

А.А. Баркалов (д-р техн. наук, проф.)¹,
Л.А. Титаренко (д-р техн. наук, проф.)¹,
К.Н. Ефименко (канд. техн. наук, доц.)²

Университет Зеленогурский (Польша)¹,
Донецкий национальный технический университет²

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ КМУУ С ЭЛЕМЕНТАРНЫМИ ЦЕПЯМИ

Предлагается метод уменьшения аппаратных затрат в схеме КМУУ с элементарными цепями, ориентированный на технологию FPGA. Метод основан на использовании двух источников кодов классов псевдоэквивалентных ЭОЛЦ и мультиплексора, позволяющего выбрать один из этих источников. Такой подход позволит уменьшить число LUT элементов в схеме адресации КМУУ. Приведен пример применения предложенного метода.

Ключевые слова: КМУУ, ГСА, ЭОЛЦ, FPGA, логическая схема.

Введение

Композиционные микропрограммные устройства управления (КМУУ) являются эффективным средством реализации линейных алгоритмов управления [1,2]. Одной из моделей КМУУ является модель с разделением кодов [3], позволяющая при определенных условиях уменьшить аппаратные затраты в схеме адресации микрокоманд. В настоящее время микросхемы типа FPGA (field-programmable gate arrays) широко используются при реализации схем цифровых устройств [4,5]. Основу этих СБИС представляют макроячейки табличного типа, называемые LUT (look-up table). Как правило, LUT-элементы имеют ограниченное число входов (4-6) [6,7]. Для уменьшения числа LUT в схеме КМУУ необходимо уменьшить число аргументов и термов в системе функций адресации микрокоманд [1,8]. В настоящей работе предлагается один из подходов к решению этой задачи, основанный на мультиплексировании двух источников кодов классов псевдоэквивалентных элементарных операторных линейных цепей (ЭОЛЦ). Предлагаемый метод является развитием результатов, полученных в работе [9].

Целью исследования является уменьшение числа LUT-элементов в схеме КМУУ с элементарными цепями за счет мультиплексирования источников кодов классов псевдоэквивалентных ЭОЛЦ.

Задачей исследования является разработка метода синтеза КМУУ с элементарными цепями, позволяющего оптимизировать схему

адресації мікрокоманд.

Алгоритм управління представлений в виде граф-схеми алгоритма (ГСА) [8]. Этот выбор определен наглядностью подобного представления и широким применением аппарата ГСА в практике инженерного проектирования.

Базовая информация о КМУУ с элементарными цепями

Пусть ГСА $\Gamma = \Gamma(V, E)$ представлена множествами вершин V и соединяющих их дуг E . Пусть $V = b_0 \cup b_E \cup E_1 \cup E_2$, где b_0 – начальная вершина, b_E – конечная вершина, E_1 – множество операторных вершин и E_2 – множество условных вершин ГСА Γ . В операторных вершинах $b_q \in E_1$ записываются наборы микроопераций $Y(b_q) \subseteq Y$, где $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$ – множество микроопераций. В условных вершинах $b_q \in E_2$ записываются элементы множества логических условий $X = \{x_1, \dots, x_L\}$. Введем ряд определений, взятых из [2].

Определение 1. Операторной линейной цепью (ОЛЦ) ГСА Γ называется конечная последовательность операторных вершин $\alpha_g = \langle b_{g_1}, \dots, b_{g_{F_g}} \rangle$ такая, что для любой пары соседних компонент $b_{g_i}, b_{g_{i+1}}$, где i – номер компоненты кортежа α_g , существует дуга $\langle b_{g_i}, b_{g_{i+1}} \rangle \in E$.

Определение 2. Вершина $b_q \in D^g$, где D^g – множество вершин, входящих в ОЛЦ α_g , называется входом ОЛЦ α_g , если существует дуга $\langle b_t, b_q \rangle \in E$, где $b_t \notin D^g$. Элементарная ОЛЦ (ЭОЛЦ) имеет только один вход.

