

УДК 681:324

Р.М. Бабаков, канд. техн. наук, доц.,  
И.В. Ярош, ассистент  
Донецкий национальный технический университет, г. Красноармейск  
cpld@mail.ru

## Формирование кодов операций переходов в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов

*В статье предлагаются два подхода к формированию кодов операций переходов в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. Данные способы вносят ряд особенностей в структурную организацию и методику синтеза данного класса микропрограммных автоматов, позволяя при определенных условиях снизить аппаратные затраты в логической схеме устройства.*

**Ключевые слова:** микропрограммный автомат, операция переходов, операционный автомат переходов, схема формирования кодов операций переходов, аппаратные затраты.

### Введение

Важной составной частью современных вычислительных систем является устройство управления, координирующее работу всех узлов системы. Одним из способов реализации устройства управления является микропрограммный автомат (МПА), схема которого характеризуется относительно высоким быстродействием при значительных затратах аппаратуры [1, 2]. Наблюдаемая сегодня тенденция к росту сложности алгоритмов, интерпретируемых МПА, актуализирует задачу снижения аппаратных затрат, одним из решений которой является разработка новых структур и методов синтеза МПА.

В работах [3-6] предлагается структура МПА, схема формирования переходов (СФП) которого организована в виде операционного автомата, называемого операционным автоматом переходов (ОАП). МПА с ОАП предполагает использование в своей структуре специальной схемы формирования кодов операций, выполняемых ОАП для преобразования кодов состояний. Вопросы организации схемы формирования кодов микроопераций на сегодняшний день являются неисследованными. В настоящей работе предлагаются два способа организации данной схемы, основанные на задании ее функции от двух различных наборов аргументов.

### Привязка кодов операций к автоматным переходам

Структурная схема МПА с ОАП изображена на рис. 1 и функционирует аналогично структуре, рассмотренной в [3]. Роль схемы формирования кодов состояний здесь выполняет Z-подсхема, формирующая код  $Z$ , поступающий в операционную часть (ОЧ) и определяющий опе-

рацию, выполняемую в текущем такте над кодом состояния  $T$  и логическими условиями  $X$ . Блок ОЧ формирует код следующего состояния  $d$ , поступающий в регистр памяти (РП). На выходе схемы формирования микроопераций (СФМО) формируется множество микроопераций  $Y$ , поступающее в объект управления. Наличие связи, показанной пунктиром, позволяет считать данную структуру автоматом Мили, отсутствие данной связи – автоматом Мура. В соответствии с [3-5], блоки ОЧ и РП образуют операционный автомат переходов.

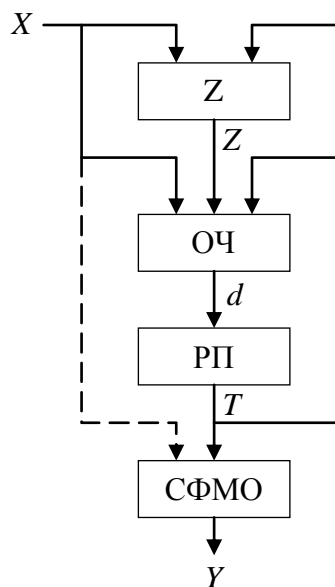


Рисунок 1 – Структурная схема МПА с ОАП

В данной структуре Z-подсхема реализует функцию

$$Z = Z(T, X) \quad (1)$$

и может быть задана таблицей истинности, включающей следующие столбцы:

$T_1, \dots, T_R$  – код текущего состояния;

$x_1, \dots, x_L$  – множество сигналов логических условий;

$z_1, \dots, z_{R_Z}$  – множество сигналов кода операции переходов.

