

УДК 683.324

Р.М. Бабаков, канд. техн. наук, доц.
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина
cpld@mail.ru

Формализация операций переходов в управляющем автомате с операционным автоматом переходов

В работе рассматриваются вопросы установления соответствий между операциями переходов и состояниями управляющего автомата с операционным автоматом переходов. Дается формальное представление операций перехода как математических функций с ограниченной областью определения. Установлены сходства и различия между операциями условного и безусловного перехода с точки зрения правил сопоставления операций и состояний автомата. Решение данных вопросов является обязательным шагом на пути разработки методики синтеза данного класса управляющих автоматов.

Ключевые слова: *управляющий автомат, операционный автомат переходов, операция перехода, код состояния автомата.*

Введение

Одним из центральных блоков современных вычислительных систем является устройство управления (УУ), задачей которого является координация работы всех блоков системы [1, 2]. Реализация УУ в виде традиционного автомата с жесткой логикой предполагает представление функций переходов автомата в виде системы булевых уравнений [3]. Недостатком данного подхода является нерегулярность схемы, приводящая к росту аппаратных затрат в схеме устройства при увеличении сложности реализуемого алгоритма управления [4].

В работе [5] предложен подход к реализации переходов между состояниями управляющего автомата (УА) с использованием арифметико-логических операций над двоичным представлением кода состояния. Такой подход позволил организовать схему формирования переходов УА в виде операционного автомата переходов (ОАП), что привело к структуре УА с ОАП [6].

В работе [7] предложен структурный подход к организации процесса синтеза УА с ОАП. При этом требования к операциям перехода (ОП), а также вопросы сопоставления операций перехода состояниям автомата на данный момент не имеют четкой формализации.

В данной статье рассматриваются вопросы математического определения операций условного и безусловного переходов и установления соответствия между операциями перехода и кодами состояний управляющего автомата.

Операции условного и безусловного переходов

Переходы между состояниями управляющего автомата могут быть условными и безусловными. Пусть УА интерпретирует некоторую заданную ГСА G , содержащую M состояний, образующих множество $A = \{a_0, a_1, \dots, a_{M-1}\}$. Каждому состоянию a_i сопоставлен уникальный код $K(a_i) \in K$. Коды состояний представлены в одном из числовых форматов, который выбран разработчиком с учетом заданных критериев оптимизации схемы устройства. Пусть также в ГСА анализируются L различных сигналов логических условий x_1, \dots, x_L , образующих множество X .

Можно утверждать, что какими бы ни были значения кода состояния в текущий момент времени $K(a^t)$ и кода состояния в следующий момент времени $K(a^{t+1})$, всегда возможно подобрать арифметико-логическую операцию, выполняющую преобразование $K(a^t) \rightarrow K(a^{t+1})$, как для безусловных, так и для условных переходов. Данный принцип назван в [5] операционным формированием переходов, а арифметико-логическая операция, выполняющая преобразование $K(a^t) \rightarrow K(a^{t+1})$ – операцией перехода.

Рассмотрим пример использования операций переходов. Пусть задан фрагмент G_1 некоторой ГСА (рис. 1), отмеченный состояниями автомата Мура и содержащий три безусловных и четыре условных перехода. Зададим коды состояний следующим образом: $K(a_1)=7$, $K(a_2)=4$, $K(a_3)=5$, $K(a_4)=11$, $K(a_5)=8$, $K(a_6)=13$. При данных значениях кодов состояний каждому состоянию автомата, из которого выполняется безусловный переход, в рамках данного фрагмента ГСА может

быть поставлена в соответствие следующая операция перехода:

$$K(a^{t+1}) = K(a^t) - 3, \tag{1}$$

а каждому состоянию автомата, из которого выполняются условные переходы, – операция

$$K(a^{t+1}) = \begin{cases} K(a^t) \cdot 2 + 3, & x_1 = 0; \\ K(a^t) \cdot 2 - 3, & x_1 = 1. \end{cases} \tag{2}$$

