

Глава 11

Модули, универсальные в классе всех булевых функций

Известно большое число работ [1—14], посвященных построению модулей, универсальных в классе всех булевых функций (БФУ) n переменных, называемых универсальными логическими модулями n переменных и обозначаемых УЛМ n .

При этом наибольшее распространение на практике получили модули, в которых информационные и управляющие входы разделены.

В [1, 7] описаны универсальные логические модули n переменных без парафазных входных переменных, настройка которых осуществляется за счет подачи на управляющие входы констант 0 и 1.

В [1, 7] описаны также универсальные логические модули n переменных с одной парафазной входной переменной, настройка которых осуществляется за счет подачи на управляющие входы констант 0, 1, переменной x_n и ее инверсии \bar{x}_n . Это позволяет сократить число входов модулей по сравнению с предыдущим классом модулей.

Дальнейшее сокращение числа входов достигается при использовании универсальных логических модулей n переменных с n парафазными входными переменными, настройка которых осуществляется за счет подачи на управляющие входы констант 0, 1, переменных x_1, x_2, \dots, x_n и их инверсий $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ [2, 7].

Из изложенного следует, что в настоящее время в теории универсальных логических модулей имеется пробел: до сих пор не рассматривались универсальные логические модули n переменных с m парафазными входами ($n > m$).

При определенной структуре модули этого класса являются обобщением трех классов модулей, перечисленных выше: первого — при $m = 0$, второго — при $m = 1$ и третьего — при $n = m$.

Материал настоящей главы, посвященный исследованию указанного выше нового класса модулей, призван восполнить указанный пробел.

11.1. Универсальные логические модули n переменных (УЛМ n) без парафазных входных переменных

Модулями этого класса являются мультиплексоры «2 в 1», рассматриваемые как одна компонента или композиция мультиплексоров меньшего числа переменных. Число входов таких модулей удовлетворяет соотношению

$$M_1(n) = n + 2^n.$$

Значения $M_1(n)$ при $n = 2—7$ приведены в столбце с $m = 0$ табл. 11.1. Для модулей этого типа будем применять обозначение УЛМ $n, 0$.

Т а б л и ц а 11.1

n	m							
	0	1	2	3	4	5	6	7
2	6	3	3	—	—	—	—	—
3	11	6	6	6	—	—	—	—
4	20	11	11	10	10	—	—	—
5	37	20	20	17	17	16	—	—
6	70	37	37	30	30	28	28	—
7	135	70	70	55	55	51	51	39

11.2. Модули УЛМ n с одной парафазной входной переменной

Модулями этого класса являются мультиплексоры « 2^{n-1} в 1», рассматриваемые как одна компонента или композиция мультиплексоров меньшего числа переменных. Число входов таких модулей удовлетворяет соотношению

$$M_2(n) = n + 2^{n-1} - 1.$$

Значения $M_2(n)$ при $n = 2—7$ приведены в столбце с $m = 1$ табл. 11.1. Для модулей этого типа будем использовать обозначение УЛМ $n, 1$.

На рис. 11.1 приведен модуль УЛМ3,1, реализованный мультиплексором «4 в 1», а на рис. 11.2 этого модуль построен как композиция трех мультиплексоров «2 в 1».

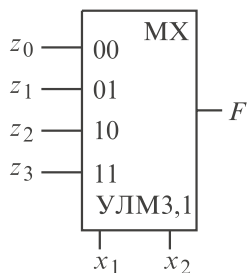


Рис. 11.1

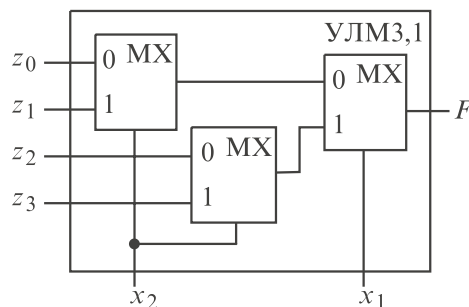


Рис. 11.2

В этих схемах реализация произвольной БФУ трех переменных — x_1, x_2, x_3 осуществляется за счет подачи на информационные входы переменных x_1, x_2 , а на управляющие входы z_0, \dots, z_3 — констант 0, 1, переменной x_3 и ее инверсии $\neg x_3$.

На рис. 11.3 приведен модуль УЛМ4,1, состоящий из двух мультиплексов «4 в 1» и одного мультиплекса «2 в 1».