По таблице истинности формируется система канонический уравнений вида

$$\begin{cases} z_1 = z_1(T_1, \dots, T_R, x_1, \dots, x_L); \\ z_2 = z_2(T_1, \dots, T_R, x_1, \dots, x_L); \\ \dots \\ z_{R_Z} = z_{R_Z}(T_1, \dots, T_R, x_1, \dots, x_L). \end{cases} \quad (2)$$

Данная система по формальным параметрам схожа с системой канонических уравнений, используемой для построения схемы формирования переходов (СФП) при каноническом методе структурного синтеза микропрограммного автомата [1, 2]. Для обеих систем количество термов в каждом уравнении (без учета минимизации) равно количеству  $B$  переходов автомата, однако количество уравнений в системах в общем случае различно. Зависимость кода  $Z$  от текущего состояния и логических условий позволяет сопоставлять отдельную операцию перехода (ОП) каждому переходу автомата. Преимуществом такого подхода является возможность «гибкого» использования ОП: при наличии для состояния  $a_i$  нескольких исходящих условных переходов каждому переходу сопоставляется своя ОП независимо от других исходящих переходов. Будем называть подобный подход привязкой кодов ОП к автоматным переходам.

Рассмотрим пример. Пусть МПА Мура задан граф-схемой алгоритма (ГСА)  $\Gamma_1$ , изображенной на рис. 2. Поскольку в данной работе рассматривается только функция переходов МПА без учета функции выходов, содержимое операторных вершин на рис. 2 не показано и может быть произвольным.

Не вдаваясь в способ выбора, определим следующие операции переходов:

$$O_1: K(a^{t+1}) = (K(a^t) + 12) \text{ mod } 16. \quad (3)$$

$$O_2: K(a^{t+1}) = K(a^t) / 2. \quad (4)$$

Здесь  $K(a^{t+1})$  – код следующего состояния,

$K(a^t)$  – код текущего состояния, «mod 16» – операция взятия остатка от целочисленного деления на 16.

Пусть коды состояний заданы так, как показано в табл. 1 ( $K_{10}(a)$  – десятичное значение кода  $K(a)$ ,  $K_2(a)$  – его двоичное значение разрядности  $R=4$ ).

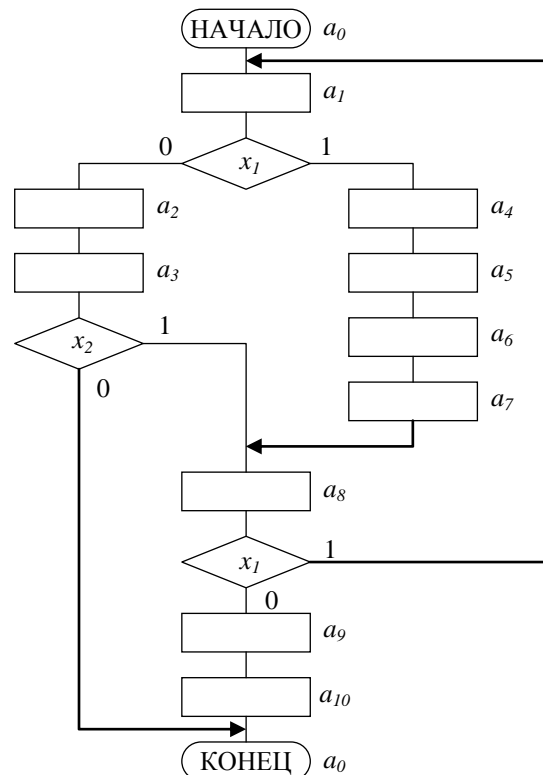


Рисунок 2 – Граф-схема алгоритма  $\Gamma_1$

Таблица 1 – Кодирование состояний ГСА  $\Gamma_1$

$a_i$	$K_{10}(a_i)$	$K_2(a_i)$	$a_i$	$K_{10}(a_i)$	$K_2(a_i)$
$a_0$	3	0011	$a_6$	8	1000
$a_1$	1	0001	$a_7$	4	0100
$a_2$	13	1101	$a_8$	2	0010
$a_3$	6	0110	$a_9$	14	1110
$a_4$	0	0000	$a_{10}$	7	0111
$a_5$	12	1100			

При выбранных кодах состояний и операциях переходов операционный автомат переходов может преобразовывать коды состояний в соответствии с ГСА  $\Gamma_1$  лишь в том случае, если операции переходов сопоставлены переходам автомата так, как показано в табл. 2. Назовем данную таблицу *операционной таблицей переходов*.

