БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА. 2006. № (64). С. 64–67 ХНУРЭ

УДК 519.62

Г. Г. Четвериков, М. А. Дмитриева

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОЗНАЧНЫХ ОБРАТИМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Введение

Одной из основных тенденций современного развития вычислительной техники является увеличение интеграции в микроэлектронике, вызвавшее в результате переоценку стоимостей программных и аппаратных средств. Конкретными проявлениями этой тенденции являются: увеличение доли аппаратной реализации стандартных элементов программного обеспечения; построение однородных вычислительных систем с программируемой структурой; интенсивное внедрение микропрограммирования; применение табличной арифметики и групповых вычислений; разработка многозначных структур с высокой степенью распараллеливания [1–3].

В результате это привело к переработке и хранению информации на основе больших интегральных схемах (БИС), применение которых в дальнейшем будет сдерживаться технологическими факторами: ограничением количества выводов с кристалла и приближением размеров элементов к физическим пределам. Технологические ограничения и дальнейший рост объемов информации поставили задачу поиска методов ее уплотнения на качественно новом уровне. Существует мнение, что переход от двузначного представления логических функций к k-значному ($k > 2$) — один из возможных путей увеличения плотности упаковки информации. В связи с этим сейчас ведутся исследования принципов реализации многозначных БИС. В будущем это позволит использовать многозначные БИС в сочетании с существующими БИС. Многозначными называют структуры средств обработки данных, которые построены на базе многозначных логических элементов с соответствующими связями [1, 3].

Первые многозначные элементы появились в начале 60-х годов прошлого века, что вывело k-значную логику из области теоретических исследований: стали развиваться методы синтеза функций k-значной логики. Анализ этих методов (в основном, это методы минимизации) и опыт проектирования схем в k-значном алфавите показывают, что их эффективность зависит от выбора аналитического представления функций и количества одноместных операций в базисе. Несмотря на то, что эти методы являются обобщением точных методов булевой алгебры, они имеют ряд особенностей, связанных с функциональными возможностями k-значных алгебр. И наконец, эти методы не рассчитаны на реализацию в двузначной схемотехнике: на современном этапе существования и развития средств вычислительной техники наблюдается кризис ее архитектуры и принципов функционирования процессора Неймана с использованием исключительно двузначного кодирования.

Очевидно, что на многозначных БИС было бы целесообразно перенести способы функциональной и структурной организации двузначных БИС, основанные на принципах программируемости структуры и конструктивной однородности. Наиболее интересным классом БИС, реализующим эти принципы, являются матричные БИС — программируемые логические матрицы (ПЛМ).

2. Принципы построения многозначных обратимых неоднородных логических элементов

Математической основой построения обратимых переключательных цепей первого и второго рода для многозначных неоднородных кодов на базе предикатно-гибридной логики является алгебра конечных предикатов (АКП). Такие цепи используются при создании устройств распознавания образов, интеллектуальных устройств, в робототехнике, а также при создании систем для автоматической обработки текстовой информации. Другой областью применения таких цепей являются универсальные многозначные функциональные преобразователи пространственного типа. Однако создание многозначных структур и связанные с этим исследования проводились и проводятся, в основном, в направлении реализации цифровых вычислительных структур, машин и систем, использующих многозначное кодирование.

В последнее время предложены принципы построения многозначных элементов (МЭ), ориентированные на использование достижений современной интегральной технологии. Наибольшее распространение получили МЭ, построенные по принципу базиса с преобразованием информационных признаков сигналов. Один класс таких элементов с промежуточным преобразованием информационного признака динамического характера (т. е. каждому символу алфавита ставится в соответствие некоторая непериодическая последовательность) имеет ограниченное применение. Другой класс — с пространственным промежуточным представлением информации (каждому символу алфавита ставится в соответствие особое состояние в одной из точек некоторого пространства) — в большей мере отвечает требованиям вычислительной техники и современных автоматизированных информационных и интеллектуальных систем. При этом в большинстве работ, посвященных разработке методов синтеза цифровых устройств, авторы используют математические аппараты булевой алгебры и многозначной логики. Однако специфика исследования, в качестве которого выступают математические модели естественного языка, указывает на нецелесообразность применения таких аппаратов. Это следует из того, что алгебра логики оперирует с двоичными символами, а аппарат многозначной логики, хотя и направлен на обработку непосредственно буквенной информации, не устраивает нас в силу своей направленности на описание функций, а не отношений. Однако именно отношения являются основным объектом описания естественного языка и его фрагментов.