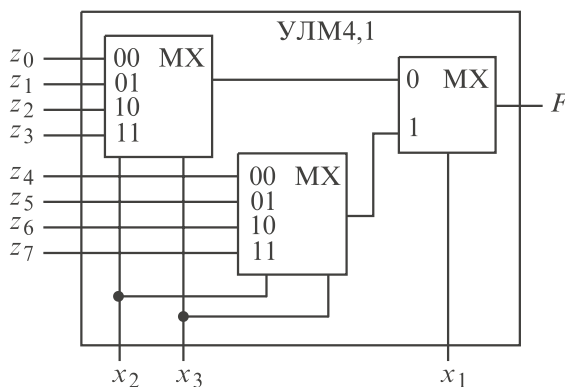


Рис. 11.3

11.3. Модули УЛМ n с n парафазными входными переменными (УЛМ n, n)

Структура модуля n переменных, настраиваемого за счет подачи символов 0, 1, $x_i, \neg x_i$ ($i = 1, \dots, n$) на управляющие входы z_1, z_2, \dots, z_i , приведена на рис. 11.4. Для модулей этого класса будем применять обозначение УЛМ n, n .

Этот модуль содержит блоки (Б), каждый из которых реализует подмножество конъюнкций n переменных. Конъюнкции в каждом подмножестве удовлетворяют условию избирательности [2]: с по-

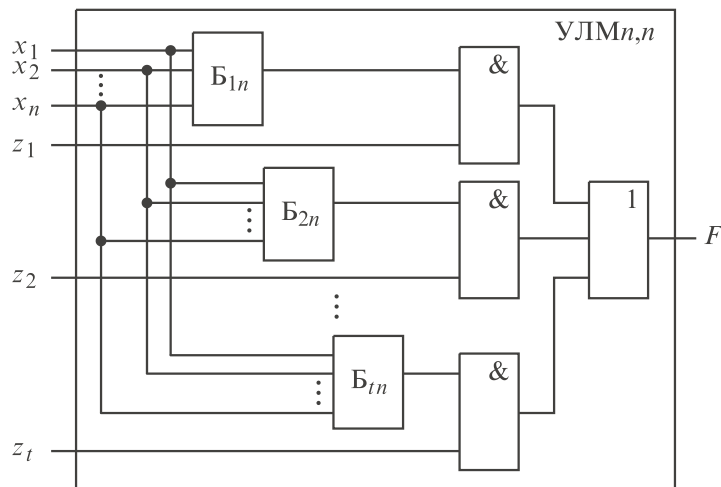


Рис. 11.4

мощью управляющего входа (связанного с блоком) за счет подачи на него символов $0, 1, x_i, !x_i$ могут быть реализованы любые комбинации (дизъюнкции) конъюнкций, образующих это подмножество, а также отсутствие конъюнкций.

Число конъюнкций, входящих в блок, должно удовлетворять неравенству

$$s \leq [1 + \log(n+1)].$$

Число настроечных входов модуля определяется соотношением

$$t(n) = \left\lceil \frac{2^n}{[1 + \log(n+1)]} \right\rceil.$$

При этом число входов модуля при $n \geq 3$ определяется следующим образом:

$$M_3(n) = n + t = n + \left\lceil \frac{2^n}{[1 + \log(n+1)]} \right\rceil.$$

При $n = 2$ в качестве модуля УЛМ_{2,2} может применяться мультиплексор «2 в 1», структура которого описывается формулой $F = !x_1 z_0 \vee x_1 z_1$.

Значения $M_3(n)$ при $n = 2—7$ приведены в крайней правой диагонали значений табл. 11.1.

При фиксированном n блоки, входящие в состав модуля, могут формироваться различными способами. Табл. 11.2 описывает четы-

ре варианта блоков модулей УЛМ3,3 (рис. 11.5). В этой таблице $a, b = \{0, 1\}$.

Т а б л и ц а 11.2

1			2			3			4		
x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
a	0	1	a	0	0	a	0	0	a	0	0
a	1	0	$!a$	1	0	$!a$	0	1	$!a$	0	1
$!a$	1	1	a	1	1	a	1	1	$!a$	1	0
b	0	0	b	0	1	b	1	0	b	1	1

Выбирая для определенности третий вариант, перечислим входные наборы, образующие блоки модуля УЛМ3, 3 :

$$B_{13} = \begin{Bmatrix} 000 \\ 101 \\ 011 \end{Bmatrix}; B_{23} = \begin{Bmatrix} 100 \\ 001 \\ 111 \end{Bmatrix}; B_{33} = \begin{Bmatrix} 010 \\ 100 \end{Bmatrix}.$$

Из сравнения модуля УЛМ3,1 (рис. 11.2) и модуля УЛМ3,3 (рис. 11.5) следует, что первый из них обладает меньшей элементной сложностью при одинаковом числе входов.

