

Таблица 7

Р а з р я д н о с т ь с х е м ы												
14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	
-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,34	-0,37	-0,5
	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67	-0,67	-0,69	-0,75	-1
		-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,34	-1,37	-1,5	-2
			-2,67	-2,67	-2,67	-2,67	-2,67	-2,67	-2,69	-2,75	-3	-4
				-5,33	-5,33	-5,33	-5,34	-5,34	-5,37	-5,5	-6	-8
					-10,67	-10,67	-10,67	-10,69	-10,75	-11	-12	-16
						-21,33	-21,34	-21,37	-21,5	-22	-24	-32
							-42,29	-42,75	-43	-44	-48	-64
								-85,5	-86	-88	-96	-128
									-172	-176	-192	-256
										-352	-384	-512
											-768	-1024
												-2048

образом, выбирая по разрядности схемы соответствующие массивы чисел из табл. 3—7, можно легко и просто получить матрицы коэффициентов C_{ki} и B_{ki} .

Изложенная методика точностных расчетов ПКН применима и к схемам $R-2R$ в случае суммирования напряжений. При этом матрица g_{ki} находится как $g_{ki} = g_{ik} = \frac{1}{3}(2^{k-i} - 2^{k+i-2n-2})$.

Поступило в редакцию 21 марта 1972 г.

УДК 681.3.053+681.3.058

Т. Ф. БЕКМУРАТОВ, М. М. МУСАЕВ
(Ташкент)

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДВУХ АРГУМЕНТОВ

При проектировании и разработке управляющих, информационно-измерительных, а также гибридных (аналого-цифровых) устройств для систем управления технологическими процессами и автоматизации научных экспериментов стремятся, во-первых, упростить структуру и повысить надежность их операционных блоков, во-вторых, увеличить общую скорость обработки информации всей системы.

Одним из рациональных путей решения этих задач является использование в устройствах связи цифровых блоков этих систем с аналоговыми таких функциональных преобразователей формы информации, в которых операции преобразования и вычисления тех или иных функций совмещены во времени.

Особый интерес в связи с этим представляют преобразователи функций многих переменных. Данная работа посвящена рассмотрению одного из способов построения цифро-аналогового преобразователя для воспроизведения функций двух переменных. Известные функциональные преобразователи кода в аналоговое напряжение с двумя и более входами [1] выполняют в основном функции множительных устройств либо воспроизводят специальный класс функций. Такие преобразователи основываются не на каком-либо математическом методе разложения исходной функциональной зависимости, а на воспроизведении функций такой компоновкой линейных управляемых делителей и источников, которая дает возможность получать нелинейные характеристики за счет влияния

нагрузки на закон изменения выходного напряжения. Поэтому вопросы разработки эффективных способов построения цифро-аналоговых преобразователей, обладающих возможностью воспроизведения широкого класса функций двух и более переменных, представляются нам заслуживающими внимания.

Предлагаемый способ построения цифро-аналогового функционального преобразователя (ЦАФП) с двумя входами основан на модифицированном математическом методе сведения функции нескольких переменных к суммам и произведениям функций одной переменной [2]. Суть этого метода применительно к функциям двух переменных состоит в следующем.

Пусть искомая функция $F(x, y)$ задана таблицей своих значений размером $2^m \times 2^n$. Тогда, как показано в [2], общее выражение для среднеквадратического приближения этой функции по системе функций Уолша можно записать в виде

$$F(x_i, y_j) = \sum_{k=0}^{2^p-1} f_k(x_i) W_k(y_j) + \sum_{k=0}^{2^p-1} \Phi_k(y_j) W_k(x_i) + R(x_i, y_j), \quad (1)$$

где 2^p — число членов разложения, определяемое требуемой точностью приближения ϵ , т. е. условием $\max |R(x_i, y_j)| \leq \epsilon$ ($p = 0, 1, 2, \dots$); $f_k(x_i)$, $\Phi_k(y_j)$ — некоторые функции одной переменной; $W_k(x_i)$, $W_k(y_j)$ — функции Уолша по аргументам x и y ; $R(x_i, y_j)$ — остаточный член приближения.

Функции $f_k(x_i)$ и $\Phi_k(y_j)$ выбираются так, чтобы минимизировать абсолютную величину максимального значения остаточного члена ряда (1). Практически для нахождения этих функций поступают следующим образом.

