

УДК 681.234

## УМЕНЬШЕНИЕ АППАРАТУРНЫХ ЗАТРАТ В СХЕМЕ МПА МУРА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НА CPLD

**А.А. Баркалов, С.А. Цололо**

Зеленогурский университет (Польша),  
Донецкий национальный технический университет  
A.Barkalov@iie.uz.zgora.pl

### **Abstract**

*Method of Moore's circuit optimization is proposed. The method is based on use of free outputs EMB blocks for representation the codes of classes of pseudoequivalent states. The proposed approach allows to reduce number of PAL macrocells in Moore FSM without decrease of digital system performance. The carried out researches have shown that the method reduces hardware expenses up to 28%.*

### **Введение**

Современная индустрия электроники для реализации цифровых систем любой сложности широко использует «системы на кристалле» (SoC, system-on-chip) [1]. Использование этого базиса позволяет реализовать сложную цифровую систему на одном кристалле [2]. В настоящее время разработано несколько видов подобных систем, различных как по структуре, так и по набору функциональных блоков. Однако в общем случае можно сказать, что в SoC используются функциональные элементы двух основных типов: макроячейки (PAL, programmable array logic) для реализации произвольной логики и блоки памяти (EMB, embedded memory blocks) для реализации табличных функций [3].

Среди цифровых устройств, которые часто реализуются на SoC, отдельно можно выделить устройства управления (УУ) [4,5], координирующие работу блоков цифровой системы. Одной из широко распространенных моделей УУ является модель микропрограммного автомата (МПА) Мура [6]. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является уменьшение аппаратных затрат в схеме МПА Мура при реализации схемы в базисе SoC. Кроме того, эта задача также обусловлена общей комплексной сложностью современных цифровых систем.

При решении задачи уменьшения аппаратных затрат в схеме МПА Мура необходимо учитывать как особенности структурной схемы МПА, так особенности элементного базиса SoC. Среди особенностей МПА Мура, которые можно использовать в этом случае, следует отметить наличие псевдоэквивалентных состояний [7], а также регулярный характер системы микроопераций, что позволяет реализовать ее на EMB [3]. Особенностями PAL является большой коэффициент объединения по входу, который достигает нескольких десятков в реальных CPLD (complex programmable logic devices) [8], и ограниченное число элементарных конъюнкций (термов) в одной макроячейке (порядка восьми) [4].

Целью представленных в этой работе исследований является возможность оптимизации комбинационной схемы автомата Мура за счет использования нескольких источников кода текущего состояния автомата, что возможно благодаря особенностям PAL. Основной решаемой в работе задачей является разработка метода синтеза МПА Мура,

позволяющего оптимизировать число макроячеек PAL в схеме формирования функций возбуждения (СФФВ) триггеров памяти автомата.

**Особенности реализации МПА Мура**

Пусть алгоритм управления цифровой системы представлен ГСА  $\Gamma = \Gamma(V, E)$ , где  $V = \{b_0, b_E\} \cup E_1 \cup E_2$  – множество вершин,  $E = \{ \langle b_q, b_t \rangle | b_q, b_t \in V \}$  – множество дуг. Здесь  $b_0$  – начальная вершина ГСА,  $b_E$  – конечная вершина ГСА,  $E_1$  – множество операторных вершин,  $E_2$  – множество условных вершин. В вершинах  $b_q \in E_1$  записываются наборы микроопераций  $Y(b_q) \subseteq Y$ , где  $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$  – множество микроопераций операционного автомата цифровой системы [9]. В вершинах  $b_q \in E_2$  записываются элементы множества логических условий  $X = \{x_1, \dots, x_L\}$ . Начальная и конечная вершины ГСА соответствуют состоянию  $a_1 \in A = \{a_1, \dots, a_M\}$ , где  $A$  – множество состояний автомата Мура, а каждая вершина  $b_q \in E_1$  соответствует одному из элементов множества  $A$  [5]. Логическая схема МПА Мура задается системой уравнений