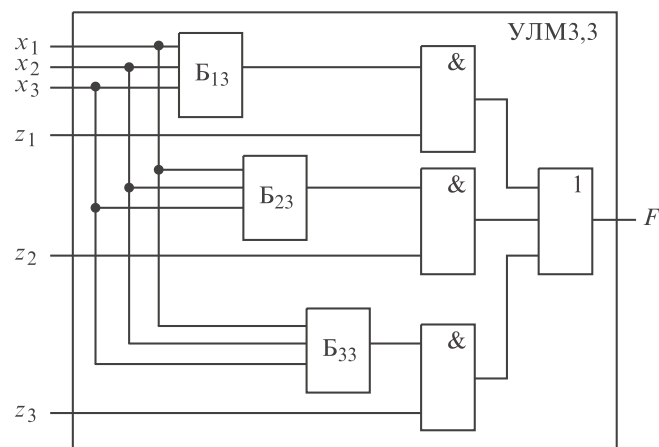


Рис. 11.5

При $n > 3$ модули УЛМ n,n имеют меньшее число входов. Кроме того, как будет показано в следующем разделе, блоки модулей УЛМ t,t могут применяться при построении модулей УЛМ n,n , где $n > t$.

При $n = 4, 5$ блоки могут быть сформированы на основе табл. 11.3 [2, 14]. В этой таблице $c, d = \{0, 1\}$.

Т а б л и ц а 11.3

$n = 4$				$n = 5$				
x_1	x_2	x_3	x_4	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
a	0	0	b	0	0	0	b	c
$\neg a$	0	1	b	$\neg a$	0	1	b	c
a	1	1	b	a	1	1	b	c
0	1	0	b	d	1	0	0	0
1	1	0	b	$\neg d$	1	0	0	1
				d	1	0	1	1
				0	1	0	1	0
				1	1	0	1	0

Перечислим входные наборы, входящие в соответствующие блоки. Для модуля УЛМ4, 4:

$$B_{14} = \begin{Bmatrix} 0000 \\ 1010 \\ 0110 \end{Bmatrix}; B_{24} = \begin{Bmatrix} 0001 \\ 1011 \\ 0111 \end{Bmatrix}; B_{34} = \begin{Bmatrix} 1000 \\ 0010 \\ 1110 \end{Bmatrix};$$

$$B_{44} = \begin{Bmatrix} 1001 \\ 0011 \\ 1111 \end{Bmatrix}; B_{54} = \begin{Bmatrix} 0100 \\ 1100 \end{Bmatrix}; B_{64} = \begin{Bmatrix} 0101 \\ 1101 \end{Bmatrix}.$$

Для модуля УЛМ5, 5:

$$B_{15} = \begin{Bmatrix} 00000 \\ 10100 \\ 01100 \end{Bmatrix}; B_{25} = \begin{Bmatrix} 00001 \\ 10101 \\ 01101 \end{Bmatrix}; B_{35} = \begin{Bmatrix} 00010 \\ 10110 \\ 01110 \end{Bmatrix}; B_{45} = \begin{Bmatrix} 00011 \\ 10111 \\ 01111 \end{Bmatrix};$$

$$B_{55} = \begin{Bmatrix} 10000 \\ 00100 \\ 11100 \end{Bmatrix}; B_{65} = \begin{Bmatrix} 10001 \\ 00101 \\ 11101 \end{Bmatrix}; B_{75} = \begin{Bmatrix} 10010 \\ 00110 \\ 11110 \end{Bmatrix}; B_{85} = \begin{Bmatrix} 10011 \\ 00111 \\ 11111 \end{Bmatrix};$$

$$B_{95} = \begin{Bmatrix} 01000 \\ 11001 \\ 01011 \end{Bmatrix}; B_{105} = \begin{Bmatrix} 11000 \\ 01001 \\ 11011 \end{Bmatrix}; B_{115} = \begin{Bmatrix} 01010 \\ 11010 \end{Bmatrix}.$$

Модуль УЛМ3, 3, в котором минимизируется элементная сложность, описан в [15].

11.4. Использование блоков модулей УЛМ t, t при построении модулей УЛМ n, n

Эту задачу рассмотрим на примере построения модуля УЛМ $5,5$ с применением блоков модуля УЛМ $3,3$.