1. Разбивают таблицу значений исходной функции $F(x_i, y_j)$ размером $2^m \times 2^n$ на 2^{2p} частей (квадратов) и образуют новую функцию

$$F_{a,b}(x_i, y_j) = F(x_i, y_j), \quad (2)$$

где $a, b = 0, 1, 2, \dots, 2^p - 1$ — номера интервалов разбиения по x и y . При этом таблица значений функции $F_{a,b}(x_i, y_j)$ в каждом квадрате разбиения имеет размер $2^{m-p} \times 2^{n-p}$.

2. Функции $F_{a,b}(x_i, y_j)$ представляют в виде

$$F_{a,b}(x_i, y_j) = f^{a,b}(x_i) + \varphi^{a,b}(y_j) + R^{a,b}(x_i, y_j), \quad (3)$$

где функции $f^{a,b}(x_i)$ и $\varphi^{a,b}(y_j)$ определяются из условия минимума максимального значения $|R^{a,b}(x_i, y_j)|$ по следующему правилу:

а) представляют функцию $F_{a,b}(x_i, y_j)$ в виде суммы некоторой функции от y_j и остатка, причем значения этой функции от y_j находят как полусумму максимального и минимального значений $F_{a,b}(x_i, y_j)$ для фиксированного y_j и всех x_i , принадлежащих первому квадрату разбиения таблицы (т. е. для $a=0, b=0$); при этом максимальное значение абсолютной величины остатка будет наименьшим;

б) затем остаток также представляют в виде суммы некоторой функции от x_i и нового остатка, причем значения этой функции находят как полусумму максимального и минимального значений первого остатка для фиксированного x_i и всех y_j первого квадрата разбиения.

Далее каждый новый остаток представляют аналогичным образом до тех пор, пока не определяют значение слагаемых функций $f^{a,b}(x_i)$ и $\varphi^{a,b}(y_j)$ с требуемой степенью точности для всех квадратов разбиения таблицы.

Можно показать, что тогда

$$f_k(x_i) = \sum_{b=0}^{2^p-1} f^{k,b}(x_i) W_b(y_j); \quad (4)$$

$$\Phi_k(y_j) = \sum_{a=0}^{2^p-1} \varphi^{a,k}(y_j) W_a(x_i). \quad (5)$$

Полученные таким образом функции одной переменной $f_k(x_i)$ и $\Phi_k(y_j)$ аппроксимируют рядом по ортогональной системе функций Уолша. Согласно [3], можно записать

$$f_k(x_i) \approx \sum_{l=0}^{2^q-1} d_l W_l(x_i), \quad (6)$$

где

$$d_l = \sum_{i=0}^{2^q-1} f_k(x_i) W_l(x_i). \quad (7)$$

Таблица 1

y_j		$a=0$				$a=1$			
		x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
$b=0$	$j=0$	3	7	14	21	25	29	33	36
	$j=1$	5	10	20	28	34	39	42	44
	$j=2$	6	18	28	38	44	48	54	56
	$j=3$	8	26	37	46	54	60	65	68
$b=1$	$j=4$	10	36	50	58	66	71	74	76
	$j=5$	15	51	63	72	77	81	84	86
	$j=6$	40	64	74	81	84	86	88	90
	$j=7$	50	80	88	90	91	93	95	96

Таблица 2

$f^{0,0}(x_i)$	$\varphi^{0,0}(y_j)$	$f^{1,0}(x_i)$	$\varphi^{1,0}(y_j)$	$f^{0,1}(x_i)$	$\varphi^{0,1}(y_j)$	$f^{1,1}(x_i)$	$\varphi^{1,1}(y_j)$
$i=0 \div 3$	$j=0 \div 3$	$i=4 \div 7$	$j=0 \div 3$	$i=0 \div 3$	$j=4 \div 7$	$i=4 \div 7$	$j=4 \div 7$
-13,75	12,0	-6,0	30,0	-23,812	31,437	-3,75	71,0
-3,875	16,25	-0,725	39,0	6,937	43,817	-0,437	81,5
6,125	21,875	3,187	49,437	16,437	60,312	2,062	86,875
13,75	27,5	6,0	61,0	24,187	69,812	3,75	93,5

Таблица 3

$f_k(x_i)$	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
$f_0(x_i)$	-18,817	0,562	11,25	18,937	-4,875	-1,25	2,812	4,875
$f_1(x_i)$	5,187	-5,437	-5,187	-5,25	-1,125	-0,125	0,187	1,125
$\Phi_k(y_j)$	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
$\Phi_0(y_j)$	21	27,625	35,687	44,25	51,25	62,687	73,625	81,687
$\Phi_1(y_j)$	-9,25	-11,375	-13,75	-16,75	-19,25	-18,875	-13,25	-11,062

Итак, предлагаемый функциональный преобразователь двух аргументов, построенный согласно изложенной методике, будет содержать цифро-аналоговые функциональные преобразователи одного аргумента и суммирующее устройство.