$$\Phi = \Phi(T, X), \tag{1}$$

$$Y = Y(T), \tag{2}$$

где  $T = \{T_1, \dots, T_R\}$  – множество внутренних переменных, кодирующих состояния  $a_m \in A$ ,  $R = \lceil \log_2 M \rceil$ ;  $\Phi = \{D_1, \dots, D_R\}$  – множество функций возбуждения триггеров памяти состояний. Системы (1)-(2) формируются на основе прямой структурной таблицы (ПСТ) со столбцами:  $a_m$  – текущее состояние;  $K(a_m)$  – код состояния  $a_m \in A$ ;  $a_s$  – состояние перехода;  $K(a_s)$  – код состояния  $a_s \in A$ ;  $X_h$  – конъюнкция некоторых элементов множества  $X$  (или их отрицаний), определяющая переход  $\langle a_m, a_s \rangle$ ;  $\Phi_h$  – набор функций возбуждения памяти МПА, принимающих единичное значение для переключения памяти из  $K(a_m)$  в  $K(a_s)$ ;  $h = 1, \dots, H_1(\Gamma)$  – номер строки таблицы. В столбце  $a_m$  записывается набор микроопераций  $Y(a_m) \subseteq Y$ , формируемых в состоянии  $a_m \in A$ . Естественно, что  $Y(a_m) = Y(b_q)$ , где вершина  $b_q \in E_1$  отмечена состоянием  $a_m \in A$ .

Число переходов  $H_1(\Gamma)$  больше числа переходов  $H_2(\Gamma)$  эквивалентного автомата Мили [5]. Это приводит к увеличению числа PAL в схеме МПА Мура по сравнению с этим показателем эквивалентного автомата Мили. Параметр  $H_1(\Gamma)$  можно уменьшить, благодаря наличию псевдоэквивалентных состояний (ПЭС) МПА Мура [10]. Состояния  $a_m, a_s \in A$  называется ПЭС, если выходы соответствующих им вершин соединены с входом одной и той же вершины ГСА  $\Gamma$ . Пусть  $\Pi_A = \{B_1, \dots, B_I\}$  – разбиение множества  $A$  на классы ПЭС ( $I \leq M$ ). Поставим в соответствие классу  $B_i \in \Pi_A$  двоичный код  $K(B_i)$  разрядности  $R_1 = \lceil \log_2 I \rceil$  и используем переменные  $\tau_r \in \tau$  для такого кодирования, где  $|\tau| = R_1$ . В этом случае МПА Мура представляется в виде структуры  $U_1$  (рис. 1).