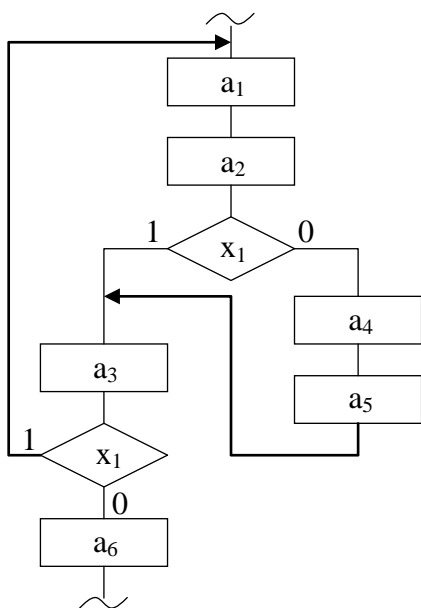


Рисунок 1 – Фрагмент G₁

Фрагмент G₁ с обозначенными кодами состояний и операциями перехода показан на рис. 2.

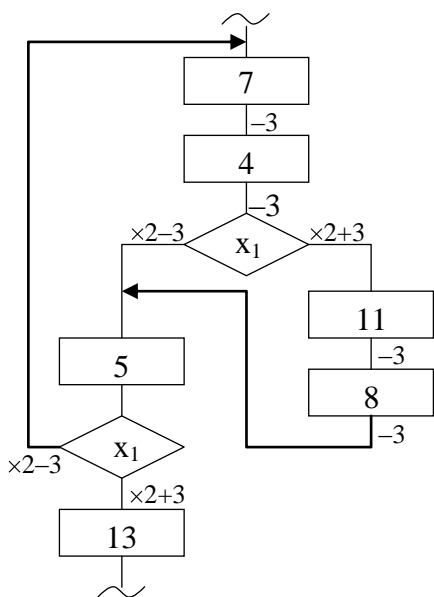


Рисунок 2 – Фрагмент G₁ с выбранными кодами

В случае условного перехода автомат переходит из текущего состояния $a^t \in A$ в одно из возможных состояний перехода a^{t+1} , образующих подмножество $A^{t+1} \subseteq A$. Поскольку любой условный переход в ГСА зависит максимум от L логических условий, то

$$1 < |A^{t+1}| \leq 2^L. \tag{3}$$

В УА с ОАП преобразование кода состояния при условном переходе выполняется с помощью операции условного перехода $O_{УП}$, которая в качестве аргументов использует код текущего состояния $K(a^t) \in K$ и значения логических условий в текущий момент времени X^t :

$$K(a^{t+1}) = O_{УП}(K(a^t), X^t). \tag{4}$$

Операция $O_{УП}$, определяемая выражением (4), является функцией, поскольку каждому набору независимых аргументов $\langle K(a^t), X^t \rangle$ соответствует единственное значение $K(a^{t+1})$. Найдем максимальное количество наборов аргументов, на которых $O_{УП}$ может быть определена. Поскольку все значения $K(a^t)$ принадлежат множеству K мощности M, то количество допустимых для $O_{УП}$ значений $K(a^t)$ не превышает M. Для каждого из M значений $K(a^t)$ значение X^t может быть представлено битовым вектором максимально возможной разрядности L, элементами которого являются значения логических условий x_1, \dots, x_L . Следовательно, аргумент X^t может принимать 2^L различных значений. Тогда максимальное количество различных наборов аргументов (и, соответственно, значений) $N(O_{УП})$ функции $O_{УП}$ не может превышать величины $N(O_{УП})_{max} = M \cdot 2^L$.

Пусть функция $O_{УП}$ задана табличным способом на множестве допустимых наборов аргументов. Таблица функции $O_{УП}$ состоит не более чем из $N(O_{УП})_{max}$ строк и содержит столбцы $K(a^t)$, X^t и $K(a^{t+1})$. Прямая структурная таблица (ПСТ) управляющего автомата содержит, в числе прочих, следующие столбцы [1, 2]:

- a_i – текущее состояние автомата;
- $K(a_i)$ – код текущего состояния;
- a_j – состояние перехода;
- $K(a_j)$ – код состояния перехода;
- X – входной набор логических условий.