Анализ входных наборов, образующих блоки модуля УЛМ $5,5$ и приведенных в предыдущем разделе, показывает, что первые че-

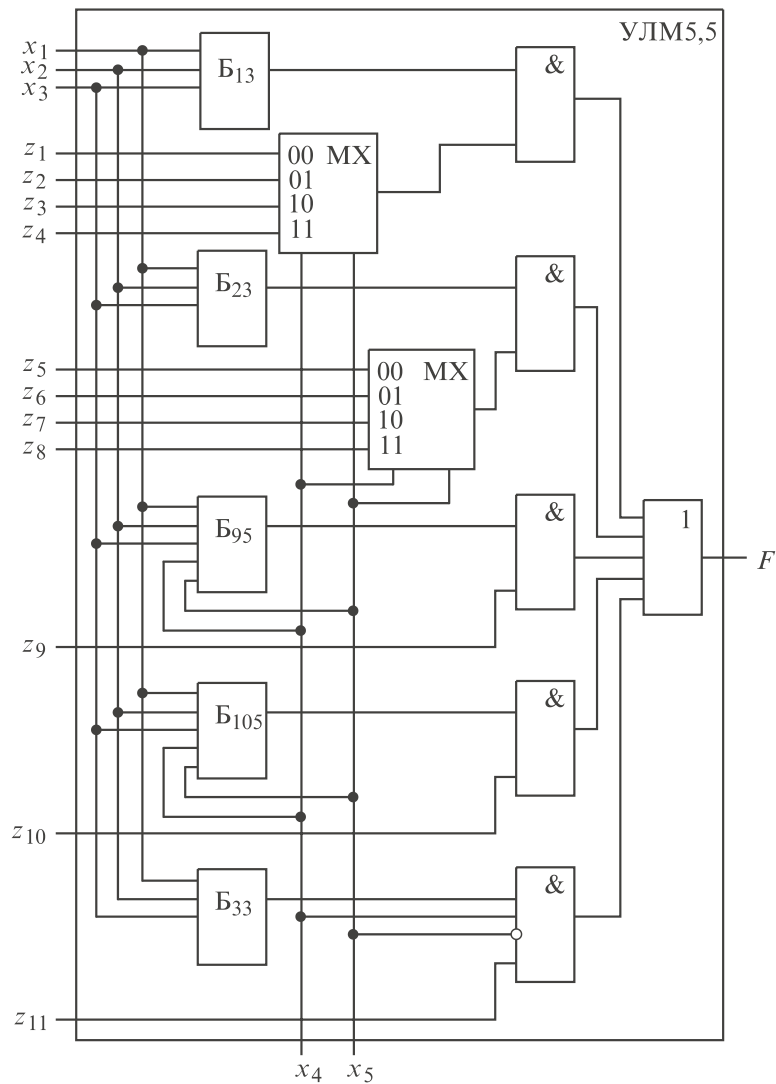


Рис. 11.6

тыре блока (B_{15}, \dots, B_{45}) могут быть построены на базе блока B_{13} модуля УЛМ3,3, блоки с пятого (B_{55}) по восьмой (B_{85}) — на базе блока B_{23} модуля УЛМ3,3, девятый и десятый блоки (B_{95}, B_{105}) должны использоваться в «естественном» виде, а одиннадцатый блок B_{115} может быть реализован на базе блока B_{33} модуля УЛМ3,3.

На рис. 11.6 приведен модуль УЛМ5,5, имеющий меньшую элементную сложность (при том же числе входов) по сравнению с модулем УЛМ5,5 с канонической структурой (рис. 11.4).

При этом на управляющие входы z_1, \dots, z_8, z_{11} в парафазной форме должны подаваться только переменные x_1, x_2, x_3 , в то время как переменные x_4, x_5 могут быть однофазными. На входах z_9 и z_{10} любая из входных переменных (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) может потребоваться в парафазной форме.

Для определения настройки модуля заданная таблица истинности должна быть преобразована так, чтобы входные наборы в ней располагались в порядке их перечисления по блокам, описанным в разд. 11.3: $B_{15}, B_{25}, \dots, B_{115}$.

11.5. Модули УЛМ n, m первого типа

Будем использовать в этом случае обозначение УЛМ $n, m, 1$.

На рис.11.7 приведена схема модуля УЛМ $n, m, 1$, построенного из 2^{n-m} модулей УЛМ m, m и одного мультиплексора « 2^{n-m} в 1». На управляющие входы Z предлагаемого модуля могут подаваться константы 0, 1 и парафазные входные переменные x_{n-m+1}, \dots, x_n .