Проиллюстрируем рассмотренный способ на примере построения ЦАФП для воспроизведения функции двух переменных, значения которой представлены в табл. 1 ($m=n=3$), где отражена функциональная зависимость величины равновесной концентрации аммиака в азотно-водородной смеси от давления (x) и температуры (y).

Вычислим значения составляющих функций $f_k(x_i)$ и $\Phi_k(y_j)$, а также абсолютную погрешность приближения заданной функции для случая четырех членов разложения ряда (1). Для этого разделим табл. 1 на четыре участка и определим для каждого участка значения соответствующих $f^{a,b}(x_i)$ и $\varphi^{a,b}(y_j)$ по описанному выше алгоритму. Результаты вычислений $f^{a,b}(x_i)$ и $\varphi^{a,b}(y_j)$ представлены в табл. 2. По найденным значениям $f^{a,b}(x_i)$ и $\varphi^{a,b}(y_j)$, согласно (4) и (5), найдем величины составляющих функций $f_k(x_i)$ и $\Phi_k(y_j)$. Результаты сведены в табл. 3.

Таблица 4

y_j	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
$j=0$	2,125	1,125	-3,625	-3,875	0,75	0,125	-0,25	-1,25
$j=1$	2,375	-1,375	-2,312	-1,937	1,0	1,375	0	1,0
$j=2$	-2,312	0,937	0	2,375	0,5	-0,125	-1,562	0,562
$j=3$	-5,25	3,375	3,375	4,725	-1,0	0,375	1,0	1,0
$j=4$	2,0	-1,937	1,562	1,812	-0,75	1,125	0,375	1,125
$j=5$	-4,312	0,187	2,75	4,0	-0,812	0,562	0,812	0,687
$j=6$	3,375	-2,375	-2,812	-2,56	0,875	0,25	-1,5	-0,625
$j=7$	3,375	3,375	0,937	-4,812	2,0	1,375	-0,375	-0,5

Таблица 5

l	$d_l (f_0)$	$d_l (f_1)$	$d_l (\varphi_0)$	$d_l (\varphi_1)$
0	+0,2163	+0,1866	+0,6980	+0,0576
1	+0,0129	-0,0134	-0,1760	+0,0138
2	-0,0433	+0,0159	+0,0012	+0,0306
3	-0,0777	+0,0095	-0,0906	-0,0052
4	-0,0165	+0,0131	-0,0020	+0,0014
5	-0,0126	+0,0133	+0,0069	-0,00302
6	-0,0267	+0,0158	+0,0057	+0,0099
7	-0,0409	+0,0109	-0,0435	+0,0035

Для удобства разложения по функциям Уолша все $f_k(x_i)$ и $\varphi_k(y_j)$ приведены к положительному знаку. При нахождении суммы (6) это учитывается компенсирующим напряжением на входе суммирующего устройства.

Абсолютная погрешность приближения искомой функции четырьмя членами разложения определяется выражением

$$R(x_i, y_j) = F(x_i, y_j) - [f_0(x_i) + f_1(x_i)W_1(y_j) + \varphi_0(y_j) + \varphi_1(y_j)W_1(x_i)]. \quad (8)$$

Полученные значения $R(x_i, y_j)$ отражены в табл. 4. Величина среднеквадратичной ошибки при этом составила 1,5%.

По полученным значениям $f_k(x_i)$ и $\varphi_k(y_j)$, пользуясь соотношениями (6) и (7), определяем параметры одноходовых цифро-аналоговых функциональных преобразователей для их воспроизведения. Значения коэффициентов d_l для соответствующих функций $f_k(x_i)$ и $\varphi_k(y_j)$ представлены в табл. 5. Количество членов разложения для всех функций равно восьми, что обеспечило достижение требуемой точности ($l=0, 1, \dots, 7$).