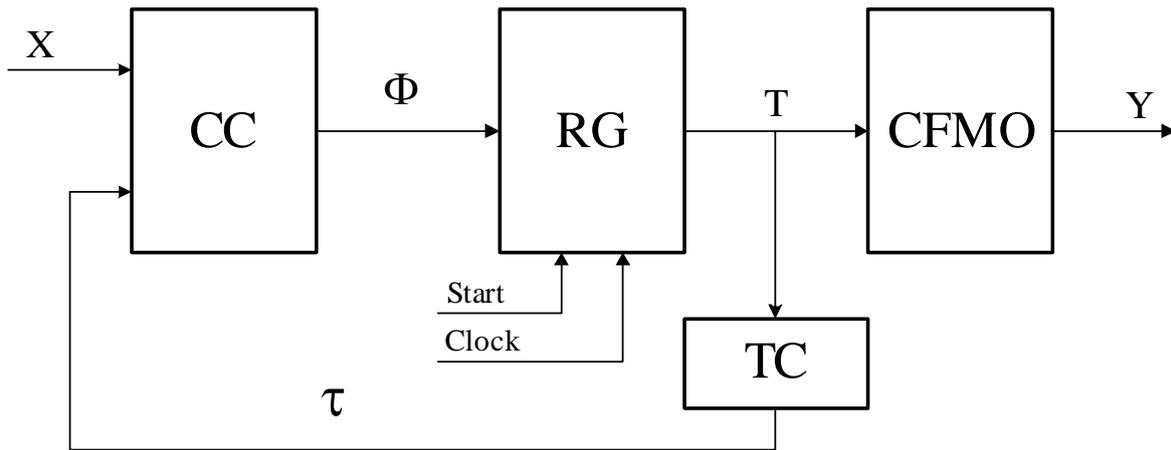


Рис. 1 – Структурная схема МПА Мура  $U_1$

В МПА  $U_1$  схема  $CC$  формирует функции

$$\Phi = \Phi(\tau, X), \tag{3}$$

а схема формирования микроопераций  $CFMO$  реализует систему (2). Регистр  $RG$  представляет собой память состояний, по сигналу  $Start$  в  $RG$  заносится нулевой код начального состояния  $a_1 \in A$ , по сигналу  $Clock$  происходит смена кодов в регистре. Преобразователь кодов состояний  $TC$  реализует систему функций

$$\tau = \tau(T), \tag{4}$$

при этом код  $K(B_i)$  формируется на основе кода  $K(a_m)$ , где  $a_m \in B_i$ .

В [10] показано, что для МПА  $U_1$  число переходов уменьшается до  $H_2(\Gamma)$ . Следует отметить, что недостатком МПА  $U_1$  является наличие схемы  $TC$ , требующей дополнительных ресурсов. В рамках этой структуры автомата схема  $CC$  реализуется на  $PAL$ , а схемы  $TC$  и  $CFMO$  – на блоках памяти  $EMV$ . В настоящей работе предлагается метод синтеза МПА Мура, позволяющий уменьшить аппаратные затраты в схеме  $TC$

В основе метода лежат особенности систем на кристалле, основанных на технологии  $CPLD$  [6, 7]:

- коэффициент объединения по входу макроячейки  $PAL$  значительно превосходит максимально возможное число букв в термах системы (1), определяемое как  $L + R$  ;
- число выходов  $EMV$  может меняться в некотором диапазоне (как правило, 1, 2, 4, 8).

**Основная идея предлагаемого метода**

Для оптимизации схемы МПА Мура используем идею оптимального кодирования состояний [10]. Суть такого кодирования заключается в том, чтобы максимально возможное число классов  $B_i \in \Pi_A$  соответствовали одному обобщенному интервалу  $R$ -мерного булева пространства. Представим множество  $\Pi_A$  в виде  $\Pi_A = \Pi_B \cup \Pi_C$ , где  $B_i \in \Pi_B$ , если

$$|B_i| > 1, \tag{5}$$

и  $B_i \in \Pi_C$  в противном случае. Очевидно, что схема  $TC$  должна формировать только коды классов  $B_i \in \Pi_B$ . Закодируем состояния  $a_m \in A$  оптимальным образом [10].

Пусть  $t_F$  – фиксированное число выходов блока ЕМВ и пусть  $q$  – число слов в блоке при  $t_F = 1$ . При реализации схемы CFMO автомата  $U_1$  параметр  $t_F$  определяется следующим образом:

$$t_F = \lfloor q / M \rfloor. \tag{6}$$

При этом интегрально блоки ЕМВ схемы CFMO имеют

$$t_S = \lfloor N / t_F \rfloor \cdot t_F. \tag{7}$$

выходов. Очевидно, что  $\Delta_t$  выходов могут не использоваться для представления микроопераций, где

$$\Delta_t = t_S - N. \tag{8}$$

В данной статье рассмотрим ситуацию, при которой выполняется условие

$$\Delta_t = 0, \tag{9}$$

т.е. свободных выходов схемы CFMO нет (все они используются для представления микроопераций).