Определение 3. Вершина $b_q \in D^g$, называется выходом ОЛЦ α_g , если существует дуга $\langle b_q, b_t \rangle \in E$, где $b_t \notin D^g$.

Определение 4. ЭОЛЦ α_i, α_j называются псевдоэквивалентными ЭОЛЦ, если их выходы связаны со входом одной и той же вершины $b_q \in V$.

Пусть для некоторой ГСА Γ сформировано множество ЭОЛЦ $S = \{\alpha_1, \dots, \alpha_G\}$, определяющее разбиение на множестве E_1 [3], и пусть $|E_1| = M$. Поставим в соответствие каждой вершине $b_q \in E_1$ микрокоманду MI_q с адресом $A(b_q)$, имеющим разрядность

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

Пусть $F_{\max} = \max(F_1, \dots, F_G)$ – максимальное число компонент в ЭОЛЦ. Закодируем каждую ЭОЛЦ $\alpha_g \in S$ двоичным кодом $K(\alpha_g)$,

имеющим R_1 разрядов, где

$$R_1 = \lceil \log_2 G \rceil. \quad (2)$$

Для определения любой вершины $b_q \in D^g$ достаточно R_2 разрядов, представляющих код $K(b_q)$. При этом

$$R_2 = \lceil \log_2 F_{\max} \rceil. \quad (3)$$

Пусть для ГСА Γ выполняется следующее условие:

$$R_1 + R_2 = R. \quad (4)$$

В этом случае для реализации алгоритма Γ целесообразно использовать модель КМУУ с элементарными цепями (рис. 1). В этой модели для кодирования ЭОЛЦ используются переменные $\tau_r \in \tau$, где $|\tau| = R_1$. Для кодирования компонент ЭОЛЦ используются переменные $T_r \in T$, где $|T| = R_2$. Коды компонент выбраны так, чтобы выполнялась естественная адресация микрокоманд [1]. Для этого код первой компоненты любой ЭОЛЦ равен 0, второй – 1 и так далее. Естественно, что эти десятичные числа представлены их двоичными R_2 -разрядными эквивалентами.

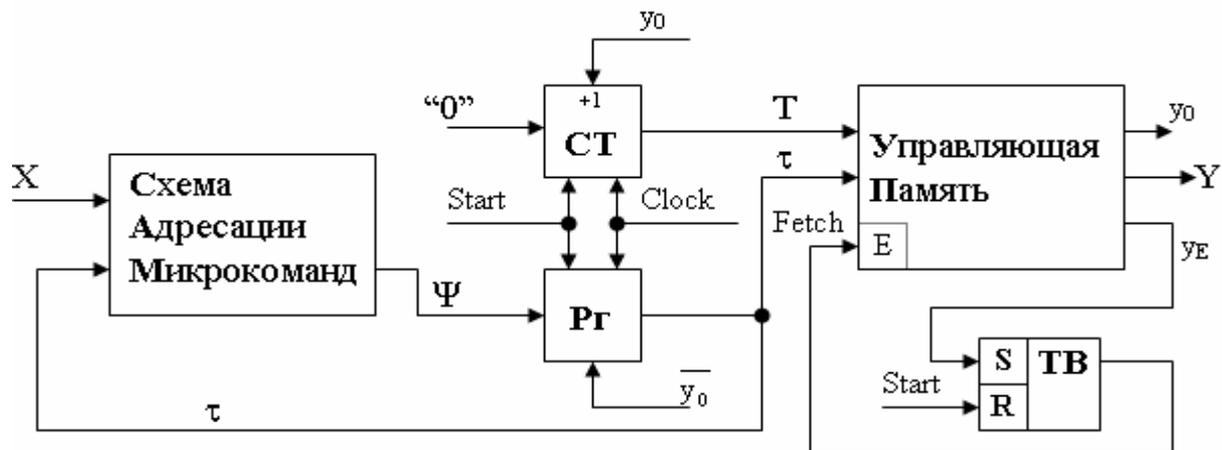


Рисунок 1 – Структурная схема КМУУ с элементарными цепями

Условимся в дальнейшем обозначать КМУУ (рис. 1) символом U_1 .