В качестве основного инструментария математического описания конечных объектов выступает понятие конечного алфавитного оператора (КАО). При этом данное понятие служит хорошим средством для математического описания деятельности интеллекта, то есть тех реакций интеллекта, которые наблюдаются объективно. Правильный выбор же исходной и промежуточных форм представления КАО, с одной стороны, позволяет нам решить задачу построения элементов и устройств с предельным структурным быстродействием, с другой стороны, вооружает нас единообразным и универсальным приемом решения уравнений АКП. Известны различные способы аналитического представления алфавитных операторов. Их целесообразно разбить на два класса: методы явного и неявного способа задания операторов.

Рассмотрим алфавитный оператор вида $y_1 y_2 \dots y_n = g(x_1 x_2 \dots x_m)$, который можно представить в виде канонического уравнения:

$$g(x_1, x_2, \dots x_m, y_1, y_2, \dots, y_n) = 1, \tag{1}$$

при этом

$$g(x_1, \dots x_m, y_1, \dots, y_n) = \begin{cases} 1, \text{ если } y_1 \dots y_n = G(x_1 \dots x_m) \\ 0, \text{ если } y_1 \dots y_n \neq G(x_1 \dots x_m) \end{cases} \tag{2}$$

Это уравнение есть реакция оператора G на входное слова длиной m; результат — выходное слово длиной n. В случае вычисления значения отдельных букв выходного слова $y_1 y_2 \dots y_n$ требуется задать конечные алфавитные операторы $G_1 G_2 \dots G_n$, формирующие отдельные буквы $y_1 y_2 \dots y_n$ выходного слова:

$$\begin{aligned} &y_1 = G_1(x_1, x_2, \dots, x_m), \\ &y_2 = G_2(x_1, x_2, \dots, x_m), \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &y_n = G_n(x_1, x_2, \dots, x_m). \end{aligned} \tag{3}$$

При этом алфавитные операторы G_i $(i = \overline{1, n})$ можно записать также в виде уравнений типа (1):

$$\begin{aligned} &q_1(x_1, x_2, \dots, x_m, y_1) = 1, \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &q_1(x_1, x_2, \dots, x_m, y_1) = 1. \end{aligned} \tag{4}$$

Таким образом, очевидна связь между формулами (1) и (4), которая может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} &g(x_1, x_2, \dots x_m, y_1, y_2, \dots, y_n) = \\ &g_1(x_1, x_2, \dots x_m, y_1) \wedge g_2(x_1, x_2, \dots x_m, y_2) \wedge \dots \\ &\dots \wedge g_n(x_1, x_2, \dots x_m, y_n). \end{aligned} \tag{5}$$

Ограничив область изменения буквенной переменной y значениями $a_1 a_2 \dots a_k$, свяжем ее уравнением:

$$y^{a_1} \vee y^{a_2} \vee \dots \vee y^{a_k} = 1 \tag{6}$$

С учетом такого ограничения любой конечный алфавитный оператор вида $y = Q(x_1 x_2 \dots x_m)$, заданный уравнением

$$q(x_1 x_2 \dots x_m, y) = 1, \tag{7}$$

можно записать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} &q(x_1, x_2, \dots, x_m, a_1) = y^{a_1}, \\ &q(x_1, x_2, \dots, x_m, a_2) = y^{a_2}, \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &q(x_1, x_2, \dots, x_m, a_k) = y^{a_k}. \end{aligned} \tag{8}$$

В силу однозначности алфавитного оператора Q корень уравнения (7) a_i $(1 \le i \le k)$ — единственный.

