная схема автомата Мура  $U_2$

В МПА  $U_2$  переменные  $T$  представляют коды  $S(V_i)$  классов  $V_i \in \Pi_B$ , а переменные  $\tau$  – коды  $K(V_i)$  классов  $V_i \in \Pi_C$ . Блок БФП реализует систему функций

$$\Phi = \Phi(T, \tau, X), \quad (8)$$

блок БВС – систему (3), а блок преобразователя кодов (БПК) – систему (7). Таким образом, блок БПК реализует преобразование кодов, представляющих состояния  $a_m \in V_i$ , в код  $K(V_i)$  класса  $V_i \in \Pi_C$ . Такой подход позволяет уменьшить число термов, реализуемых в блоке БФП, до  $H_0$  и уменьшить число макроячеек PAL в блоке БВС (в пределе до  $N$ ) по сравнению с оптимальным кодированием состояний. Однако оптимизация связана с введением блока БПК, потребляющего некоторые ресурсы кристалла. Этот блок может быть исключен при выполнении условия

$$I_C = 0. \quad (9)$$

В настоящей работе предлагается метод синтеза автомата Мура  $U_2$ , включающий следующие этапы:

1. Формирование разбиения  $\Pi_A$  и системы функций (4).
2. Обобщенное кодирование состояний  $a_m \in A$ .
3. Формирование множеств  $\Pi_B$  и  $\Pi_C$ .
4. Кодирование классов  $V_i \in \Pi_C$  и формирование системы функций (7).
5. Формирование системы функций (3).
6. Формирование прямой структурной таблицы автомата  $U_2$  и системы (8).
7. Синтез логической схемы автомата  $U_2$  в заданном элементном базисе.

### 4. Пример применения предложенного метода

Пусть ПСТ автомата Мура  $S_1$  построена на основе следующей системы обобщенных формул перехода [9]:

$$V_1 \rightarrow x_1 a_2 \vee \bar{x}_1 a_3;$$

$$V_2 \rightarrow x_2 a_4 \vee \bar{x}_2 x_3 a_5 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3 a_6;$$

$$B_3 \rightarrow x_3 a_6 \vee \bar{x}_3 x_4 a_8 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_4 a_1;$$

$$B_4 \rightarrow x_5 a_8 \vee \bar{x}_5 x_6 a_{11} \vee \bar{x}_5 \bar{x}_6 a_{13};$$

$$B_5 \rightarrow a_{10};$$

$$B_6 \rightarrow x_1 a_{12} \vee \bar{x}_1 a_1;$$

$$B_7 \rightarrow x_4 a_1 \vee \bar{x}_4 x_5 a_7 \vee \bar{x}_4 \bar{x}_5 x_6 a_{11} \vee \bar{x}_4 \bar{x}_5 \bar{x}_6 a_{13}. \quad (10)$$

Пусть при этом получено разбиение  $\Pi_A = \{B_1, \dots, B_7\}$ , где  $B_1 = \{a_1\}$ ,  $B_2 = \{a_2, a_3\}$ ,  $B_3 = \{a_4\}$ ,  $B_4 = \{a_5, a_6, a_7\}$ ,  $B_5 = \{a_8, a_9\}$ ,  $B_6 = \{a_{10}\}$ ,  $B_7 = \{a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$ . Пусть система микроопераций автомата  $S_1$  представляется следующей системой уравнений:

$$y_1 = a_2 \vee a_3 \vee a_{12}; \quad y_2 = a_4 \vee a_8 \vee a_9 \vee a_{10};$$

$$y_3 = a_3 \vee a_7 \vee a_8 \vee a_{11}; \quad y_4 = a_5 \vee a_{11};$$

$$y_5 = a_6 \vee a_7 \vee a_8; \quad y_6 = a_4 \vee a_6 \vee a_{10};$$

$$y_7 = a_3 \vee a_{11} \vee a_{12} \vee a_{13}; \quad y_8 = a_3 \vee a_7 \vee a_{12}. \quad (11)$$

Итак, для автомата  $S_1$  имеем  $M=13$ ,  $R=4$ ,  $T = \{T_1, \dots, T_4\}$ ,  $\Phi = \{D_1, \dots, D_4\}$ ,  $I=7$ ,  $N=8$ . Сформируем систему (4), которая имеет следующий вид:

$$B_1 = a_1; \quad B_2 = a_2 \vee a_3; \quad B_3 = a_4; \quad B_4 = a_5 \vee a_6 \vee a_7;$$

$$B_5 = a_8 \vee a_9; \quad B_6 = a_{10}; \quad B_7 = a_{11} \vee a_{12} \vee a_{13}. \quad (12)$$

Результат обобщенного кодирования состояний для автомата  $S_1$  показан картой Карно на рис. 3.