Если в ПСТ и таблице $O_{УП}$ существуют строки, для которых $K(a_i) = K(a^t)$, $X = X^t$ и $K(a_j) = K(a^{t+1})$, то такие строки будем называть *эквивалентными*. Поскольку любой набор $\langle K(a^t), X^t \rangle$ встречается в таблице $O_{УП}$ не более одного раза, то для каждой строки ПСТ может быть не более одной эквивалентной строки в таблице операции перехода.

Пусть из состояния a_k выполняется $H(a_k)$ условных переходов, которым в ПСТ соответствуют $H(a_k)$ строк. Если для каждой строки ПСТ, у которой в столбце a_i указано состояние a_k , существует эквивалентная строка в таблице некоторой $O_{УП}$, то данная ОУП может быть поставлена в соответствие состоянию a_k . Соответствие операции перехода $O_{УП}$ состоянию a_k означает, что все условные переходы из a_k могут быть реализованы с помощью данной $O_{УП}$.

В общем случае операция $O_{УП}$ в заданной ГСА может быть сопоставлена более чем одному состоянию (например, операция (1) на рис. 2). Понятно, что коды этих состояний принадлежат области определения операции. С другой стороны, на некоторых кодах состояний $O_{УП}$ может быть не определена. Например, $O_{УП}$, задаваемая следующим выражением:

$$K(a^{t+1}) = \begin{cases} \frac{100}{20 - K(a^t)}, & x_1 = 0; \\ \frac{50 + K(a^t)}{K(a^t)}, & x_1 = 1, \end{cases} \quad (5)$$

не определена для $K(a_i)=20$ и $K(a_i)=0$. Таким образом, с каждой операцией перехода связаны два множества: множество $K_C(O_{УП})$ кодов состояний, которым $O_{УП}$ может быть поставлена в соответствие, и множество $K_D(O_{УП})$ кодов состояний, на которых $O_{УП}$ определена. Данные множества соотносятся друг с другом следующим образом:

$$K_C(O_{УП}) \subseteq K_D(O_{УП}) \subseteq K. \quad (6)$$

Также справедливы следующие отношения:

$$0 < |K_C(O_{УП})| \leq M; \quad (7)$$

$$0 < |K_D(O_{УП})| \leq M; \quad (8)$$

$$|K_C(O_{УП})| \leq |K_D(O_{УП})|. \quad (9)$$

Действительно, при $|K_D(O_{УП})|=0$ данная $O_{УП}$ не может применяться для реализации переходов заданной ГСА, а отношение $|K_D(O_{УП})|<0$ бессмысленно по определению мощности множества. При $|K_C(O_{УП})|=M$ мы имеем дело с сугубо частным случаем, когда данная ОП может быть использована для реализации всех без исключения переходов заданной ГСА.

Важной характеристикой операции условного перехода является величина аппаратных затрат $V(O_{УП})$ в схеме, реализующей данную $O_{УП}$. Безусловно, одна и та же операция может иметь различные схемные реализации, различающиеся затратами аппаратуры, быстродействием,

надежностью, энергопотреблением и т.д. Но в любом случае можно утверждать: чем большему количеству состояний может быть сопоставлена данная ОП, тем меньшее количество различных операций будет использовано в ОАП. Таким образом, увеличение значения $|K_C(O_{УП})|$ при прочих равных условиях способствует снижению аппаратных затрат в схеме ОАП и управляющего автомата в целом.

В случае безусловного перехода множество состояний перехода A^t содержит единственный элемент a^{t+1} , а условие перехода X^t всегда считается истинным. При безусловном переходе преобразование кода состояния в УА с ОАП выполняется с помощью операции безусловного перехода $O_{БП}$, которая в качестве аргумента использует только код текущего состояния автомата $K(a^t) \in K$:

$$K(a^{t+1}) = O_{БП}(K(a^t)). \quad (10)$$

Как и $O_{УП}$, операция $O_{БП}$ является функцией и может быть представлена в табличной форме с числом строк $H(O_{БП})$, причем

$$0 < H(O_{БП}) \leq M. \quad (11)$$

В отличие от $O_{УП}$ таблица операции $O_{БП}$ содержит лишь два столбца: столбец аргументов $K(a^t)$ и столбец значений $K(a^{t+1})$.