Тогда очевидно, что уравнение (7) и система уравнений (8) — равносильны. Таким образом, алфавитный оператор Q можно легко представить в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} &q_1(x_1, x_2, \dots, x_m, a_{11}) = y_1^{a_{11}}, \\ &q_1(x_1, x_2, \dots, x_m, a_{12}) = y_1^{a_{12}}, \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &q_1(x_1, x_2, \dots, x_m, a_{1k_1}) = y_1^{a_{1k_1}}, \\ &q_2(x_1, x_2, \dots, x_m, a_{22}) = y_2^{a_{22}}, \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &q_1(x_1, x_2, \dots, x_m, a_{2k_2}) = y_2^{a_{2k_2}}, \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &q_n(x_1, x_2, \dots, x_m, a_{n2}) = y_n^{a_{n2}}. \end{aligned} \tag{9}$$

Здесь области изменения переменных y_i $(i = \overline{1, n})$ ограничены множествами букв $M_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ik_i}\}$, где k_i — количество букв в множестве M_i. Система (9) задает алфавитный оператор G в явной форме и допускает непосредственное вычисление букв входного слова в отличие от формы (1), требующей решения соответствующих уравнений. Задание алфавитного оператора в форме (9) служит отправным моментом при построении многозначных обратимых логических элементов, методы синтеза которых будут подробнее рассмотрены ниже.

Таким образом, для построения быстродействующих многозначных структур и элементов, реализующих конечные отношения, целесообразно использовать предикатно-гибридную логику, математической основой которой является АКП. Последняя обладает возможностью широкого распараллеливания обрабатываемой информации, включая ее значность ($k \geq 2$) и неоднородность на уровне отдельных обратимых логических элементов, сохраняя при этом однородность на уровне создаваемых структур. Перспективность такого подхода основана на возможности использования современной интегральной технологии изготовления СБИС. Рассмотренные принципы и предложенные методы синтеза многозначных обратимых неоднородных логических элементов расширяют функциональные возможности и повышают их надежность.

3. Модификация методов построения многозначных обратимых неоднородных логических элементов

Существенным отличием переключательных цепей второго рода является их обратимость «по частям». В данном случае схема многозначного обратимого неоднородного ЛЭ как бы повторяет структуру исходного многоместного отношения. В качестве аналога служит структура комбинационной схемы, построенной для исходного многоместного k-значного отношения. При этом все логические элементы в такой комбинационной схеме заменяем аналогичными по своему функциональному назначению многозначными обратимыми неоднородными логическими элементами первого рода, способы построения которых были рассмотрены в разделе 2. Рассмотрим алгоритм построения МОН ЛЭ второго рода на несложном примере.

Пусть задано многоместное отношение вида:

$$y = ab \vee cd. \qquad (10)$$

Область определения переменных a, b, c и d ограничиваем следующими законами истинности:

$$\begin{aligned} &a^0 \vee a^1 \vee a^2 = 1, \\ &b^0 \vee b^1 \vee b^2 \vee b^3 = 1, \\ &c^0 \vee c^1 \vee c^2 = 1, \\ &d^0 \vee d^1 \vee d^2 \vee d^3 \vee d^4 = 1. \end{aligned} \qquad (11)$$

Значность переменной y:

$$y(a, b, c, d) = \max(g(a, b), f(c, d)),$$

где функции g и f определяются как $g(a, b) = \min(a, b)$, $f(c, d) = \min(c, d)$ согласно логике их задания. Другими словами, исходное отношение может быть установлено в виде эквивалентной ему системы предикатных уравнений:

$$\begin{cases} y = g \vee f; \\ g = a \cdot b; \\ f = c \cdot d. \end{cases} \qquad (12)$$

Модифицированная таблица истинности второго уравнения будет представлена ниже, в системе (13). Таблицы для первого, второго и третьего уравнений системы (12) представлены ниже (табл. 1–3).

Таблица 1

Модифицированная таблица истинности $g(a, b)$

$a \setminus b$	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1
2	0	1	2	2	2

Таблица 2

Модифицированная таблица истинности $f(c, d)$

$c \setminus d$	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	0	1	1	1
2	0	1	2	2

Таблица 3

Модифицированная таблица истинности $y(g, f)$

$g \setminus f$	0	1	2
0	0	1	2
1	1	1	2
2	2	2	2

Эти таблицы более компактны по сравнению с традиционными таблицами истинности и являются отправным моментом при построении МОН ЛЭ второго рода. Обратимая переключательная цепь второго рода для исходного отношения (10) представлена на рис. 1.