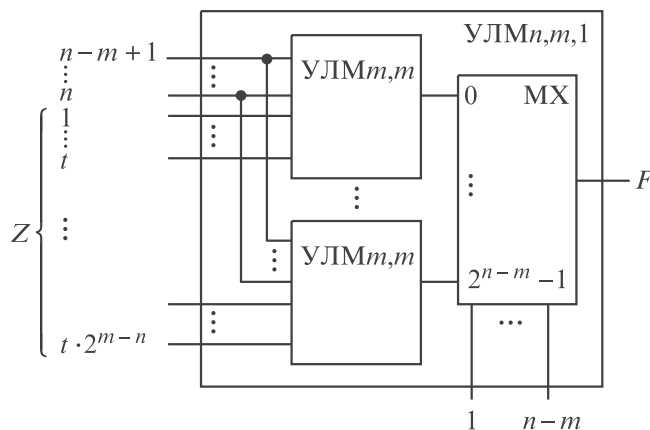


Рис. 11.7

Число входов в таком модуле при $m = 0, 3, 4, \dots, n$ определяется соотношением

$$M_4^m(n) = n + 2^{n-m} \left[\frac{2^m}{[1 + \log(m+1)]} \right],$$

так как каждый из 2^{n-m} модулей УЛМ m, m , входящих в модуль УЛМ n, m первого типа, имеет по $t(n)$ управляющих входов.

При $m = 1$ предлагаемый модуль совпадает с единым модулем УЛМ $n, 1$, а при $m = 2$ — с композиционным модулем УЛМ $n, 2$.

Значения M_4 при различных значениях n и m приведены в табл. 11.1. На рис. 11.8 приведен модуль УЛМ $4,3,1$ с 10 входами, построенный из двух шестивходовых модулей УЛМ $3,3$ и одного мультиплексора «2 в 1».

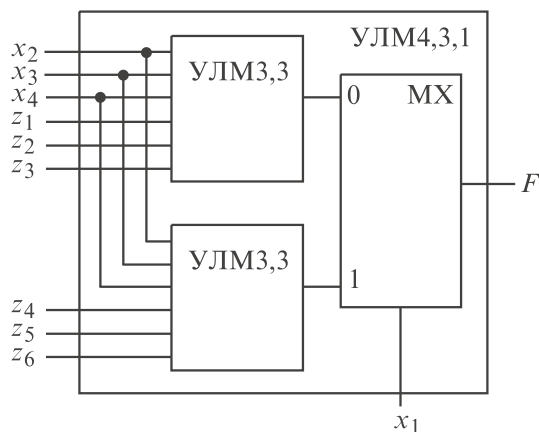


Рис. 11.8

При этом обратим внимание на тот факт, что модуль УЛМ $4,1$, построенный из двух шестивходовых модулей УЛМ $3,1$ и одного мультиплексора «2 в 1» (рис. 11.3), имеет 11 входов.

Из приведенного примера следует, что модули УЛМ $3,3$ и УЛМ $3,1$, имеющие одинаковое число входов и одинаковые функциональные возможности, обладают различной эффективностью при построении модуля УЛМ 4 на их основе. Меньшее число входов модуля УЛМ $4,3,1$ по сравнению с модулем УЛМ $4,1$ определяется большим числом парафазных переменных, подаваемых на его управляющие входы.

Из сравнения модулей УЛМ $4,3$ и УЛМ $4,4$ следует, что они имеют одинаковое число входов, а первый модуль имеет меньшую элементную сложность и требует использования однофазной переменной x_1 .

Из табл. 11.1 следует, что аналогичные выводы можно сделать и из сравнения модулей УЛМ6,5,1 и УЛМ6,6.

При других значениях n и m промежуточное число парафазных входных переменных приводит к промежуточному числу входов модулей:

$$M_3(n) < M_4^m(n) < M_2(n).$$

Пример 11.1. Определить настройку модуля УЛМ4,3,1 при реализации БФУ, заданной табл. 11.4.

Перестроим табл. 11.4 в соответствии с расположением конъюнкций в блоках модуля УЛМ3,3 для переменных x_2, x_3, x_4 (табл. 11.5).

Т а б л и ц а 11.4

x_1	x_2	x_3	x_4	f
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

Т а б л и ц а 11.5

j	x_1	x_2	x_3	x_4	f	z_j	
1	0	0	0	0	0	x_2	
	0	1	0	1	1		0
2	0	1	0	0	0	x_4	
	0	0	0	1	1		1
3	0	0	1	0	1	1	
	0	1	1	0	1		1
4	1	0	0	0	1	$!x_3$	
	1	1	0	1	1		1
	1	0	1	1	0		0
5	1	1	0	0	1	$!x_4$	
	1	0	0	1	0		0
6	1	1	1	1	0	$!x_2$	
	1	0	1	0	1		1
6	1	1	1	0	0	$!x_2$	
	1	1	1	0	0		0

Сопоставляя фрагменты «высоты» s столбца значений f заданной функции с соответствующими фрагментами той же «высоты» столбцов значений входных переменных x_2, x_3, x_4 , заполним столбец z_j таблицы. Из рассмотрения этого столбца следует, что $z_1 = x_2, z_2 = x_4, z_3 = 1, z_4 = !x_3, z_5 = !x_4, z_6 = !x_2$.