Таблица 2 – Операционная таблица переходов ( $\Gamma_1$ )

$a_i$	$X$	$O_j$	$a_i$	$X$	$O_j$
$a_0$	1	$O_2$	$a_5$	1	$O_1$
$a_1$	$x_1$	$O_2$	$a_6$	1	$O_1$
$a_1$	$\bar{x}_1$	$O_1$	$a_7$	1	$O_2$
$a_2$	1	$O_2$	$a_8$	$x_1$	$O_2$
$a_3$	$x_2$	$O_1$	$a_8$	$\bar{x}_1$	$O_1$
$a_3$	$\bar{x}_2$	$O_2$	$a_9$	1	$O_2$
$a_4$	1	$O_1$	$a_{10}$	1	$O_1$

Поясним таблицу 2. Переход из состояния  $a_3$  по условию  $x_2$  выполняется с помощью ОП  $O_1$ . При этом код  $K(a_3)=6_{10}=0110_2$  увеличивается на 12, после чего от результата, в соответствии с «mod 16», берутся младшие четыре разряда. Получаемый результат  $0010_2=2_{10}$  соответствует коду состояния  $a_8$ , являющемуся, в данном случае, состоянием перехода.

Реализация всех переходов ГСА  $\Gamma_1$  посредством выбранных ОП и кодов состояний графически показана на рис. 3, где операторные вершины содержат коды состояний, а ветви переходов отмечены операциями, сопоставленными этим переходам.

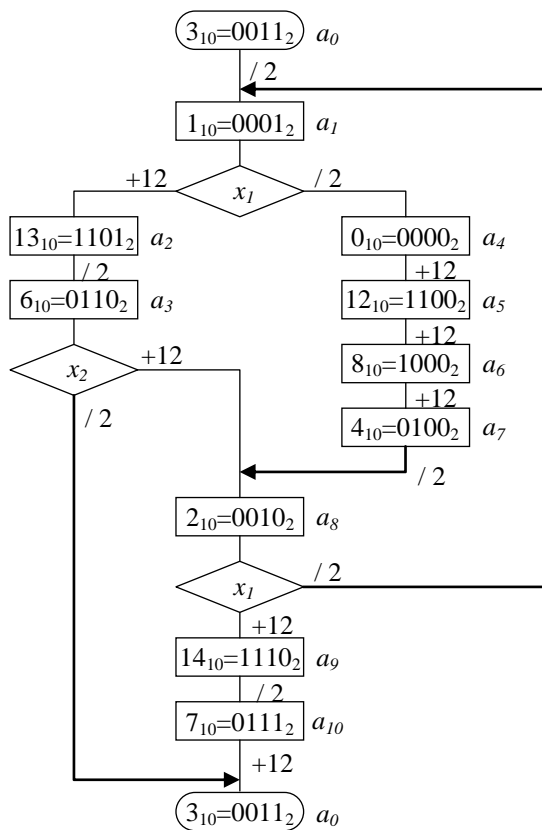


Рисунок 3 – Графическое представление реализации переходов ГСА  $\Gamma_1$

Закодируем операции  $O_1$  и  $O_2$  одноразрядным двоичным кодом  $Z=\langle z_i \rangle$ . Пусть  $K(O_1)=0$ ,  $K(O_2)=1$ . Тогда, заменяя в табл. 2 столбец « $a_i$ » на столбец  $K_2(a_i)$  и столбец « $O_i$ » на « $z_i$ », получим таблицу истинности для Z-подсхемы, соответствующей рассматриваемому примеру (табл. 3).