Представим множество  $\Pi_B$  в виде  $\Pi_B = \Pi_D \cup \Pi_E$ , где  $V_i \in \Pi_D$ , если коды  $a_m \in B$  входят один обобщенный интервал пространства кодирования. Теперь преобразованию подлежат только коды состояний  $a_m \in A(\Pi_E)$ , где  $A(\Pi_E) \subseteq A$  – множество состояний, входящих в классы  $\Pi_E$ . Для кодирования классов  $V_i \in \Pi_E$  достаточно

$$R_2 = \lfloor \log_2(|\Pi_E| + 1) \rfloor \tag{10}$$

переменных.

Таким образом, для интерпретации ГСА  $\Gamma$  предлагается использовать МПА Мура  $U_2$  (рис.2).

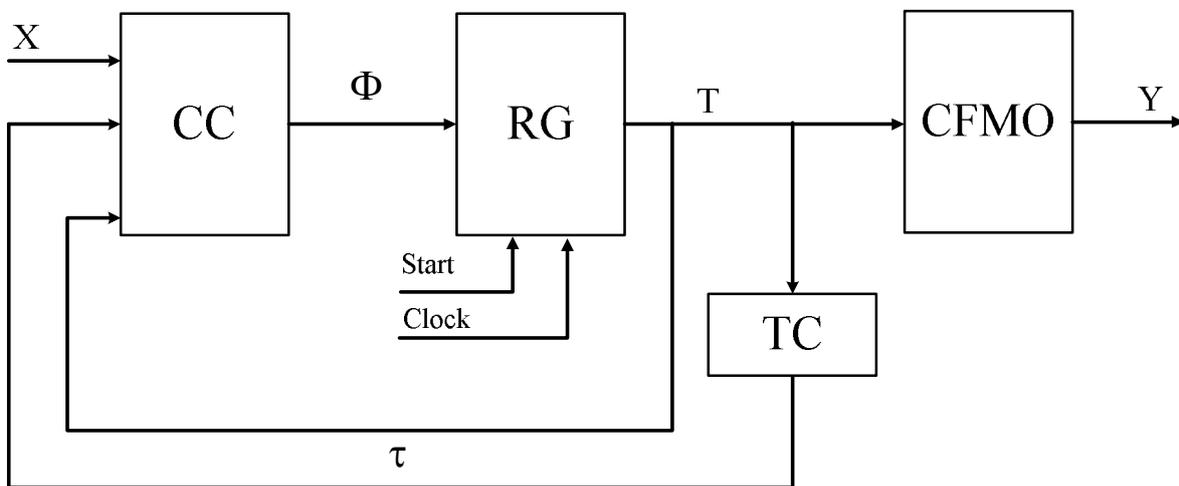


Рис. 2 – Структурная схема МПА Мура  $U_2$

Отметим ряд отличий, которые имеет автомат  $U_2$  по сравнению с автоматом  $U_1$ :

- схема CC формирует систему функций 
$$\Phi = \Phi(T, \tau, X); \tag{11}$$
- преобразователь кодов TC формирует коды классов  $V_i \in \Pi_E$ ;

- переменные  $T_r \in T$  представляют состояния  $a_m \in A(\Pi_C)$  и классы  $B_i \in \Pi_D$ , где  $A(\Pi_C)$  – множество состояний, входящих в классы  $B_i \in \Pi_C$ .

Число входов в макроэлементах PAL схемы СС увеличивается от  $L + R_1$  (автомат  $U_1$ ) до  $L + R + R_2$  (автомат  $U_2$ ). Так как PAL обладают коэффициентом объединения по входу нескольких десятков [7], то это не приводит к росту аппаратных затрат. Времена циклов автоматов  $U_1$  и  $U_2$  совпадают, и из этого следует, что предлагаемый подход позволяет уменьшить аппаратные затраты при сохранении быстродействия.

