АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 2 1965

УДК 681.2.082+621.317.08

П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ

(Новосибирск)

О НАБОРЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ЦИФРАТОРОВ*

Проведен анализ автоматического измерения, реализуемого в цифраторах одновременного сравнения. В результате выделен набор элементов, пригодный для построения идеализированных моделей этих устройств.

В настоящее время делаются попытки количественной оценки сложности структур цифраторов. При этом оцениваются, как правило, не реальные устройства, а их идеализированные модели. Последнее вызвано необходимостью рассмотрения с единой точки зрения более или менее широкого класса цифраторов.

Модели реальных цифраторов строятся на базе некоторого исходного набора элементов (компонентов, «кирпичей»). Так в [1] элементами структур являются меры, используемые при измерении, в [2] — простейшие технические устройства (триггеры, усилители, ключи и т. д.).

Однако, раскрывая структуру цифраторов на уровне мер, автор статьи [1] не учитывает другие элементы, которые принципиально необходимы при выполнении автоматического измерения. В результате структура цифраторов, как устройств, реализующих автоматическое измерение, не раскрывается полностью, а следовательно, получаемые оценки сложности оказываются весьма приближенными.

Именно этого недостатка лишена работа [2]. Сложность цифратора с учетом его технической реализации может быть оценена достаточно полно, но при этом существенным образом сужается класс рассматриваемых устройств. Дело в том, что цифраторы, подлежащие оценке, как говорится в [2], должны быть выполнены «... из деталей и элементов одного класса точности и надежности и на одинаковом уровне разработки». Однако изготовить подобным образом, скажем, цифратор электрических напряжений и цифратор линейных перемещений весьма трудно в силу существенного различия в их технических конструкциях.

Настоящая работа посвящена нахождению набора элементов, с помощью которого можно строить модели широкого класса цифраторов и который, по-видимому, лишен недостатков наборов, принятых в [1, 2]. С этой целью проводится обобщенный анализ автоматического измерения, основанного на способе одновременного сравнения. Предполагается, что в процессе измерения осуществляется квантование и числовое кодирование измеряемой величины [3].

---

* Эти устройства называют также аналого-цифровыми преобразователями или преобразователями аналог-код.

Применимость набора элементов, выделенного в результате анализа автоматического измерения, иллюстрируется построением модели универсального цифратора, который может быть определен следующим образом. Если цифратор рассматривать как устройство, функционирование которого описывается

$$\tilde{y} = \varphi(y_x),$$

где y_x — значение измеряемой величины;

$\tilde{y}$ — ее численное значение;

φ — символ способа измерения величины y_x,

то под универсальным цифратором будем понимать устройство, способное воспроизвести любой из известных равносильных (с точки зрения получения численного значения величины y_x) способов измерений φ_1, φ_2, $\varphi_3, \ldots$, в процессе которых известная величина (мера) всегда присутствует и непрерывно принимает участие в работе. Например, в качестве φ_1 и φ_2 могут рассматриваться способы, основанные на поразрядном и развертывающем уравновешивании, в качестве φ_3 — способ, основанный на методе совпадения и т. д.

ОПЕРАЦИИ И ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ

Неизвестная величина b_x в общем случае может быть измерена двумя способами:

1) отыскивается, сколько дольных или кратных единиц известной величины e_0 соответствует неизвестной величине b_x;

2) отыскивается, сколько дольных или кратных единиц неизвестной величины b_x соответствует известной величине e_0.

В первом случае уравнение измерения может быть выражено

$$b_x = he_0, \tag{1}$$

во втором —

$$e_0 = hb_x. \tag{2}$$

Предполагается, что в зависимости от соотношения между b_x и e_0 коэффициент h в (1) и (2) может быть как меньше, так и больше единицы.

Практически измерение осуществляется следующим образом. Вначале либо составляется конечный набор $\{e_{0i}\}$, $i=0,1,\ldots,k-1$, дольных или кратных значений известной величины e_0 (1-й способ измерения), либо предусматривается возможность получения конечного набора $\{b_{xi}\}$, $i=0,1,\ldots,k-1$, дольных или кратных значений неизвестной величины b_x.