Функция и схема для формирования сигнала  $z_i$  строятся по табл. 3 известным способом [2]. При этом следует полагать, что, согласно табл. 1, код  $T$  текущего состояния есть вектор четырех двоичных переменных  $\langle T_1, T_2, T_3, T_4 \rangle$ .

Таблица 3 – Таблица истинности Z-подсхемы ( $\Gamma_1$ )

$T_j-T_4$	$X$	$z_i$	$T_j-T_4$	$X$	$z_i$
0011	1	1	1100	1	0
0001	$x_1$	1	1000	1	0
0001	$\bar{x}_1$	0	0100	1	1
1101	1	1	0010	$x_1$	1
0110	$x_2$	0	0010	$\bar{x}_1$	0
0110	$\bar{x}_2$	1	1110	1	1
0000	1	0	0111	1	0

### Привязка кодов операций к состояниям автомата

При синтезе ОАП теоретически допустим случай, когда каждый автоматный переход реализуется отдельной операцией переходов, т.е.  $N_{OП} = B$ . В этом случае блок ОЧ будет состоять из  $B$  комбинационных схем, для мультиплексирования которых требуется двоичный код разрядности  $R_Z = \log_2 B$ . Поскольку при наличии в ГСА хотя бы одной условной вершины количество переходов  $B$  всегда больше числа состояний  $M$ , в случае  $R_Z = \log_2 B$  величина  $R_Z$  может оказаться больше разрядности  $R$  кода состояния.

Большее число уравнений в системе (2) по сравнению с системой канонических уравнений схемы формирования переходов канонического МПА при одинаковом (без учета минимизации) числе термов приводит к тому, что затраты аппаратуры в одной лишь Z-подсхеме оказываются выше, чем затраты в схеме формирования переходов канонического автомата. Если к затратам в Z-подсхеме добавить затраты в блоке ОЧ, содержащем (при  $N_{OП} = B$ ) максимально возможное количество комбинационных схем и мультиплексор соответствующей сложности, то можно утверждать, что при  $R_Z > R$  использование МПА с ОАП нецелесообразно, поскольку аппаратные затраты в его схеме будут выше, чем в МПА с канонической структурой.

Также нецелесообразность использования МПА с ОАП прогнозируема в случае  $R_Z = R$ . При равном количестве уравнений в системах (2) и системе функций переходов канонического МПА аппаратные затраты в Z-подсхеме будут соизмеримы с затратами в схеме СФП канонического автомата, однако добавление к ним затрат в схеме блока ОЧ оставляет МПА с ОАП в проигрыше.

Таким образом, при синтезе Z-подсхемы по системе уравнений (2) выигрыш по аппаратурным затратам в схеме МПА с ОАП по сравнению с каноническим автоматом возможен лишь при выполнении условия

$$R_Z < R. \tag{5}$$

Данное условие не является достаточным, поскольку не учитывает затраты аппаратуры в схеме блока ОЧ. Обозначим через  $H_Z$  численно выраженные затраты аппаратуры в Z-подсхеме, через  $H_{OЧ}$ ,  $H_{РП}$ ,  $H_{СФП}$ ,  $H_{СФМО}$  – затраты соответственно в блоках ОЧ, РП, СФП и СФМО. Полагая, что для канонического МПА и МПА с ОАП значения  $H_{СФМО}$  и  $H_{РП}$  одинаковы, получаем следующее общее условие, обеспечивающее преимущество МПА с ОАП перед МПА с канонической структурой по критерию аппаратурных затрат:

$$H_Z + H_{OЧ} < H_{СФП}. \tag{6}$$

Снижение аппаратурных затрат в Z-подсхеме возможно за счет уменьшения числа ее входов. Исключим из уравнений системы (2) аргументы  $x_i$ , в результате чего получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} z_1 = z_1(T_1, \dots, T_R); \\ z_2 = z_2(T_1, \dots, T_R); \\ \dots \\ z_{R_Z} = z_{R_Z}(T_1, \dots, T_R). \end{cases} \tag{7}$$

В данной системе код  $Z = \langle z_1, \dots, z_{R_Z} \rangle$  операции перехода формируется на основании только кода текущего состояния автомата. Если в случае системы (2) операция переходов ставится в соответствие отдельному переходу автомата, то в случае (7) операция переходов сопоставляется отдельному состоянию автомата независимо от того, сколько переходов существует из данного состояния.