Таким образом, предлагаемый метод синтеза схемы МПА  $U_2$  состоит из следующих шагов:

1. Формирование отмеченной ГСА Г.
2. Формирование разбиения  $\Pi_A = \Pi_B \cup \Pi_C$ .
3. Оптимальное кодирование состояний и формирование множеств  $\Pi_D$  и  $\Pi_E$ .
4. Кодирование классов  $B_i \in \Pi_E$ .
5. Формирование таблицы схемы CFMO.
6. Формирование модифицированной прямой структурной таблицы автомата  $U_2$ .
7. Реализация схемы автомата в заданном элементном базисе.

**Исследование эффективности предложенного метода**

В основе исследований лежит принцип перехода от отдельных ГСА к классам ГСА, который основан на вероятностном подходе. Данный принцип был предложен Г.И. Новиковым [11] и развит в работе [7]. В качестве принципа оценки аппаратных затрат был выбран принцип перехода от схемы на макроэлементах PAL и блоках ЕМВ к матричным схемам предложенным С.И. Барановым [6]. Кроме того, для определения общих тенденций, а не отдельных точек в пространстве решений, был выполнен переход от абсолютных оценок аппаратных затрат к относительным оценкам для разных структур схемы автомата.

На рис. 3 представлена матричная реализация МПА  $U_1$ . При использовании данного подхода для описания схемы каждый комбинационный элемент состоит из двух матриц – конъюнктивной и дизъюнктивной. На рис. 3. символ «&» означает конъюнктивную матрицу, а символ «v» – дизъюнктивную матрицу.

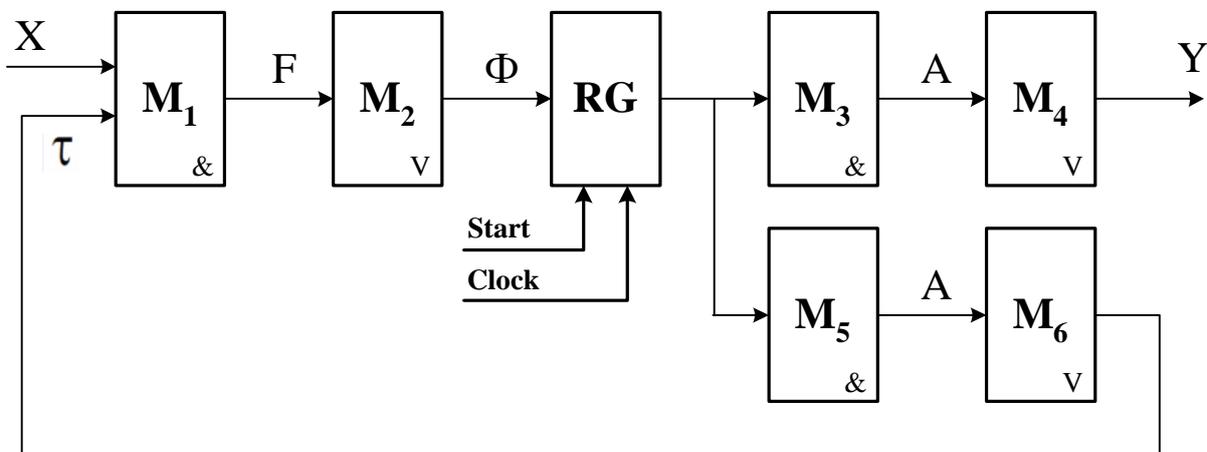


Рис. 3 – Матричная реализация МПА Мура  $U_1$

Матрицы  $M_1$  и  $M_2$  образуют схему СС, в которой число термов и переменных обратной связи совпадают с характеристиками эквивалентного автомата Мили. Матрицы  $M_3$  и  $M_4$  образуют схему CFMO, выходы схемы  $M_3$  соответствуют конъюнкциям  $A_m$  ( $m = 1, \dots, M$ ), соответствующих кодам состояний автомата Мура. Матрицы  $M_5$  и  $M_6$  образуют схему ТС. Площади  $S(M_i)$  матриц  $M_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) определяются в условных единицах площади и могут быть вычислены следующим образом:

$$\begin{aligned} S(M_1) &= 2(L + R_1)H_0; & S(M_2) &= H_0R; \\ S(M_3) &= S(M_5) = 2R \cdot 2^R; & S(M_4) &= 2^R \cdot N; \\ S(M_6) &= 2^R \cdot R_1. \end{aligned} \tag{12}$$