11.6. Модули УЛМ n, m второго типа

Существенного уменьшения элементной сложности при сохранении числа входов можно добиться при переходе от рассмотренного в предыдущем разделе класса модулей к универсальным логическим модулям n переменных с m парафазными входными переменными второго типа (рис. 11.9), которые будем обозначать УЛМ $n, m, 2$.

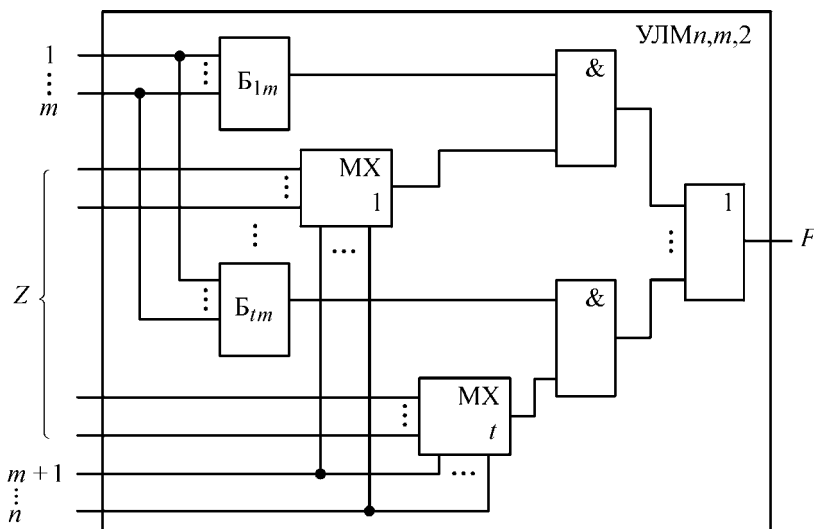


Рис. 11.9

Упрощение модулей достигается за счет использования в них не модулей УЛМ m, m , как в предыдущем случае, а только блоков, входящих в состав этих модулей.

Число входов в таких модулях при $m \geq 3$ определяется соотношением $M_4^m(n)$, приведенным в предыдущем разделе. В этих модулях число мультиплексов равно $t(n)$, а каждый из мультиплексов имеет 2^{n-m} управляющих входов.

На рис. 11.10 приведен модуль УЛМ $4, 3, 2$, построенный из блоков модуля УЛМ $3, 3$.

Пример 11.2. Определить настройку модуля УЛМ $4, 3, 2$ при реализации БФУ (табл. 11.4).

Перестроим табл. 11.4. Для этого каждую совокупность наборов значений входных переменных x_1, x_2, x_3 , соответствующую каждому блоку модуля УЛМ $3, 3$, повторим дважды и дополним четвертую позицию (для переменной x_4) первый раз нулями, а второй — единицами (табл. 11.6). Из рассмотрения табл. 11.6 следует, что $z_1 = x_3$, $z_2 = !x_1$, $z_3 = !x_2$, $z_4 = 0$, $z_5 = x_1$, $z_6 = 1$.

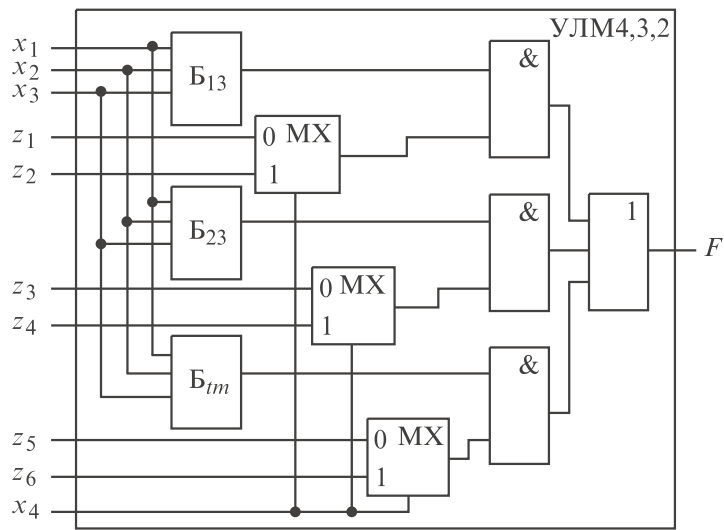


Рис.11.10

Таблица 11.6

j	x_1	x_2	x_3	x_4	f	z_j
1	0	0	0	0	0	x_3
	1	0	1	0	1	
	0	1	1	0	1	
2	0	0	0	1	1	$\neg x_1$
	1	0	1	1	0	
	0	1	1	1	1	
3	1	0	0	0	1	$\neg x_2$
	0	0	1	0	1	
	1	1	1	0	0	
4	1	0	0	1	0	0
	0	0	1	1	0	
	1	1	1	1	0	
5	0	1	0	0	0	x_1
	1	1	0	0	1	
6	0	1	0	1	1	1
	1	1	0	1	1	