В КМУУ U_1 схема адресации микрокоманд (САМ) реализует систему функций возбуждения триггера $Pг$

$$\Psi = \Psi(\tau, X). \quad (5)$$

При этом адрес микрокоманды MI_q представляется в виде

$$A(b_q) = K(\alpha_g) * K(b_q), \quad (6)$$

где вершина b_q входит в состав ЭОЛЦ $\alpha_g \in C$, * – знак операции конкатенации.

Композиционное МУУ U_1 функционирует следующим образом. По сигналу $Start$ в $Pг$ и $СТ$ заносится начальный адрес микропрограммы, а триггер выборки $ТВ$ устанавливается в единичное состояние. При этом

Fetch = 1, что разрешает выборку команд из управляющей памяти (УП). Если считанная микрокоманда не соответствует выходу ЭОЛЦ, то одновременно с микрооперациями $Y(b_q)$ формируется сигнал y_0 . Если $y_0 = 1$, то к содержимому СТ прибавляется единица и адресуется следующая компонента текущей ЭОЛЦ. Если выход ОЛЦ достигнут, то $y_0 = 0$. При этом адрес входа следующей ЭОЛЦ формируется схемой САМ. При достижении окончания микропрограммы формируется сигнал u_E , триггер ТВ обнуляется, и выборка микрокоманд прекращается.

Число LUT-элементов в схеме САМ зависит от числа аргументов и термов в системе (5). В настоящей работе предлагается метод, позволяющий уменьшить сложность функций в системе (5) и, следовательно, уменьшить аппаратные затраты в схеме САМ.

Основная идея предлагаемого метода

Пусть ЭОЛЦ $\alpha_g \in C_1$, если O_g не связан с конечной вершиной ГСА Г. Найдем разбиение $\Pi_C = \{V_1, \dots, V_i\}$ множества C_1 на классы псевдоэквивалентных ЭОЛЦ (ПЭОЛЦ). Выполним кодирование $\alpha_g \in C$ так, чтобы максимально возможное число классов $V_i \in \Pi_C$, где $|\Pi_C| = I$, представлялось одним обобщенным интервалом R_1 -мерного булева пространства. Пусть n_i – число обобщенных интервалов, представляющих класс. Представим множество Π_C в виде $\Pi_C = \Pi_A \cup \Pi_B$. При этом множества Π_A и Π_B строятся следующим образом:

$$\begin{aligned} (n_i = 1) &\rightarrow V_i \in \Pi_A, \\ (n_i > 1) &\rightarrow V_i \in \Pi_B. \end{aligned} \quad (7)$$

Источником кодов классов $V_i \in \Pi_A$ является регистр R_g . При этом код класса $V_i \in \Pi_A$ определяется соответствующим интервалом R_1 -мерного булева пространства.

Закодируем классы $V_i \in \Pi_B$ двоичными кодами $S(V_i)$ разрядности

$$R_3 = \lceil \log_2 (|\Pi_B| + 1) \rceil. \quad (8)$$

Используем для кодирования классов $V_i \in \Pi_B$ переменные из множества $Z = \{z_1, \dots, z_{R_3}\}$. Для формирования кодов $S(V_i)$ необходим блок преобразователя кодов (БПК). Этот блок реализует систему функций

$$Z = Z(\tau). \quad (9)$$

В этом случае для реализации схемы устройства управления предлагается модель КМУУ U_2 (рис. 2).

Эта модель имеет ряд отличий от модели U_1 . Во-первых, блок САМ разделен на два блока. Блок САМ₁ реализует переходы, определяемые множеством Π_B , а блок САМ₂ – множеством Π_A . Мультиплексор МИК служит для выбора источника кодов, используя переменную E_x . Значение

переменной E_x определяется состоянием триггера ТМ, управляемого дополнительной переменной u_M . Блок БПК является источником кодов классов для схемы САМ₁. Источниками кодов для схемы САМ₂ является регистр Рг. Предлагаемое КМУУ функционирует следующим образом.