Для оценки классов ГСА используем параметр  $P_1$ , который равен доле операторных вершин, как это предложено в работе [11]. С помощью этого параметра и результатов работы [7] можно найти выражения для аргументов систем (12):

$$\begin{aligned} L &\approx 0.75 \cdot (1 - P_1)K; \\ R_1 &= \lceil \log_2(3.55 + 0.3 \cdot P_1 \cdot K) \rceil; \\ H_0 &= 4.44 + P_1 \cdot K; \\ R &= \lceil \log_2 P_1 \cdot K \rceil, \end{aligned} \tag{13}$$

где  $K$  – число вершин ГСА. Введем коэффициент  $k_p$ , определяющий отношение одной условной единицы площади макроячейки PAL к соответствующему параметру EMB. Теперь площадь матричной реализации схемы МПА  $U_1$  может быть выражена формулой

$$S(U_1) = k_p H_0 (2L + 2R_1 + R) + 2^R (4R + N + R_1) \tag{14}$$

Учитывая формулы (13), выражение  $S(U_1)$  может быть представлено как функции от аргументов  $K, P_1, k_p, N$ .

По аналогичному принципу может быть построена матричная схема МПА  $U_2$  (рис. 4):

$$S(U_2) = k_p H_0 (2L + 2R_1 + R) + 2^R (2R + N + R_1). \tag{15}$$

Учитывая формулы (13), выражение  $S(U_2)$  может быть представлено как функция от аргументов  $k_1, P_1, k_p, N$ .

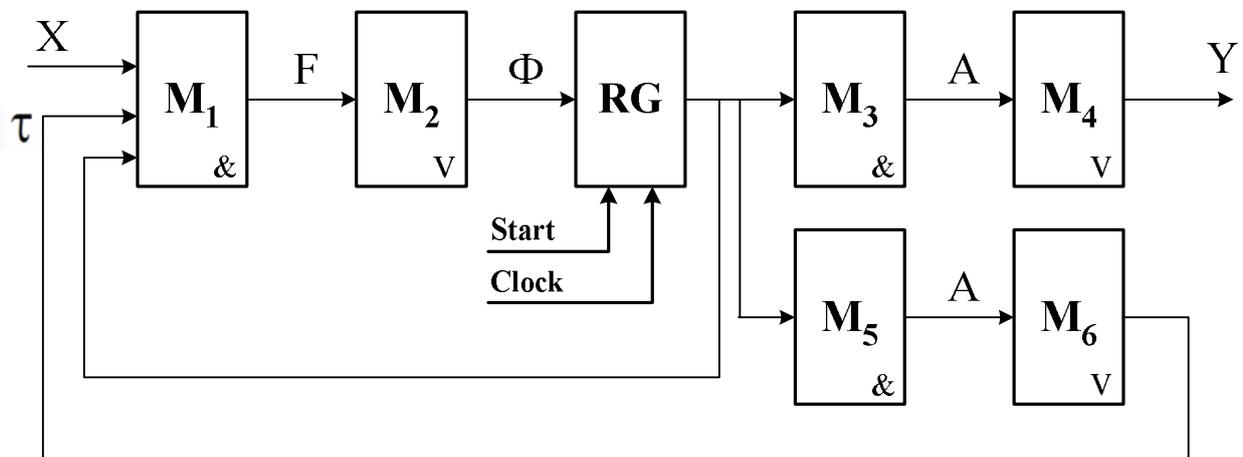


Рис. 4 – Матричная реализация МПА Мура  $U_2$

Таким образом, для определения эффективности предложенного метода необходимо найти область, где выполняется условие

$$f_1 = \frac{S(U_2)}{S(U_1)} < 1. \tag{16}$$

На рис. 5 и рис. 6 представлены некоторые результаты исследований, при этом параметр  $K$  меняется в диапазоне от 100 до 1000, параметр  $k_p = 0.2$ , число микроопераций  $N \in \{10, 50, 100\}$ , вероятность  $P_1 \in \{0.3; 0.7\}$ .