Из сравнения блоков, сформированных в табл. 11.6, с блоками модулей УЛМ4,4, приведенными в разд. 11.3, следует их полное совпадение. При этом $2t(m) = t(n)$. Это обеспечивает равное число входов модулей УЛМ4,3,2 и УЛМ4,4. Однако элементная сложность модуля УЛМ4,3,2 существенно ниже сложности как модуля УЛМ4,4, так и модуля УЛМ4,3,1. При этом для модуля УЛМ4,3,2 переменная x_4 может быть однофазной. Та же ситуация имеет место при $m = 5$ и $n = 6$.

В случаях, когда

$$2^{n-m} t(m) > t(n),$$

модули УЛМ $n,m,2$ имеют большее число входов по сравнению с модулями УЛМ n , n при меньшей элементной сложности и меньшем числе парафазных входных переменных.

При применении предлагаемых модулей в общем случае при перестроении таблицы истинности заданной БФУ наборы значений входных переменных x_1, x_2, \dots, x_m , соответствующие блокам модуля УЛМ m,m , повторяются 2^{n-m} раз, а остальные позиции на наборах, соответствующих блоку, заполняются $n - m$ разрядными двоичными числами, располагаемыми в лексикографическом порядке.

В заключение раздела отметим, что впервые использовать блоки, входящие в состав модулей УЛМ m,m , для построения модулей УЛМ n,m было предложено в [16] при построении модуля УЛМ4,3.

Частный случай модулей рассматриваемого класса — модули УЛМ $n,3,2$ описаны в [17]. В этой же работе приведен пример реализации БФУ пяти переменных модулем УЛМ5,3,2.

11.7. Модули УЛМ n без разделения информационных и настроечных входов

Определим нижнюю оценку числа входов (M) однокомпонентных модулей, универсальных в классе всех БФУ n переменных.

Для этого откажемся от разделения входов модулей на информационные и управляющие. Тогда при наличии всех входных переменных в парафазной форме справедливо, что

$$\begin{aligned} (2n+2)^M &\geq 2^{2^n}; \\ M(1 + \log(n+1)) &\geq 2^n; \\ M &\geq \left\lceil \frac{2^n}{[1 + \log(n+1)]} \right\rceil = t(n). \end{aligned}$$

Полученное соотношение показывает, что в модулях УЛМ n число входов не может быть меньше числа управляющих входов в модулях УЛМ n , n .

При $n = 3$ $t(3) = 3$. Попытка построения УЛМЗ с $M = 4$ не может привести к успеху, так как в [3] доказано, что не существует ни одной БФУ четырех переменных, которая одновременно реализует следующие три функции трех переменных: $f_1 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$, $f_2 = (x_1 \vee x_2)x_3 \vee x_2x_3$, $f_3 = x_1x_2x_3$.

По этой причине невозможно построение модуля УЛМЗ с четырьмя входами даже при переходе к PN - или NPN -классификации.

Построение модуля УЛМЗ с пятью входами, реализующего все 256 функций трех переменных, видимо, невозможно, так как существует всего лишь 260 неэквивалентных вариантов настройки одной функции пяти переменных на функции трех переменных [18]. Поэтому можно утверждать, что модули УЛМЗ,1 и УЛМЗ,3 с шестью входами содержат минимальное число входов, которые могут иметь модули, универсальные в классе всех булевых функций трех переменных.

Переход к PN -классификации позволил решить эту задачу [19] для всех представителей 16 типов функций, существенно зависящих от трех переменных, с помощью порождающей функции пяти переменных.

Из рассмотрения таблицы настройки этого модуля, приведенной в разд. 8.4, следует, что он имеет один информационный и четыре управляющих входа. При этом на вход z_1 могут подаваться символы 0, x_2 , на вход z_2 — символы 0, 1, x_3 , $!x_3$, на вход z_3 — символы 0, 1, x_3 , $!x_3$, а на вход z_4 — символы 0, 1, x_2 , x_3 . Таким образом, рассмотренный модуль требует всего лишь одной парафазной переменной x_3 .

Отметим, что предложенный модуль УЛМЗ с пятью входами не является единственным [3—5].