Элементы наборов подбираются так, чтобы

$$e_{0(i+1)} - e_{0i} = \Delta_{0i} \quad \text{(1-й способ измерения)},$$

$$b_{x(i+1)} - b_x = \Delta_{xi} \quad \text{(2-й способ измерения)},$$

$$i=0,1,\ldots,k-1,$$

где Δ_{0i} и Δ_{xi} — погрешности дискретности при соответствующих способах измерения.

Затем с помощью операции сопоставления P либо величин b_x и или

$$b_{xi} \leqslant e_0 < b_{x(i+1)}.$$

Тогда в качестве коэффициентов h уравнений (1), (2) принимаются известные до измерения значения $h_i = \frac{e_{0i}}{e_0}$ (1-й способ измерения) и $h_i = \frac{b_{xi}}{b_x}$ (2-й способ измерения), $i=0,1,\ldots, k-1$.

Результатом измерения, согласно [4], является число, показывающее, сколько дольных или кратных единиц известной величины содержится в неизвестной величине. Поэтому при 2-м способе измерения результат $\tilde{y}_i$ совпадает со значением h_i, т. е.

$$\tilde{y}_i = h_i. \tag{3}$$

Что касается 2-го способа измерения, то результатом будет

$$\tilde{y}_i = \frac{1}{h_i}. \tag{4}$$

Таким образом, знание численного значения коэффициента h и вида зависимостей (3), (4) эквивалентно знанию результата измерения. Исходя из этого положения будем считать, что измерение при 1 и 2-м способах оканчивается получением значения коэффициента h. Тем самым из дальнейшего рассмотрения исключается операция вычисления результата измерения по (4).

Конкретные способы измерения условимся не различать. Для этого представим, что значение y_x измеряется с помощью конечного набора $\{a_i\}$, $i=0,1,\ldots, k-1$, дольных или кратных значений некоторой величины a. Для элементов набора справедливо условие

$$a_{i+1} - a_i = \Delta_i,$$

где Δ_i — погрешность дискретности, обусловленная конечным количеством элементов набора.

Следует только помнить, что

при 1-м способе измерения y_x совпадает с b_x, а набор $\{a_i\}$ представляет собой набор $\{e_{0i}\}$ дольных или кратных значений известной величины e_0;

при 2-м способе измерения в качестве y_x выступает e_0, а набором $\{a_i\}$ является набор $\{b_{xi}\}$ дольных или кратных значений неизвестной величины b_x.

Введем теперь некоторые определения и обозначения. Назовем набор $\{a_i\}$, принятый для оценки значений неизвестной величины y_x, шкалой цифратора, а отдельные элементы этого набора — делениями шкалы. Если для значения измеряемой величины y_x выполняется условие

$$a_i \leqslant y_x < a_{i+1}, \tag{5}$$

то будем говорить, что это значение находится в Y_i-м полуинтервале шкалы. Полуинтервалу Y_i, а следовательно, и значению измеряемой величины, удовлетворяющему условию (5), присваивается числовой символ, равный численному значению коэффициента $h_i = \frac{i}{a}$. Набор $\{a_i\}$ содержит k полуинтервалов шкалы Y_i, $i=0,1,\ldots, k-1$. Поэтому можно считать, что при измерении с помощью операции сопоставления P устанавливается соответствие значения величины y_x одному из полуинтервалов шкалы (процесс квантования), после чего величине y_x присваивается числовой символ найденного полуинтервала (процесс числового кодирования).

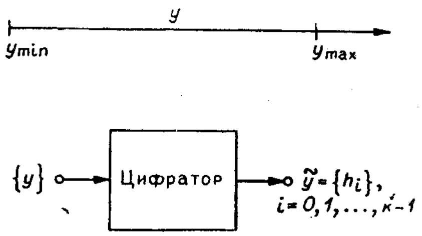

Рис. 1.

Бесконечное множество значений измеряемой величины y, изменяющейся в диапазоне от $y_{\min}$ до $y_{\max}$ (рис. 1), обозначим $\{y\}$.

Набор значений выходной величины $\tilde{y}$ цифратора совпадает с набором числовых символов полуинтервалов шкалы, т. е.

$$\tilde{y} = \{\tilde{y}_i\} = \{h_i\}, \; i = 0, \; 1, \ldots, \; k-1.$$

Наконец, операцию сопоставления измеряемой величины y_x с элементами набора $\{a_i\}$ обозначим $P(y_x, \; a_i)$, $i = 0, \; 1, \ldots, \; k-1$.