Структура МПА с ОАП, изображенная на рис. 1, в случае построения Z-подсхемы по системе (7), принимает вид рис. 4. То, что сигналы X не поступают на вход Z-подсхемы, помимо прочего делает возможным ее реализацию в базисе запоминающих устройств (ПЗУ, ППЗУ).

Рассмотрим пример, подтверждающий возможность данного подхода. Пусть автомат задан ГСА  $G_2$ , изображенной на рис. 5.

Закодируем состояния  $a_0$ - $a_5$  так, как показано в табл. 4. Зададим следующие операции переходов:

$$O_1: K_I(a^{t+1}) = K_I(a^{t+1}) + 2. \tag{8}$$

$$O_2: K_I(a^{t+1}) = K_I(a^t) \times 2. \tag{9}$$

$$O_3: K_I(a^{t+1}) = \begin{cases} K_I(a^t) \times 2 + 3, & \text{если } x_1 = 0; \\ K_I(a^t) + 3, & \text{если } x_1 = 1. \end{cases} \tag{10}$$

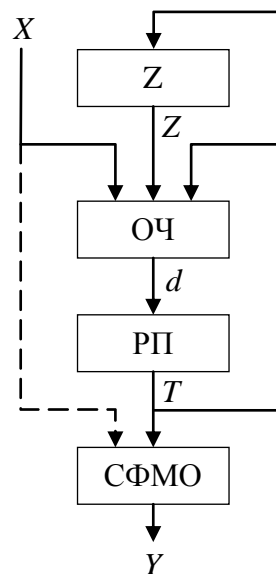


Рисунок 4 – Структурная схема МПА с ОАП при сопоставлении операций переходов состояниям автомата

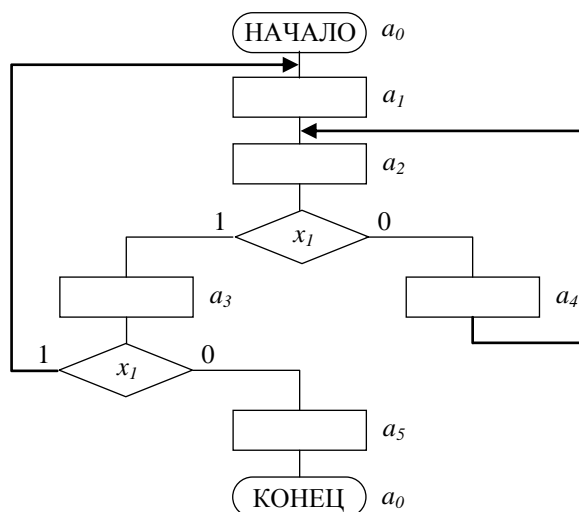


Рисунок 5 – Граф-схема алгоритма  $G_2$

Таблица 4 – Кодирование состояний ГСА  $G_2$

$a_i$	$K_{10}(a_i)$	$K_2(a_i)$
$a_0$	2	010
$a_1$	4	100
$a_2$	6	110
$a_3$	1	001
$a_4$	7	111
$a_5$	5	101

Также будем полагать, что результат каждой ОП всегда приводится к диапазону  $[0, 7]$ , что математически выражается операцией «mod 8». При схемной реализации операций переходов

действие «mod 8» реализуется автоматически при условии, что все функциональные узлы (умножения, сложения и пр.) строятся из расчета обработки трехразрядных двоичных кодов.