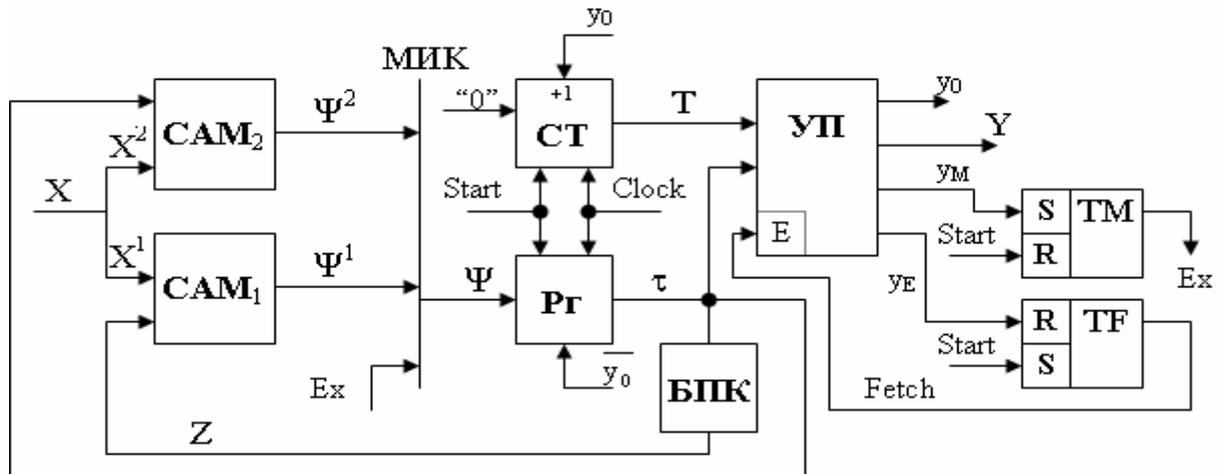


Рисунок 2 – Структурная схема КМУУ U_2

По сигналу Start в Рг и СТ заносятся нулевые коды (адрес первой микрокоманды), а триггера ТФ и ТМ устанавливаются соответственно в “1” (Fetch = 1) и “0” ($E_x = 0$). Пока адрес входа не достигнут, то U_2 функционирует как U_1 . При достижении адреса выхода ЭОЛЦ $\alpha_g \in B_i$ может формироваться переменная $u_M = 1$. В этом случае $E_x = 1$ и адрес перехода формируется схемой САМ₁. Для этого формируется система функций:

$$\Psi^1 = \Psi^1(Z, X^1). \quad (10)$$

Если $B_i \in P_A$, то переменная u_M не формируется. При этом $E_x = 0$ и адрес перехода определяется схемой САМ₂. Для этого формируется система функций:

$$\Psi^2 = \Psi^2(\tau, X^2). \quad (11)$$

Соответствующие функции передаются на выход МИК и требуемый код $K(\alpha_g)$ загружается в Рг. Функционирование продолжается обычным образом до формирования переменной u_E (достижение окончания алгоритма управления).

Такой подход позволяет уменьшить число термов в системе (5) до абсолютного минимума. При выполнении условия

$$R_3 < R_1 \quad (12)$$

уменьшается число аргументов в системе (10) по сравнению с соответствующими функциями из системы (5). Недостатками данного подхода является наличие блоков МИК и БПК, потребляющими некоторые ресурсы кристалла, и увеличение на 1 разрядности слов УП. Однако, схема

МИК реализуется за счет использования тристабильных выходов макроячеек, поэтому дополнительных LUT-элементов не требуется. Блок УП реализуется на реконфигурируемых блоках памяти ЕМВ (embedded memory block) [5,6]. Эти блоки имеют строго определенное число выходов, входящих в множество $\{1, 2, 4, 8, 18, 36\}$. При этом имеется высокая вероятность наличие неиспользованных выходов блоков ЕМВ, входящих в состав УП устройства U_1 .