		$T_3 T_4$			
	$T_1 T_2$	00	01	11	10
00		$a_1$	$a_2$	*	$a_4$
01		$a_5$	*	$a_6$	$a_{10}$
11		$a_{11}$	$a_3$	$a_7$	$a_8$
10		$a_{13}$	$a_{12}$	*	$a_9$

Рис. 3. Коды состояний автомата Мура  $S_1$

Анализ этой карты показывает, что классы  $B_1, B_3, B_5, B_6 \in \Pi_B$  и  $B_2, B_4, B_7 \in \Pi_C$ . Таким образом,  $I_N=3$ ,  $R_1=2$ ,  $\tau = \{\tau_1, \tau_2\}$ . Закодируем классы  $B_i \in \Pi_C$  следующим образом:  $K(B_2) = 11$ ,  $K(B_4) = 01$ ,  $K(B_7) = 10$ . Таким образом, чем больше состояний входит в класс  $B_i \in \Pi_C$ , тем меньше единиц содержит код этого класса. Отметим, что код 00 соответствует ситуации  $B_i \in \Pi_B$ . Этим объясняется наличие единицы в формуле (6). Из карты Карно имеем  $C(B_1) = 0000$ ,  $C(B_3) = 001*$ ,  $C(B_5) = 1*10$ ,  $C(B_6) = 0110$ .

Сформируем систему уравнений (7). Например,  $K(B_4) = 01$  и коды состояний  $a_m \in B_4$  входят в два обобщенных интервала  $010*$  и  $*111$ . Следовательно, булево уравнение для переменной  $\tau_2$  содержит термы  $\bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3$  и  $T_2 T_3 T_4$ . Выполняя подобные действия, получим систему функций блока БПК:

$$\tau_1 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \vee T_2 \bar{T}_2 T_3 \vee T_1 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \vee T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3;$$

$$\tau_2 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \vee T_2 \bar{T}_2 T_3 \vee \bar{T}_1 T_2 \bar{T}_3 \vee T_2 T_3 T_4. \quad (13)$$

Используя систему (11) и коды из рис. 3, получим систему функций блока БВС:

$$y_1 = \bar{T}_3 T_4; \quad y_2 = T_3 \bar{T}_4; \quad y_3 = T_1 T_2; \quad y_4 = T_2 T_3 \bar{T}_4;$$

$$y_5 = T_2 T_3; \quad y_6 = \bar{T}_1 T_3; \quad y_7 = T_1 \bar{T}_3; \quad y_8 = T_1 T_4. \quad (14)$$

Преобразованная ПСТ автомата  $S_1$  строится по системе (10) и включает столбцы  $B_i$ ,  $C(B_i)$ ,  $K(B_i)$ ,  $a_s$ ,  $K(a_s)$ ,  $X_h$ ,  $\Phi_h$ ,  $h$ . Фрагмент преобразованной ПСТ для классов  $B_1, B_2 \in \Pi_A$  содержит 5 строк (табл. 1).

Таблица 1  
Фрагмент преобразованной ПСТ автомата Мура  $S_1$

$B_i$	$C(B_i)$	$K(B_i)$	$a_s$	$K(a_s)$	$X_h$	$\Phi_h$	$h$
$B_1$	0000	00	$a_2$	0001	$x_1$	$D_4$	1
			$a_3$	1101	$\bar{x}_1$	$D_1 D_2 D_4$	2
$B_2$	****	11	$a_4$	0010	$x_2$	$D_3$	3
			$a_5$	0100	$\bar{x}_2 x_3$	$D_2$	4
			$a_6$	0111	$\bar{x}_2 \bar{x}_3$	$D_2 D_3 D_4$	5

Связь этой таблицы с системой (10) и кодами классов и состояний очевидны. Отметим, что при  $B_i \in \Pi_B$  столбец  $K(B_i)$  содержит код 00, а при  $B_i \in \Pi_C$  содержимое столбца  $C(B_i)$  игнорируется и может быть любым, что отмечено знаками \*. Эта таблица является основой для формирования системы (8). Например, из табл. 1 с учетом минимизации имеем:

$$D_1 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{\tau}_1 \bar{\tau}_2 \bar{x}_1 \text{ (строка 2);}$$

$$D_2 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{\tau}_1 \bar{\tau}_2 \bar{x}_1 \vee \tau_1 \tau_2 \bar{x}_2 \text{ (строки 2,4,5);}$$

$$D_3 = \tau_1 \tau_2 x_2 \vee \tau_1 \tau_2 \bar{x}_3 \text{ (строки 3,5);}$$

$$D_4 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{\tau}_1 \bar{\tau}_2 \bar{x}_1 \vee \tau_1 \tau_2 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \text{ (строки 1,2,5).} \quad (15)$$

Реализация схемы автомата  $S_1$  сводится к реализации систем функций (13), (14), (15) на элементах PAL, что может быть выполнено, например, с использованием пакета WebPack [7].