Алгоритм функционирования такого устройства базируется на трех обратимых ЛЭ первого рода: обратимых конъюнкторах и обратимом дизъюнкторе (рис. 1).

Существенным отличием является наличие на входах устройства промежуточных переменных g и f. Однако, с учетом установленной интерпретации и k-фазного представления информации в таких устройствах, на все входные шины данных переменных (количество шин соответствует значности переменной) следует подать логическую единицу. Тем самым допускаем возможность любого значения для данной переменной из вычисляемой области ее определения по заданному отношению (10) или эквивалентной ему системы логических уравнений (12) с учетом значности исходных переменных, заданных усеченными законами истинности (11).

Для нашего случая логика работы первого, второго и третьего МОН ЛЭ определяется табл. 1, 2 и 3 соответственно.

Соединение логических элементов И и ИЛИ в первом МОН ЛЭ, например, полностью задается следующей системой предикатных уравнений:

$$\begin{aligned} g^0_{\text{вых}} &= a^0b^0g^0 \vee a^1b^0g^0 \vee a^2b^0g^0 \vee \\ &\vee a^0b^1g^0 \vee a^0b^2g^0 \vee a^0b^3g^0; \\ g^1_{\text{вых}} &= a^1b^1g^1 \vee a^2b^1g^1 \vee a^1b^2g^1 \vee a^1b^3g^1; \\ g^2_{\text{вых}} &= a^2b^2g^2 \vee a^2b^3g^2; \\ a^0_{\text{вых}} &= a^0b^0g^0 \vee a^0b^1g^0 \vee a^0b^2g^0 \vee a^0b^3g^0; \\ a^1_{\text{вых}} &= a^1b^0g^0 \vee a^1b^1g^1 \vee a^1b^2g^1 \vee a^1b^3g^1; \\ a^2_{\text{вых}} &= a^2b^0g^0 \vee a^2b^1g^1 \vee a^2b^2g^2 \vee a^2b^3g^2; \\ b^0_{\text{вых}} &= a^0b^0g^0 \vee a^1b^0g^0 \vee a^2b^0g^0; \end{aligned} \qquad (13)$$