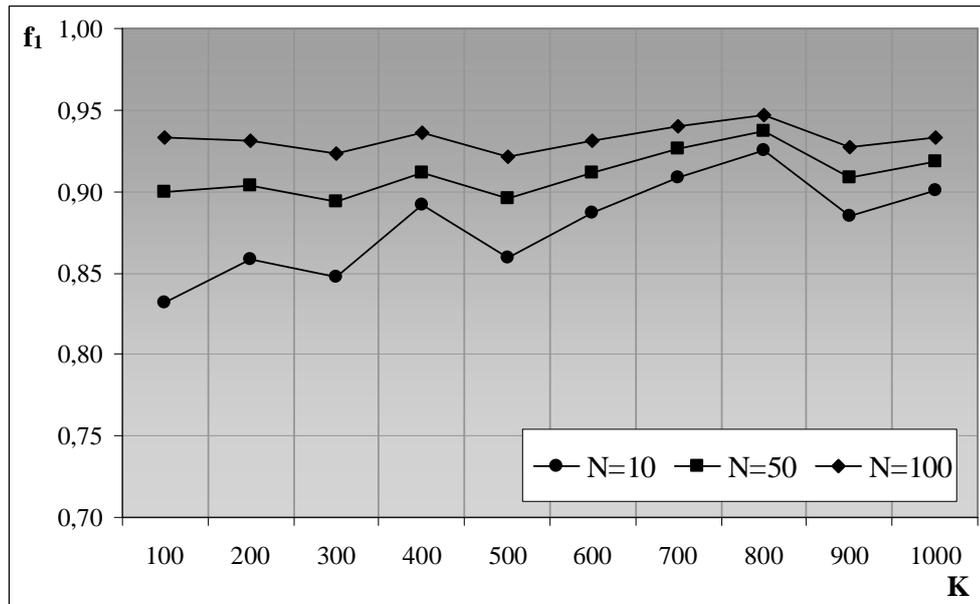


Рис. 5 – Функция  $f_1$  при  $P_1 = 0.3, k_p = 0.2$

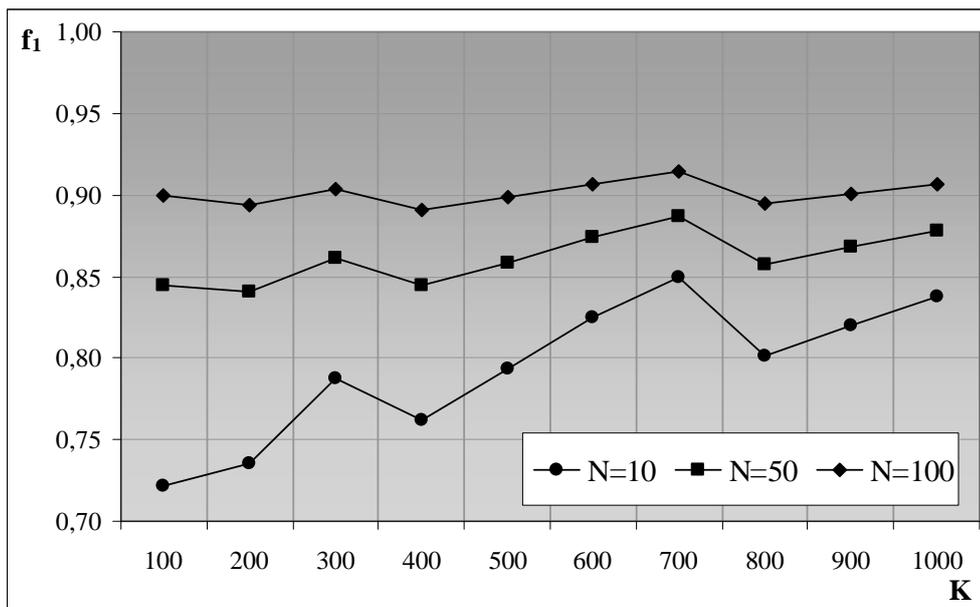


Рис. 6. Функция  $f_1$  при  $P_1 = 0.7, k_p = 0.2$

На основе приведенных графиков можно сделать вывод, что аппаратные затраты автомата  $U_2$  меньше, чем у автомата  $U_1$ . При этом выигрыш увеличивается как при уменьшении числа микроопераций и числа вершин, так и при росте доли операторных вершин ГСА (рост  $P_1$ ). Максимальный выигрыш достигается для ГСА, содержащих порядка 100 вершин, и составляет 28% при  $N = 10$  и  $P_1 = 0.7$ .

### **Заключение**

Предложенный в работе метод позволяет уменьшить аппаратные затраты в схеме автомата Мура, реализуемого в базисе CPLD, по сравнению с МПА  $U_1$ , включающим преобразователь ТС кодов псевдоэквивалентных состояний в коды классов псевдоэквивалентных состояний. Проведенные исследования показали, что максимальный выигрыш в аппаратных затратах для автомата  $U_2(\Gamma)$  по сравнению с  $U_1(\Gamma)$  может достигать 28%. Также необходимо отметить, что автоматы  $U_1(\Gamma)$  и  $U_2(\Gamma)$  имеют одинаковое быстродействие, то есть выигрыш по аппаратуре не приводит к потере производительности.

Научная новизна предложенного метода заключается в использовании особенностей автомата Мура (наличие классов псевдоэквивалентных состояний) и элементного базиса (большой коэффициент объединения по входу) для оптимизации числа макроячеек PAL в логической схеме автомата.