Деления шкалы в известных цифраторах формируются с помощью некоторого вспомогательного набора $\{a_{\eta L}\}$, $\eta = 1, \; 2, \ldots, \; s$, $s \leqslant k-1$, элементов (тоже кратные или дольные значения величины a) и операции $\Phi^{(a)}$, называемой операцией формирования вещественных значений делений шкалы.

Формирование осуществляется в соответствии с формулой

$$a_i = h_{1i}a_{1L} + h_{2i}a_{2L} + \ldots + h_{si}a_{sL} \qquad (6)$$

и матрицей коэффициентов

$$\| h_{\eta i} \|_{s \times k}, \qquad (7)$$

$$\eta = 1, \; 2, \ldots, \; s, \; i = 0, \; 1, \ldots, \; k-1,$$

где $h_{\eta i} = \begin{cases} 1, & \text{если элемент } a_{\eta L} \text{ входит в представление } a_i; \\ 0, & \text{если элемент } a_{\eta L} \text{ не входит в представление } a_i. \end{cases}$

Из (6) следует, что при известном $\eta_{\eta i} = \{h_{1i}, \; h_{2i}, \ldots, \; h_{si}\}$ формирование деления a_i сводится к сложению тех элементов набора $\{a_{\eta L}\}$, коэффициенты которых равны 1. При этом $h_{\eta i}$ есть не что иное, как i-я строка (длины s) матрицы (7). Табл. 1, 2 иллюстрируют примеры матриц (7). Строки матрицы (7), представляющие собой последовательности из 0 и 1, могут рассматриваться двояко. С одной стороны, они определяют и задают связи между элементами набора $\{a_{\eta L}\}$. Так, в (6) замена строки $h_{\eta i}$ на $h_{\eta j}$ приведет к тому, что вместо деления a_i будет сформировано деление a_j. С другой стороны, при известных значениях $a_{\eta L}$, $\eta = 1, 2, \ldots s$ они являются кодовыми значениями соответствующих делений шкалы, а следовательно, и выходной величины $\tilde{y}$ цифратора. Если, например, $\bar{h}_i$ — одно из значений величины $\tilde{y}$, то ему соответствует i-я строка матрицы (7), т. е. $h_{\eta i}$.

Формирование делений шкалы при измерении осуществляется в дискретные моменты (такты) времени $t=1, 2, \ldots, b$ в соответствии с принятым способом измерения. Необходимые при этом строки $h_{\eta i}$ формиру-

Таблица 1

	$a_{sL}\ldots$	a_{4L}	a_{3L}	a_{2L}	a_{1L}		$a_{sL}\ldots$	a_{4L}	a_{3L}	a_{2L}	a_{1L}
a_0	0...	0	0	0	0	a_5	0...	0	1	0	1
a_1	0...	0	0	0	1	a_6	0...	0	1	1	0
a_2	0...	0	0	1	0	a_7	0...	0	1	1	1
a_3	0...	0	0	1	1	a_8	0...	1	0	0	0
a_4	0...	0	1	0	0	a_9	0...	1	0	0	1
						...	...	...	...	...	...

ются с помощью операции $\Phi^{(h)}$. Эту операцию назовем операцией формирования кодовых значений делений шкалы.

В общем случае формирование кодовых значений может быть описано выражением

$$h_{\eta i}(t) = \hat{h}_{\eta i}(1) + \sum_{t=2}^{b} \hat{h}(t, P(t-1)), \qquad (8)$$

где $h_{\eta i}(t)$ — строка, сформированная в момент времени t;

$\hat{h}_{\eta i}(1)$ — строка, определяющая деление шкалы в момент начала измерения $(t=1)$;

$h(t, P(t-1))$ — двоичная последовательность длины s, зависящая как от текущего такта измерения t, так и от исхода операции сопоставления $P(y_x, a_i)$ на предыдущем такте.

Знак «+» в (8) обозначает алгебраическое сложение.