Если в ПСТ автомата и таблице $O_{БП}$ существуют строки, для которых $K(a_i)=K(a^t)$ и $K(a_j)=K(a^{t+1})$, они являются эквивалентными. Следует понимать, что поскольку таблица $O_{БП}$ не учитывает значения логических условий, то в ПСТ эквивалентные строки могут соответствовать как безусловным, так и отдельно взятым условным переходам (последние в данном случае не представляют непосредственного интереса).

В случае, если из состояния a_k выполняется безусловный переход, в ПСТ автомата этому состоянию соответствует единственная строка. Если для строки ПСТ, у которой в столбце a_i указано состояние a_k , существует эквивалентная строка в таблице операции $O_{БП}$, то данная ОБП может быть сопоставлена состоянию a_k . Соответствие операции $O_{БП}$ состоянию a_k означает, что безусловный переход из a_k может быть реализован с помощью данной $O_{БП}$.

В общем случае операция безусловного перехода может быть сопоставлена более чем одному состоянию заданной ГСА (например, операция (2) на рис. 2). Множество кодов состояний ГСА, которым соответствует данная $O_{БП}$, обозначим через $K_C(O_{БП})$. Данное множество является подмножеством множества кодов состояний $K_D(O_{БП})$, на которых $O_{БП}$ определена. Таким образом, справедливы следующие отношения:

$$K_C(O_{\text{БП}}) \subseteq K_D(O_{\text{БП}}) \subseteq K. \quad (12)$$

$$0 < |K_C(O_{\text{УП}})| \leq |K_D(O_{\text{УП}})| \leq M. \quad (13)$$

Аппаратурні затрати в схемі $O_{\text{БП}}$ характеризуються величиною $V(O_{\text{БП}})$. Чем більшому кількості состояний може відповідати $O_{\text{БП}}$, тем менше кількість операцій переходу буде використовуватися в схемі ОАП і тем менше затрати апаратури в схемі управляючого автомата.

Сравнивая операції умовного і безумовного переходу, можна знайти між ними ряд сходств, а іменно:

1. Операції умовного і безумовного переходу можуть розглядатися як математическі функції, для котрих кожному набору аргументів відповідає єдине значення.

2. Кількість різних наборів аргументів для $O_{\text{УП}}$ і $O_{\text{БП}}$ являється кінцевою величиною, що дозволяє задавати дані функції в табличному вигляді.

3. На деяких значеннях $K(a')$ операції умовного і безумовного переходу можуть бути не визначені. Якщо операція переходу не визначена на всіх значеннях кодів состояний, то її використання в ОАП неможливо.

4. Будучи поставленою в відповідність деякому состоянию, операція переходу реалізує всі можливі переходи з даного состоянія.

5. Одна і та ж операція переходу може бути поставлена в відповідність більш ніж одному состоянию заданої ГСА.

6. Чем більшому кількості состояний може бути поставлена в відповідність деяка операція, тем менше кількість різних ОП в схемі ОАП. При цьому може бути досягнуто зниження апаратурних затрат в схемі УА.

7. Схема операції переходу (як умовної, так і безумовної), крім затрат апаратури, може характеризуватися такими параметрами, як час спрацювання, енергопотреблення, можливість реалізації на стандартних бібліотечних елементах сучасних ПЛІС і др. Це означає, що на можливість використання тієї чи іншої ОП в складі операційного автомата переходу впливає не тільки кількість состояний, котрим сопоставима дана ОП, але і відповідність її схеми заданим вимогам проектування.

Різниця між умовними і безумовними операціями переходу заключається в кількості аргументів, що видно з виражень (4) і (10), а також в правилах сопоставлення операції переходу состоянням автомата.