Очевидно, применение предложенного метода имеет смысл, если число LUT-элементов в блоке БПК будет значительно меньше параметра Δ_{LUT} . Параметр Δ_{LUT} определяется разностью числа LUT-элементов в блоке САМ и блоках САМ₁ и САМ₂.

Особенности реализации схемы КМУУ U_2

В настоящей работе предлагается метод синтеза КМУУ U_2 , включающий следующие этапы:

1. Формирование для ГСА Γ множеств C , C_1 , и P_C .
2. Оптимальное кодирование ЭОЛЦ $\alpha_g \in C_1$ и кодирование компонент ЭОЛЦ.
3. Формирование множеств P_A и P_B .
4. Кодирование классов $V_i \in P_B$ кодами $C(V_i)$.
5. Формирование таблицы переходов для классов $V_i \in P_A$.
6. Формирование таблицы переходов для классов $V_i \in P_B$.
7. Формирование содержимого управляющей памяти.
8. Формирование таблицы истинности блока БПК.
9. Синтез схемы КМУУ в заданном базисе.

Этапы 1-4 выполняются по известным методикам [1-3]. Этап 9 связан с разработкой VHDL-моделей КМУУ и использованием стандартных промышленных пакетов [6,7]. Эти этапы не представляют особого интереса для иллюстрации синтеза схемы КМУУ U_2 . В этой связи мы не рассматриваем данные этапы в нашей статье.

Пусть для некоторой ГСА Γ_1 получено множество ЭОЛЦ $C = \{\alpha_1, \dots, \alpha_{16}\}$ и разбиение $P_C = \{V_1, \dots, V_7\}$. При этом $\alpha_{16} \notin C_1$, а классы $V_i \in P_C$ определяются следующим образом: $V_1 = \{\alpha_1\}$, $V_2 = \{\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}$, $V_3 = \{\alpha_5, \alpha_6\}$, $V_4 = \{\alpha_7, \alpha_8, \alpha_9\}$, $V_5 = \{\alpha_{10}, \alpha_{11}\}$, $V_6 = \{\alpha_{12}\}$, $V_7 = \{\alpha_{13}, \alpha_{14}, \alpha_{15}\}$. Итак, $G = 16$, $R_1 = 4$, $\tau = \{\tau_1, \dots, \tau_4\}$.

Оптимальное кодирование ЭОЛЦ $\alpha_g \in C_1$ выполняется так, чтобы максимально возможное число классов $V_i \in P_C$ представлялось одним интервалом R_1 -мерного булева пространства [1]. Один из вариантов кодирования представлен на рис. 3.

		$\tau_3\tau_4$			
		00	01	11	10
$\tau_1\tau_2$	00	α_1	α_2	α_3	α_4
	01	α_5	α_6	α_{10}	α_{11}
	11	α_7	α_8	α_9	α_{16}
	10	α_{13}	α_{14}	α_{15}	α_{12}

Рисунок 3 – Коды ЭОЛЦ $\alpha_g \in C$

Из карты Карно (рис. 3) можно получить следующие интервалы, определяющие классы $V_i \in \Pi_C$. Класс V_1 определяется интервалом 0000; класс V_2 – интервалами 00*1 и 001*; класс V_3 – интервалом 010*; класс V_4 – интервалами 110* и 11*1; класс V_5 – интервалом 011*; класс V_6 – интервалом 1010; класс V_7 – интервалами 100* и 10*1. Таким образом, $\Pi_A = \{V_1, V_3, V_5, V_6\}$, где $K(V_1) = 0000$, $K(V_3) = 010^*$, $K(V_5) = 011^*$ и $K(V_6) = 1010$. Очевидно, $\Pi_B = \{V_2, V_4, V_7\}$ и для их кодирования необходимо $R_3 = 2$ разряда. Итак, $Z = \{z_1, z_2\}$. Закодируем классы $V_i \in \Pi_B$ следующим образом: $C(V_2) = 00$, $C(V_4) = 01$, $C(V_7) = 10$.