Таблица 2

	$a_{sL}\ldots$	a_{9L}	a_{8L}	a_{7L}	a_{6L}	a_{5L}	a_{4L}	a_{3L}	a_{2L}	a_{1L}
a_0	0 ...	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_1	0 ...	0	0	0	0	0	0	0	0	1
a_2	0 ...	0	0	0	0	0	0	0	1	0
a_3	0 ...	0	0	0	0	0	0	1	0	0
a_4	0 ...	0	0	0	0	0	1	0	0	0
a_5	0 ...	0	0	0	0	1	0	0	0	0
a_6	0 ...	0	0	0	1	0	0	0	0	0
a_7	0 ...	0	0	1	0	0	0	0	0	0
a_8	0 ...	0	1	0	0	0	0	0	0	0
a_9	0 ...	1	0	0	0	0	0	0	0	0
.	....	..	..	..	..	..	..	..	..	..
a_{K-1}	1 ...	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Количество различных h, используемых для формирования строк матрицы (7), во многих практических случаях удается сделать намного меньше количества строк этой же матрицы. Этим (8) напоминает формулу оператора переадресации, реализуемого в цифровых вычислительных машинах с целью экономичного использования ячеек памяти [5].

Объединим исходные данные $h_{\eta i}(1)$, $\hat{h}(t, P(t-1))$, $t = 1, 2, \ldots, b$, необходимые для осуществления операции $\Phi^{(h)}$, в набор $\{\hat{h}_\xi\}$, $\xi = 1, 2, \ldots, q$.

Итак, основными операциями автоматического измерения являются $P(y_x, a^i)$, $\Phi^{(a)}$ и $\Phi^{(h)}$. Они заданы на множестве элементов наборов: $\{y\}$, $\{a_{\eta L}\}$, $\{\hat{h}^\xi\}$. Здесь $\{y\}$ охватывает значения измеряемой величины y, изменяющейся в диапазоне от $y_{\min}$ до $y_{\max}$; $\{a_{\eta L}\}$ — набор значений величины a той же физической природы, что и измеряемая, а $\{\hat{h}\}$ — набор двоичных последовательностей длины s (в определенной системе кодирования могут рассматриваться как числа).

Все остальные операции, как например, операции возврата цифратора в исходное состояние (после предыдущего измерения), считывания численного значения измеряемой величины и т. п., при измерении играют вспомогательную роль, поэтому они не рассматриваются. Это отвечает целям настоящей работы, поскольку выявление основных операций и элементов автоматического измерения есть выяснение наиболее общих и существенных закономерностей строения и функционирования цифраторов. Именно поэтому нами не принимаются во внимание и погрешности формирования делений шкалы, погрешности выполнения операции сопоставления, погрешности, вызванные сторонними возмущениями, и т. д. Предполагается, что в процессе дальнейшего изучения конкретных типов цифраторов опущенные особенности могут быть проанализированы и учтены в моделях этих устройств.

Покажем теперь, что элементы указанных наборов могут быть использованы для построения модели универсального цифратора, от которой (в случае необходимости) можно перейти к моделям конкретных типов цифраторов.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЦИФРАТОРА

Обобщим основные операции автоматического измерения на случай, когда одновременному сопоставлению с измеряемой величиной может подвергаться μ делений шкалы.

Пусть $H = \{a_r, a_c, a_l, \ldots, a_\rho\}$ — набор из $\mu (\mu \leqslant k-1)$ произвольно выбранных делений шкалы, для которых выполнено условие

$$a_r < a_c < a_l < \ldots < a \quad . \tag{9}$$

Тогда набор $\{a_i\}$ окажется разбитым на $\mu + 1$ подмножеств:

$$A_{0,\, r-1},\ A_{r,\, c-1},\ A_{c,\, l-1},\ \ldots,\ A_{\rho,\, k-1}$$

с числом элементов, равным соответственно $r-1$, $c-r-1$, $l-c-1, \ldots, k-\rho-1$.

Если теперь $y_x \in (y_{\min} \div y_{\max})$, а Y_i— искомый полуинтервал, то операция сопоставления может быть определена следующим образом:

Таблица 3

Операция	Исходы операции	Условия существования исходов	Количество исходов	
$P(y_x, H) =$	P_0	Если Y_i находится в подмножестве $A_{0,r-1}$, т. е. $a_0 \leqslant y_x < a_r$	$\mu + 1$ $(\sigma = 0, 1, \ldots, \mu)$	(10)
	P_1	Если Y_i находится в подмножестве $A_{r,c-1}$, т. е. $a_r < y_x < a_c$		
	$\ldots$	$\ldots\ldots\ldots\ldots$		
	P_μ	Если Y_i находится в подмножестве $A_{\rho,\kappa-1}$, т. е. $a_\rho \leqslant y_x < a_\kappa$		

В случае $\mu = k - 1$ в состав H войдут все элементы (за исключением $a_0 = 0$) набора $\{a_i\}$. Поэтому полуинтервал Y_i отыскивается в течение одного такта работы цифратора $(t = b = 1)$. Если же $\mu < k - 1$, то Y_i отыскивается в течение $b > 1$ тактов $(t = 1, 2, \ldots, b)$.