Отметим, что для модели  $U_2$  длина преобразованной ПСТ всегда равняется  $N_0$ . Так, для автомата  $S_1$  имеем  $N_0 = 18$ , что равняется числу термов в системе (10). При этом параметр  $N = 36$ . Как показали наши исследования, при оптимальном кодировании состояний длина ПСТ также сокращается до  $N_0 = 18$ , но система выходных сигналов имеет 26 термов. В случае обобщенного кодирования состояний система выходных сигналов имеет минимально возможное число термов ( $N = 8$ ) и каждая функция  $y_n \in Y$  реализуется на одной макроячейке PAL. Это позволяет получить схему блока БВС с максимально возможным быстродействием. При этом в модели  $U_2$  добавляется 8 термов для реализации схемы блока БПК. Отметим, что общее число реализуемых термов в модели  $U_2$  равно 34, в модели  $U_1$  – 62, а при оптимальном кодировании состояний – 44. Естественно, что аппаратные затраты значительно зависят от числа термов, реализуемых в одной макроячейке. Этот же параметр влияет и на число уровней схемы, то есть на ее быстродействие.

## 5. Заключение

Предлагаемый метод обобщенного кодирования состояний автомата Мура позволяет уменьшить длину таблицы переходов до длины соответствующей таблицы эквивалентного автомата Мили. При этом число термов в системе выходных сигналов может быть уменьшено до числа микроопераций ( $N$ ). Сжатие таблицы переходов достигается за счет ввода блока преобразователя кодов для некоторых классов псевдоэквивалентных состояний. Этот блок не вносит задержки в работу автомата, так как преобразование выполняется параллельно с выполнением микроопераций в исполнительной части цифровой системы. При выполнении условия (9), когда каждый класс представляется одним кодовым интервалом, блок БПК отсутствует. Использование БПК основано на особенностях макроячеек PAL [10]. Дополнительным эффектом предлагаемого метода является возможность уменьшения времени цикла автомата, благодаря уменьшению числа уровней в его логической схеме.

Для исследования эффективности предложенного метода был реализован программный комплекс, использующий VHDL-модели автоматов  $U_1$  и  $U_2$ . Кодирование состояний и их классов выполнялось алгоритмом ESPRESSO [1]. Результирующие системы уравнений обрабатывались системой WebPack фирмы Xilinx [7], что позволило оценить число макроячеек PAL и быстродействие схем автоматов. Исследования

показали, что обобщенное кодирование состояний позволяет получить схемы, потребляющие до 40% меньше макроячеек, чем для автоматов с произвольным кодированием состояний, и до 18% меньше, чем для автоматов с оптимальным кодированием состояний. При этом число уровней в первом случае уменьшалось от 3 до 6, а во втором – от 1 до 3.

*Научная новизна* предложенного метода заключается в учете особенностей автомата Мура и элементной базы CPLD для оптимизации числа макроячеек PAL в схеме автомата.

*Практическая значимость* метода заключается в уменьшении стоимости схемы автомата Мура на CPLD по сравнению с известными из литературы аналогами.

**Литература:** 1. DeMicheli G. Synthesis and Optimization of Digital Circuits. McGraw-Hill, 1994. 636 pp. 2. Baranov S. Logic Synthesis for Control Automata. Kluwer Academic Publishers, 1994. 312 pp. 3. Грушницкий Р.И., Мурсаев А.Х., Угрюмов Е.П. Проектирование систем с использованием микросхем программируемой логики. СПб: БХВ. Петербург, 2002. 608 с. 4. Соловьев В.В. Проектирование цифровых схем на основе программируемых логических интегральных схем. М.: Горячая линия-ТЕЛЕКОМ, 2001. 636 с. 5. Kania D. Synteza logiczna przeznaczona dla matrycowych struktur programowalnych typu PAL. Zeszyty naukowe Politechniki Bylskiej, Gliwice, 2004. 240 pp. 6. altera.com 7. xilinx.com 8. Баркалов А.А. Принципы оптимизации логической схемы микропрограммного автомата Мура // Кибернетика и системный анализ. 1998, №1. С. 65-72. 9. Barkalov A., Wegrzyn M. Design of Control Units with Programmable Logic. Zielona Gora: University of Zielona Gora Press, 2006. 150 s. 10. Баркалов А.А., Цололо С.А. Оптимизация схемы автомата Мура в составе системы на кристалле // Радиоэлектроника и информатика. 2007. №1. С. 35 - 39

Поступила в редколлегию 17.12.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Кривуля Г.Ф.

**Баркалов Александр Александрович**, д-р техн. наук, профессор кафедры ЭВМ ДонНТУ, профессор Университета Зеленогурского (Польша). Научные интересы: цифровые устройства управления. Хобби: научная работа, спорт. Адрес: Украина, 83122, Донецк, ул. Артема, д.204А, кв.105. (+38062)301-07-35

**Титаренко Лариса Александровна**, д-р техн. наук, профессор кафедры ТКС ХНУРЭ, профессор Университета Зеленогурского (Польша). Научные интересы: системы телекоммуникаций, цифровые устройства управления. Хобби: научная работа, спорт. Адрес: Украина, 62418, Харьковская обл., пос. Песочин, ул. Зеленая, 14.

**Цололо Сергей Алексеевич**, аспирант каф ЭВМ ДонНТУ. Научные интересы: цифровые устройства управления на ПЛУ. Хобби: научная работа, спорт, музыка. Адрес: Украина, 83049, Донецк, ул. А. Толстого, д. 206а. (+380622) 596005.