Заключення

Операції умовних і безумовних переходу, використовуємі в управляючому автоматі з операційним автоматом переходу, можуть розглядатися як математическі функції, частинно або повністю визначені на множині кодів состояний управляючого автомата. З точки зору проектувальника цифрових пристроїв операція переходу характеризується параметрами логічної схеми, реалізуючої операцію, – апаратурними затратами, швидкістю, надійністю, енергопотребленням і др. Для двох операцій, що мають схожі параметри, більш переважальною вважається та, котра може бути поставлена в відповідність більшому кількості состояний автомата. Предложеною в роботі спосіб сопоставлення операції переходу состоянию автомата може бути положено в основу методу синтезу управляючого автомата з операційним автоматом переходу.

Список літератури

1. Баркалов А.А. Синтез мікропрограмних пристроїв управління / А.А. Баркалов, А.В. Палагін. – К.: ІК НАН України, 1997. – 136 с.
2. Баркалов А.А. Синтез пристроїв управління на програмуємих логічних пристроїх / А.А. Баркалов. – Донець: ДонНТУ, 2002. – 262 с.
3. Глушков В.М. Синтез цифрових автоматів / В.М. Глушков. – Москва: Физматгиз, 1962. – 476 с.
4. Поспелов Д.А. Логіческі методи аналізу і синтезу схем / Д.А. Поспелов. – М.: Сов. радіо, 1974. – 386 с.
5. Баркалов А.А. Організація пристроїв управління з операційною адресацією / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Управляючі системи і машини. – 2008. – №6. – С. 34-39.
6. Баркалов А.А. Операційне формування кодів состояний в мікропрограмних автоматах / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Кібернетика і системний аналіз. – 2011. – №2. – С. 21-26.
7. Баркалов А.А. Структурне представлення процесу синтезу управляючих автоматів з операційним автоматом переходу / А.А. Баркалов, Р.М. Бабаков // Управляючі системи і машини. – 2011. – №3. – С. 47-53.

Надійшла до редакції 09.04.2013

Р.М. БАБАКОВ

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ОПЕРАЦІЙ ПЕРЕХОДІВ В КЕРУЮЧОМУ АВТОМАТІ З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ

В роботі розглядаються питання встановлення відповідностей між операціями переходів і станами керуючого автомата з операційним автоматом переходів. Надається формальне представлення операцій переходу як математичних функцій з обмеженою областю визначення. Встановлені подібності і відмінності між операціями умовного і безумовного переходів з точки зору правил зіставлення операцій та станів автомату. Вирішення даних питань є обов'язковим кроком на шляху розробки методики синтезу даного класу керуючих автоматів.

Ключові слова: керуючий автомат, операційний автомат переходів, операція переходу, код стану автомата.

R.M. BABAKOV

Donetsk National Technical University

FORMALIZATION OF TRANSITIONS OPERATIONS FOR CONTROL AUTOMATON WITH OPERATIONAL AUTOMATON OF TRANSITIONS

In this article the questions of match making between operations of transitions and states of the control automaton with the operational automaton of transitions are considered. Operations of conditional and unconditional transitions are considered. They can be implemented as mathematical functions for which a unique value corresponds to each set of arguments. It is shown that the quantity of various sets of arguments for operations of transition is the finite value that allows setting them in tabular view. For some values of state codes operations of conditional and unconditional transitions can be not defined. If an operation of transition is not defined for each value of state codes its usage in the operational automaton of transitions is impossible. If an operation of transition is put in correspondence to some state it should realize all transitions of the given state which are present in a flow-chart. As the same operation of transition can be put in correspondence to more than one state of the flow-chart, then the greater is the quantity of states, to which this operation of transition can be put in correspondence, the smaller is the number of various operations of transition in the automaton circuit.

Thus, decreasing of hardware expenses can be achieved. The circuit of operation of transition (both conditional and unconditional), besides hardware expenses, can be characterized by such parameters as operation time, power consumption, possibility of realization with standard library units of modern programmable logic devices, etc. It means, that not only the quantity of states, to which the given operation of transition is comparable, influences the possibility of usage of this or that operation of transition as a part of the operational automaton of transitions, but also the correspondence of its circuit to designing requirements. The way of matching an operation of transition to an automaton state offered in this paper can be taken further as the basis for the method of synthesis of a controlling automaton with operational automaton of transitions.

Key words: control automaton, operational automaton of transitions, operation of transition, automaton state code.