Сопоставим каждому состоянию автомата одну из операций переходов так, как показано в табл. 5. Для структуры МПА с ОАП, изображенной на рис. 4, данная таблица является операционной таблицей переходов

Таблица 5 – Операционная таблица переходов ( $\Gamma_2$ )

$a_i$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$O_j$	$O_1$	$O_1$	$O_3$	$O_3$	$O_2$	$O_2$

Подобное сопоставление позволяет реализовать все автоматные переходы, содержащиеся в ГСА  $\Gamma_2$ , посредством ОП  $O_1$ - $O_3$ , что иллюстрирует рис. 6. Например, переход из  $a_4$  в  $a_2$  выполняется путем умножения на 2 кода  $K_2(a_4)=111$  с последующим отбрасыванием старшего разряда результата умножения. Очевидно, что при этом будет получен требуемый структурный код  $K_2(a_2)=110$ .

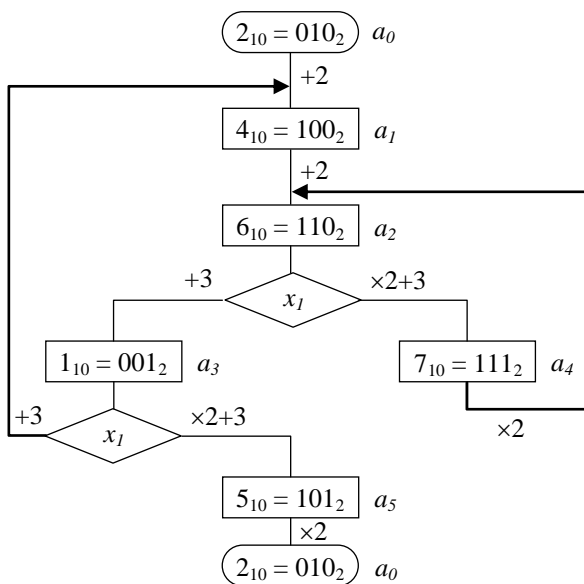


Рисунок 6 – Графическое представление реализации переходов ГСА  $\Gamma_2$

Закодируем операции переходов  $O_1$ - $O_3$  двоичными кодами  $Z=\langle z_1, z_2 \rangle$  следующим образом:  $K(O_1)=00$ ,  $K(O_2)=01$ ,  $K(O_3)=10$ . Определяя функцию  $Z$  выражением

$$Z = Z(T), \tag{11}$$

составим таблицу истинности  $Z$ -подсхемы (табл. 6), в которой символы «\*» соответствуют произвольным значениям переменных  $z_1$  и  $z_2$ . Данная таблица может рассматриваться как таблица ЗУ в случае реализации  $Z$ -подсхемы в соответствующем элементном базисе.

Таблица 6 – Таблица истинности  $Z$ -подсхемы ( $\Gamma_2$ )

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

Следует отметить, что исключение сигналов логических условий из системы (2) наряду с упрощением  $Z$ -подсхемы может приводить к таким негативным последствиям, как усложнение и увеличение количества операций переходов, нивелирующим выигрыш по аппаратным затратам в  $Z$ -подсхеме. Так, в рассмотренном примере операция  $O_3$ , используемая для выполнения условных переходов, не может быть разбита на несколько более простых операций, поскольку, в соответствии с выражением (11), состоянию автомата может быть сопоставлена только одна ОП. В то же время, если бы переходы из состояния  $a_3$  выполнялись по другому логическому условию или по нескольким условиям, то состояниям  $a_2$  и  $a_3$  были бы сопоставлены различные ОП, имеющие различные комбинационные схемы в блоке ОЧ и различные коды в  $Z$ -подсхеме.

**Заключение**

Рассмотренные способы организации  $Z$ -подсхемы в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов вызваны тем, что в первом случае операции переходов сопоставляются автоматным переходам, во втором случае – состояниям автомата. Данное различие обуславливает необходимость в разработке для структур, изображенных на рис. 1 и рис. 4, соответствующих методов синтеза.