Функциональная схема построенного изложенным способом ЦАФП двух переменных показана на рисунке. Устройство состоит из четырех функциональных преобразователей ФП₁—ФП₄ типа «код — напряжение», осуществляющих воспроизведения функций $f_0(x_i)$, $f_1(x_i)$, $\varphi_0(y_j)$ и $\varphi_1(y_j)$ по значению двоичных кодов x и y . Каждый ФП состоит из приемного регистра Р, логической схемы ЛС и управляемого делителя Д. Такое построение ФП позволяет осуществлять воспроизведение соответствующих составляющих функций на основе их разложения по функциям Уолша.

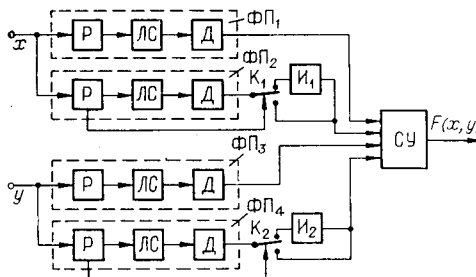
Так как функции $f_0(x_i)$ и $\varphi_0(y_j)$ не меняют знака, то выходные напряжения ФП₁ и ФП₃, воспроизводящих эти функции, поступают непосредственно на вход суммирующего устройства (СУ). С помощью ключей К₁ и К₂ и инверторов И₁ и И₂ осуществляется изменение полярности выходных напряжений с ФП₂ и ФП₄ в зависимости от значе-

ний $W_1(x_i)$ и $W_1(y_j)$. Функции Уолша $W_1(x_i)$ и $W_1(y_j)$ в каждой из частей разбиения таблицы значений $F(x, y)$ имеют вполне определенную комбинацию знаков, а так как количество участков разбиения равно 2^{2p} , то для управления ключами K_1 и K_2 используются триггеры регистра Р. На выходе СУ напряжение соответствует значению функции $F(x, y)$.

Если требуется воспроизводить функцию более точно, можно таблицу значений $F(x, y)$ разбить на большее число частей, что приведет к увеличению числа членов ряда (1) и соответственно к увеличению числа ФП, реализующих составляющие функции $f_k(x_i)$ и $\varphi_k(y_j)$. В случае, когда составляющие функции имеют резкие перепады и точность их приближения восемью членами разложения недостаточна, необходимо увеличить число членов разложения.

Предложенный способ построения ЦАФП позволяет достичь практически необходимой точности воспроизведения функций за счет гибкого варьирования как количеством одноходовых ФП, так и точностью воспроизведения ими составляющих функций. Это делает устройство универсальным и применимым в различных измерительных системах для воспроизведения широкого класса функций двух переменных.

Важной особенностью данного способа построения ЦАФП является то, что время преобразования функции двух переменных не превосходит времени преобразования в одном ФП при воспроизведении составляющей функции. Это происходит за счет параллельного поступления кодов независимых переменных x и y на вход четырех ФП. При увеличении числа независимых переменных увеличивается число одноходовых ФП, однако это не влияет на быстродействие всего устройства.



ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Смолов. Вычислительные преобразователи с цифровыми управляемыми сопротивлениями. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
2. Г. В. Горбунов, Э. С. Москалев. Применение полиномов Радемахера — Уолша в задачах аппроксимации функций нескольких переменных. — Кибернетика (Киев), 1971, № 3.
3. И. И. Коршевер, В. Б. Смолов, П. Е. Твердохлеб, В. С. Фомичев. Об одной возможности построения цифро-аналоговых функциональных преобразователей. — Автометрия, 1966, № 2.

Поступило в редакцию 17 февраля 1972 г.

УДК 621.317.7.185.4

А. Н. КАСПЕРОВИЧ, Ю. В. ШАЛАГИНОВ
(Новосибирск)

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЕ МНОГОПороГОВОЕ УСТРОЙСТВО СРАВНЕНИЯ

При построении аналого-цифровых преобразователей (АЦП), работающих по принципу считывания или последовательно-параллельного действия, возникает задача создания устройства сравнения, позволяющего за один прием произвести оценку измеряемой величины сразу по нескольким пороговым уровням. Определенный интерес представляет построение многопорогового устройства сравнения для АЦП, в котором входная величина представлена в виде тока. В таких АЦП используется метод уравнивания по току, который позволяет получить более высокое быстродействие, чем метод уравнивания по напряжению.

Подобное устройство сравнения, используемое в составе сверхбыстродействующего АЦП, описано в [1]. В этом устройстве входной ток с помощью схем развязки разветвляется на три пороговых элемента с различными порогами срабатывания. Увеличение числа пороговых элементов в таком устройстве сравнения привело бы к уменьшению величин токов, приходящихся на каждый пороговый элемент, что, в свою очередь, потре-