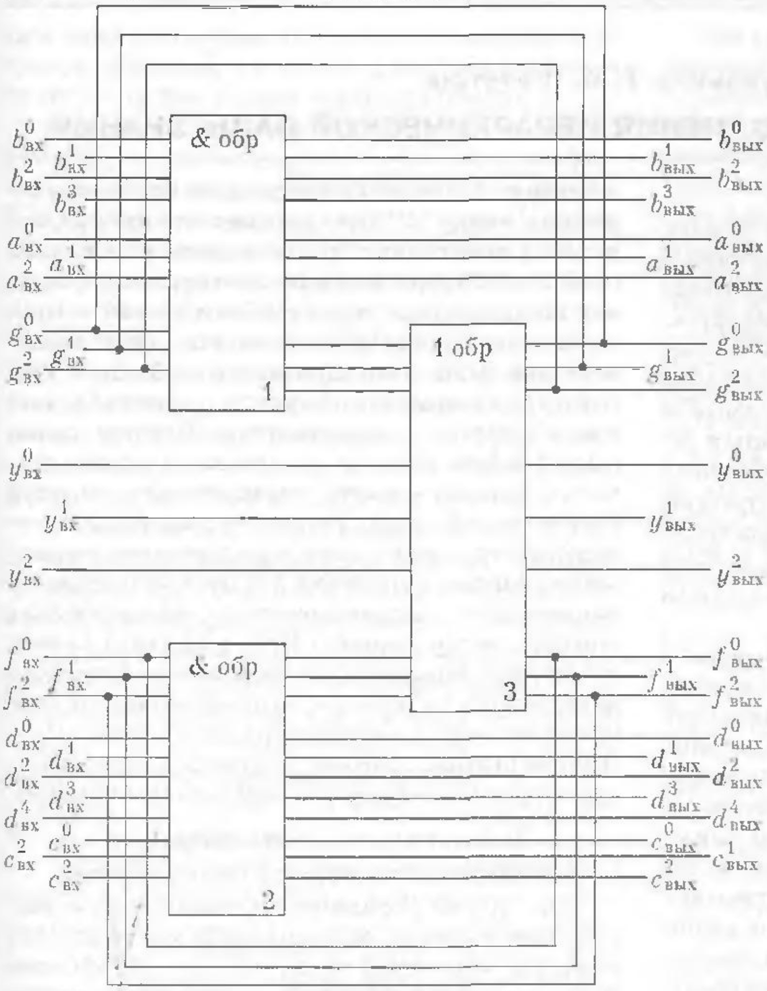

Рис.1. Обратимая переключательная цепь (МОН ЛЭ) второго рода, реализующая логическое уравнение вида $y = ab \vee cd$

$$b^1_{вых} = a^0 b^1 g^0 \vee a^1 b^1 g^1 \vee a^2 b^1 g^1;$$
$$b^2_{вых} = a^0 b^2 g^0 \vee a^1 b^2 g^1 \vee a^2 b^2 g^2;$$
$$b^3_{вых} = a^0 b^3 g^0 \vee a^1 b^3 g^1 \vee a^2 b^3 g^2.$$

Здесь и далее для кратности записи индекс, обозначающий входное значение той или иной переменной (в правой части уравнения), будем опускать.

Аналогичные системы предикатных уравнений, задающие соединения логических элементов И и ИЛИ для второго и третьего МОН ЛЭ, представленные на рис. 1, могут быть получены из соответствующих табл. 1, 2.

При этом функциональные схемы рассматриваемых МОН ЛЭ первого рода строятся таким образом, чтобы получить предельное структурное быстродействие, подобное тому, которое характерно для линейных дешифраторов и равно обратной величине средней задержки распространения сигнала типового элемента И (ИЛИ) для соответствующих типов интегральных микросхем. Первый ярус содержит полный набор элементов И на три входа, соответствующих получению всех конституент единицы исходной таблицы истинности. В данные конституенты входят все входные переменные рассматриваемого отношения. Второй ярус предназначен для получения дизъюнкции тех или иных конституент единицы. Выход каждого такого элемента ИЛИ является выходным значением того или иного значения соответствующей переменной.

4. Выводы

В данной статье предложена модификация традиционных таблиц истинности для многозначных неоднородных кодов, связанных предикатными уравнениями, позволяющая представлять эти таблицы в компактной форме.

В статье метод синтеза обратимых переключательных цепей первого рода распространен на случай неоднородных кодов, заданных предикатными уравнениями.

Обоснована целесообразность перехода к переключательным цепям второго рода при числе переменных в исходном предикатном уравнении более 8, при значности переменных, не превышающей 6, что является характерным для задач морфологического анализа и синтеза.

Впервые предложены методы синтеза и осуществлен анализ базовых многозначных неоднородных логических элементов второго рода. Показана возможность эффективного построения переключательных цепей за счет варьирования базовых модулей [3, 4].

Были выявлены особенности и проанализирован ряд характерных свойств (регенерации, частичной регенерации, выявления противоречий) переключательных цепей прямого и обратного действия [3–5].

Список литературы: 1. *Раков М. А.* Реализация многозначных структур автоматики.– К.: Наук. думка, 1976.– 350 с. 2. *Самофалов К. Г., Корнейчук В. И., Романкевич А. М., Тарасенко В. П.* Цифровые многозначные элементы и структуры.– Киев: Вища школа, 1974.– 168 с. 3. *Четвериков Г. Г.* Многозначные структуры (анализ, сравнение, синтез, обобщение): Ч. I.– К.: ИСМО, 1997.– 192 с. 4. *Бондаренко М. Ф., Коноплянко З. Д., Четвериков Г. Г.* Основи теорії побудови багатозначних структур та кодування в системах штучного інтелекту.– Харків: Фактор-друк, 2003.– 336 с. 5. *Бондаренко М. Ф., Коноплянко З. Д., Четвериков Г. Г.* Основи теорії синтезу над швидкодіючих структур мовних систем штучного інтелекту.– К.: ІЗМН, 1997.– 264 с.

Поступила в редколлегию 14.03.2006