Также неочевидными являются условия эффективности данных структур при использовании в качестве критерия оптимальности минимума аппаратных затрат. Эти и другие вопросы, связанные с использованием схемы формирования кодов операций переходов, планируется рассмотреть в ходе дальнейших исследований.

**Список использованной литературы**

1. Баранов С.И. Синтез микропрограммных автоматов / С.И. Баранов. – Л.: Энергия, 1979. – 232 с.
2. Майоров С.А., Новиков Г.И. Структура электронных вычислительных машин / С.А. Майоров, Г.И. Новиков. – Л.: Машиностроение, 1979. – 384 с.
3. Баркалов А.А. Операционное формирование кодов состояний в микропрограммных автоматах / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Кибернетика и системный анализ. – 2011. – №2. – С. 21-26.
4. Баркалов А.А. Организация устройств управления с операционной адресацией / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Управляющие системы и машины. – 2008. – №6. – С. 34-39.
5. Баркалов А.А. Организация операционной части в управляющем автомате с операционным автоматом переходов / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». – 2011. – Вип. 21 (183). – С. 149-156.
6. Баркалов А.А. Структурное представление процесса синтеза управляющих автоматов с операционным автоматом переходов / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Управляющие системы и машины. – 2011. – №3. – С. 47-53.

Надійшла до редакції 05.03.2015

**Р.М. Бабаков, І.В. Ярош**

Донецький національний технічний університет, м. Красноармійськ

**ФОРМУВАННЯ КОДІВ ОПЕРАЦІЙ ПЕРЕХОДІВ В МІКРОПРОГРАМНОМУ АВТОМАТІ З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ**

В статті пропонуються два підходи до формування кодів операцій переходів в мікропрограмному автоматі з операційним автоматом переходів. Дані способи вносять деякі особливості в структурну організацію і методику синтезу даного класу мікропрограмних автоматів і дозволяють, за певних умов, знизити апаратні витрати в логічній схемі пристрою.

**Ключові слова:** мікропрограмний автомат, операція переходів, операційний автомат переходів, схема формування кодів операцій переходів, апаратні витрати.

**R.M. Babakov, I.V. Yarosh**

Donetsk National Technical University, Krasnoarmiysk

**FORMING OF CODES OF STATES IN A MICROPROGRAM CONTROL UNIT WITH DATAPATH OF TRANSITIONS**

In this paper, the object of research is a microprogram control unit with datapath of transitions. One of the topical objectives for the development of digital systems is the problem of reducing of hardware expenses in the circuit of control unit. One way of solving this problem is the development of new structures and methods of synthesis of microprogram control units. In described structures, the circuit forming codes of operations of transitions is represented as a set of functional blocks that implement a set of operations of transitions. In such form a circuit of transitions can be considered as a datapath, called here datapath of transitions. Selecting the operation of transitions proceeds in accordance with the code of operation of transitions generated by a special circuit of codes of transitions (Z-subcircuit). In this work two forms for Z-subcircuit are proposed. In the first case the Z-subcircuit receives code of the current state and signals of logical conditions as inputs. This allows comparing the operations of transitions to each transition of the automaton. In the second case, the Z-subcircuit receives only the code of the current state. This allows comparing the operations of transitions to each state of control unit. For the proposed structures examples of synthesis are given. As the input data for synthesis a flow-chart is used. As the function of transitions is in the focus of research, the contents of the operational nodes of flow-chart is indifferent and can be arbitrary. The first example shows that the comparison of operations of transitions with transitions allow the more flexible use of operation transitions with greater hardware expenses in the Z-subcircuit. The second example shows that comparison of operations of transitions with states of control unit leads to complication of the operations of transitions along with reduction in hardware expenses in the Z-subcircuit. So, each of the proposed approaches can help to reduce total hardware expenses in the circuit of the control unit with datapath of transitions. The conditions of the expedience of using each approach are not obvious and require further research.

**Keywords:** microprogram control unit, operation of transitions, datapath of transitions, block of codes of operations of transitions, hardware expenses.