Таблица переходов формируется на основе обобщённых формул переходов [1]. Пусть, например, из ГСА Γ_1 можно получить следующие формулы:

$$V_1 \rightarrow x_1 b_3 \vee \overline{x_1 x_2} b_8 \vee \overline{x_1 x_2} b_{12}; \quad (13)$$

$$V_2 \rightarrow x_4 b_{12} \vee \overline{x_4} b_{17}.$$

Столбцы таблицы переходов включают следующую информацию: исходный класс (столбец V_i); код класса (для Π_A это код $K(V_i)$, а для Π_B – $C(V_i)$); адрес перехода ($A(b_q)$); логические условия определяющие переход (столбец X_h); функции возбуждения триггеров регистра Rg (столбец Ψ_h^1 для Π_B и Ψ_h^2 для Π_A); номер перехода (столбец h).

Пусть $A(b_3) = 000100$, $A(b_8) = 001000$, $A(b_{12}) = 010101$, $A(b_{17}) = 110010$. Тогда фрагменты таблиц переходов для формул (13) приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1. Таблица переходов для класса $V_1 \in \Pi_A$

V_i	$K(V_i)$	$A(b_q)$	X_h	Ψ_h^2	h
V_1	0000	000100	x_1	D_4	1
		001000	$\overline{x_1 x_2}$	D_3	2
		010101	$\overline{x_1 x_2}$	$D_2 D_4$	3

Таблица 2. Таблица переходов для класса $V_2 \in \Pi_B$

V_i	$C(V_i)$	$A(b_q)$	X_h	Ψ_h^1	h
V_2	00	010101	x_4	D_2D_4	1
		110010	$\overline{x_4}$	D_1D_2	2

Система (10) может быть получена из таблицы переходов для классов $V_i \in \Pi_B$. Так, из табл. 2 имеем, например $D_1 = z_1 z_2 x_4$. Система (11) может быть получена из таблицы переходов для классов $V_i \in \Pi_A$. Так, из табл. 1, имеем, например, $D_2 = \overline{\tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4} x_1 x_2$.

Таблица БПК имеет столбцы: V_i , $K(V_i)_j$, $C(V_i)$, Z_h , h . Здесь $K(V_i)_j$ – код класса V_i , соответствующий одному из обобщенных интервалов; Z_h – разряды кода $C(V_i)$, принимающие единичное значение в h -й строке таблицы. Для рассматриваемого примера, число строк $N_{\text{ПК}} = 6$. Этот параметр определяется суммарным числом интервалов, представляющих коды классов $V_i \in \Pi_B$. Для рассматриваемого примера блок БПК представлен в табл. 3.

Таблица 3. Таблица блока преобразователя адреса

V_i	$K(V_i)_j$	$C(V_i)$	Z_h	h
V_2	00*1	00	–	1
	001*		–	2
V_4	110*	01	z_2	3
	11*1		z_2	4
V_7	100*	10	z_1	5
	10*1		z_1	6

Из табл. 3 имеем систему (9): $z_1 = \overline{\tau_1 \tau_2 \tau_3} \vee \overline{\tau_1 \tau_2 \tau_4}$; $z_2 = \overline{\tau_1 \tau_2 \tau_3} \vee \tau_1 \tau_2 \tau_4$. Остальные этапы синтеза реализуются тривиальным образом и в нашей статье не рассматриваются.

Заключение

Предлагаемый в работе метод оптимизации КМУУ основан на мультиплексировании двух источников кодов классов псевдоэквивалентных ЭОЛЦ. Такой подход позволяет гарантированно уменьшить число термов в системе функций возбуждения триггеров регистра и счетчика адресов микрокоманд до максимально возможной величины. Если КМУУ с элементарными цепями рассматривать как автомат Мура, то предлагаемый подход позволяет уменьшить число термов до величины этого параметра у эквивалентного автомата Мили. Кроме того, уменьшается число LUT-элементов в схеме преобразователя

кодов, так как не все адреса выходов ЭОЛЦ подлежат преобразованию.