При $n = 4$ $t(4) = 6$. Несмотря на то что существуют 560 неэквивалентных вариантов настройки одной функции шести переменных на функции четырех переменных [18], их оказалось недостаточно для реализации представителей всех 208 NPN -типов функций четырех переменных.

В [18] показано, что существуют 8400 неэквивалентных вариантов настройки одной функции семи переменных на функции четырех переменных. В [3, 4] построены функции семи переменных, порождающие представителей всех NPN -типов функций четырех переменных.

Материал настоящего раздела впервые опубликован в [20].

Выводы

1. Показано, что модули УЛМ t,m , обладающие тем же числом входов и теми же функциональными возможностями, что и модули УЛМ $t,1$, более эффективны при построении на их основе модулей УЛМ n ($n > t$).
2. Показано, что использование блоков, входящих в состав модулей УЛМ t,m , позволяет упростить модули УЛМ n,n .
3. Предложен класс модулей УЛМ n,t , являющийся обобщением известных классов модулей УЛМ $n,0$, УЛМ $n,1$ и УЛМ n,n .
4. Показано, что модули УЛМ n,t первого типа, построенные на базе модулей УЛМ t,m , при некоторых значениях n проще модулей УЛМ n,n при том же числе входов.
5. Показано, что модули УЛМ n,t второго типа, построенные на базе блоков модулей УЛМ t,m , проще модулей УЛМ n,t первого типа, а при некоторых значениях n и модулей УЛМ n,n при том же числе входов.
6. Предложены методы настройки модулей УЛМ n,t первого и второго типа на реализацию произвольных булевых функций n переменных.
7. Получена оценка числа входов модулей УЛМ n,t .

Л и т е р а т у р а

1. Yau S. S., Tang C. K. Universal logic modules and their applications // IEEE Trans. on Computers. 1970. N 2.
2. Preparata F. P., Muller D. E. Generation of near-optimal universal boolean functions // J. Comp. and System Sciences. 1970. N 2.
3. Stone H. E. Universal logic modules // Recent developments in switching theory. Ed. by A. Mukhopadhyay. New York: Academic Press, 1971.
4. Варшавский В. И., Песчанский В. А., Мараховский В. Б. Многофункциональные модули, реализующие все функции трех и четырех переменных // II Всесоюз. совещ. по теории релейных устройств и конечных автоматов. Тез. докл. Рига : Зинатне, 1971.
5. Бочков П. Е., Попов Ю. А., Сладков В. А. Проектирование многофункциональных модулей с использованием инвариантов булевых функций // Автоматика и вычисл. техника. 1973. № 3.
6. Якубайтис Э. А. Универсальные логические элементы // Автоматика и вычисл. техника. 1973. № 5.
7. Friedman A. D., Menon P. R. Theory and design of switching circuits. New York: Computer Science Press, 1975.
8. Якубайтис Э. А. Логические автоматы и микромодули. Рига : Зинатне, 1975.
9. Якубайтис Э. А. Теория автоматов. Многофункциональные логические модули // Итоги науки и техники. Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. М.: ВИНТИ, 1976. № 13.
10. Майоров С. А., Скорубский В. И., Кравцов Л. Я. Универсальные логические модули и их применение // Управляющие системы и машины. 1977. № 1.
11. Малев В. А. Структурная избыточность в логических устройствах. М.: Связь, 1978.
12. Артюхов В. Л., Копейкин Г. А., Шальто А. А. Судовые управляющие логические системы. Унифицированные логические схемы. Л.: ИПК СП, 1981.

13. Мищенко В. А., Козюминский В. Д., Семашко А. Н. Многофункциональные автоматы и элементная база цифровых ЭВМ. М.: Радио и связь, 1981.
14. Путьрев Е. И. Перестраиваемые автоматы и микропроцессорные системы. М.: Наука, 1984.
15. Викентьев Л. Ф., Аляев Ю. А., Шалыто А. А. Универсальный логический модуль. А. с. СССР № 1335974 // Бюл. изобр. 1987. № 33.
16. Артюхов В. Л., Шалыто А. А. Многофункциональный логический модуль. А. с. СССР. № 924697 // Бюл. изобр. 1982. № 16.
17. Артюхов В. Л., Шалыто А. А. Многофункциональный логический модуль. А. с. СССР. № 1073768 // Бюл. изобр. 1984. № 6.
18. Стародубцев Н. А. Соотношения для числа настроек многофункциональных логических модулей // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1972. № 4.
19. Артюхов В. Л., Шалыто А. А., Фишман Л. М. Многофункциональный логический модуль. А. с. СССР. № 760451 // Бюл. изобр. 1980. № 32.
20. Шалыто А. А. Модули, универсальные в классе всех булевых функций, с парафазными входными переменными // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. № 5.