Практическая значимость метода заключается в уменьшении площади кристалла SoC, занимаемой комбинационной схемой МПА, что позволяет получить схемы, которые обладают меньшей стоимостью, чем известные из литературы аналоги.

### **Литература**

1. Barkalov A., Wegrzyn W. Design of Control Units with Programmable Logic. – Zielona Gora: University of Zielona Gora Press, 2006. – 150 pp.
2. Грушницкий Р.И., Мурсаев А.Х., Угрюмов Е.П. Проектирование систем с использованием микросхем программируемой логики. – СПб: БХВ. – Петербург, 2002. – 608с.
3. Maxfield C. The Design Warriors Guide to FPGAs. – Elsevier, 2004. – 541p.
4. Соловьев В.В. Проектирование цифровых схем на основе программируемых логических интегральных схем. – М.: Горячая линия-ТЕЛЕКОМ, 2001. – 636 с.
5. Баркалов А.А., Палагин А.В. Синтез микропрограммных устройств управления. – Киев: Институт кибернетики НАН Украины, 1997. – 136с.
6. Baranov S. Logic Synthesis for Control Automata. – Kluwer Academic Publishers, 1994. – 312 pp.
7. Баркалов А.А. Синтез устройств управления на программируемых логических устройствах. – Донецк: ДНТУ, 2002. – 262 с.
8. Kania D. Synteza logiczna przeznaczona dla matrycowych struktur programowalnych typu PAL. – Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004. – 240 pp.
9. DeMicheli G. Synthesis and Optimization of Digital Circuits. – McGraw-Hill, 1994. – 636p.
10. Баркалов А. А. Принципы оптимизации логической схемы микропрограммного автомата Мура. // Кибернетика и системный анализ. – 1998, №1.
11. Новиков Г.И. оценка эффективности параллельной выборки микрокоманд // Известия вузов СССР. Приборостроение. – 1974, №2. – с.71-73