Недостатком предложенного подхода является введение мультиплексора, который вносит дополнительную задержку в цикл работы КМУУ. Однако уменьшение числа термов ведёт к уменьшению числа уровней в схеме и задержка от введения МИК компенсируется. Проведенные авторами исследования показали, что предложенный метод позволяет до 38% уменьшить число LUT-элементов по отношению к исходному КМУУ. При этом время цикла КМУУ U_2 всегда было меньше, чем у КМУУ U_1 .

Научная новизна предложенного метода заключается в использовании особенностей КМУУ (наличие классов псевдоэквивалентных ЭОЛЦ) для уменьшения числа LUT-элементов в схеме КМУУ с элементарными цепями.

Практическая значимость метода заключается в уменьшении площади кристалла FPGA, занимаемой схемой КМУУ, что позволяет получить схемы, обладающие меньшей стоимостью, чем известные из литературы аналоги.

Список литературы

1. Barkalov A. Logic synthesis for compositional microprogram control units / A. Barkalov, L. Titarenko. – Berlin: Springer, 2008. – 272 P.
2. Баркалов А.А. Синтез микропрограммных автоматов на заказных и программируемых СБИС / А.А. Баркалов, Л.А. Титаренко. – Донецк: УНИТЕХ, 2009.— 336 с.
3. Barkalov A. Logic synthesis for FSM-based control units / A. Barkalov, L. Titarenko. – Berlin: Springer, 2009. – 233 P.
4. Maxfield S. The Design Warrior's Guide to FPGAs / Maxfield S.. – Amsterdam: Elsevier, 2004. – 541 p.
5. Грушвицкий Р.И. Проектирование систем на микросхемах с программируемой структурой / Р.И. Грушвицкий, А.Х. Мурсаев, Е.П. Угрюмов. – СПб: БХВ – Петербург, 2006. – 736 с.
6. FPGA, CPLD, and EPP Solutions from Xilinx, Inc. [Электронный ресурс] – Режим доступа: xilinx.com.
7. FPGA CPLD and ASIC from Altera. [Электронный ресурс] – Режим доступа: altera.com.
8. Baranov S. Logic and System Design of Digital Systems / S. Baranov. - Tallinn: TTU, 2008. - 266 p.
9. Оптимизация схемы КМУУ с преобразователем адреса микрокоманд / А.А. Баркалов, Л.А. Титаренко, К.Н. Ефименко и др. // Наукові праці ДонНТУ. Серія „Проблеми моделювання та автоматизації проектування” (МАП-2011). – 2011. – Вип. 9 (179). – С.26-35.

Надійшла до редакції 07.09.2011.

Рецензент: канд. техн. наук, доц. Зеленева И.Я.

О.О. Баркалов¹, Л.О. Титаренко¹, К.М. Єфіменко²

Університет Зеленогурський (Польща)¹, Донецький національний технічний університет²

Оптимізація схеми КМПК із елементарними ланцюгами. В роботі запропоновано метод зменшення апаратних витрат у схемі КМПК із елементарними ланцюгами, який орієнтовано на технологію FPGA. Метод засновано на використанні двох джерел кодів класів псевдоеквівалентних ЕОЛЛ та мультиплексу, який дозволяє вибрати одне з цих джерел. Такій підхід дозволить зменшити число LUT елементів у схемі адресації КМПК. Наведено приклад використання запропонованого методу.

Ключові слова: КМПК, ГСА, ЕОЛЛ, FPGA, логічна схема.

A.A. Barkalov¹, L.A. Titarenko¹, K.N. Efimenko²

University of Zielona góra (Poland)¹, Donetsk National Technical University²

Optimization of Circuit for CMCU with Elementary Chains. A method for reducing the hardware amount in the circuit of CMCU with elementary chains is proposed oriented on FPGA technology. The method is based on the use of two sources of codes classes of pseudoequivalent EOLC and a multiplexer to choose one of these sources. Such an approach would reduce the number of LUT elements in the addressing circuit of CMCU. An example of the proposed method application is given.

Keywords: CMCU, GSA, EOLC, FPGA, logic circuit.