Формирование μ делений шкалы, входящих в набор H, осуществляется с помощью операций $\Phi_H^{(a)}$ и $\Phi_H^{(h)}$. Предположим, что для этой цели используется μ независимых наборов $\{a_{\eta L_1}\}$, $\{a_{\eta L_2}\}, \ldots, \{a_{\eta L_\mu}\}$ и μ соответствующих им наборов $\{\hat{h}_{\xi_1}\}$, $\{\hat{h}_{\xi_2}\}, \ldots, \{\hat{h}_{\xi_\mu}\}$. Тогда каждое деление набора H можно формировать независимо от других. Кодовые и вещественные значения делений шкалы формируются в соответствии с (8) и (6). Это дает основание операции $\Phi_H^{(h)}$ и $\Phi_H^{(a)}$ представить в следующем виде:

$$\Phi_H^{(h)} \left\{ \triangleq \begin{array}{l} h_{\eta r}(t) = \hat{h}_{\eta r}(1) + \sum\limits_{t=2}^{b} \hat{h}_r(t, P_\sigma(t-1)) \\ h_{\eta c}(t) = \hat{h}_{\eta c}(1) + \sum\limits_{t=2}^{b} \hat{h}_c(t, P_\sigma(t-1)) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ h_{\eta\rho}(t) = \hat{h}_{\eta\rho}(1) + \sum\limits_{t=2}^{b} \hat{h}_\rho(t, P_\sigma(t-1)) \end{array} \right. \tag{11}$$

$$\Phi_H^{(a)} \left\{ \triangleq \begin{array}{l} a_r(t) = h_{1r}a_{1L_1} + h_{2r}a_{2L_1} + \ldots + h_{s_1 r}a_{s_1 L_1}, \\ a_c(t) = h_{1c}a_{1L_2} + h_{2c}a_{2L_2} + \ldots + h_{s_2 c}a_{s_2 L_2}, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ a_\rho(t) = h_{1\rho} \cdot a_{1L_\mu} + h_{2\rho}a_{2L_\mu} + \ldots + h_{s_\mu \rho}a_{s_\mu L_\mu}, \end{array} \right. \tag{12}$$

где $\{a_{\eta L_1}\} = \{a_{1L_1}, a_{2L_1}, \ldots, a_{s_1 L_1}\}$, $\{\hat{h}_{\xi_1}\} = \{\hat{h}_{1\xi_1}, \hat{h}_{2\xi_1}, \ldots, \hat{h}_{q_1 \xi_1}\}$;

$\{a_{\eta L_2}\} = \{a_{1L_2}, a_{2L_2}, \ldots, a_{s_2 L_2}\}$, $\{\hat{h}_{\xi_2}\} = \{\hat{h}_{1\xi_2}, \hat{h}_{2\xi_2}, \ldots, \hat{h}_{q_2 \xi_2}\}$;

$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$

$\{a_{\eta L_\mu}\} = \{a_{1L_\mu}, a_{2L_\mu}, \ldots, a_{s_\mu L_\mu}\}$, $\{\hat{h}_{\xi_\mu}\} = \{\hat{h}_{1\xi_\mu}, \hat{h}_{2\xi_\mu}, \ldots, \hat{h}_{q_\mu \xi_\mu}\}$;

$$h_{\eta r}(t) = \{h_{1r}, h_{2r}, \ldots, h_{s_1 r}\};$$
$$h_{\eta c}(t) = \{h_{1c}, h_{2c}, \ldots, h_{s_2 c}\};$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$h_{\eta\rho}(t) = \{h_{1\rho}, h_{2\rho}, \ldots, h_{s_\mu \rho}\}.$$

Общее число элементов, необходимых для выполнения операций $\Phi_H^{(h)}$ и $\Phi_H^{(a)}$ определяется по

$$\pi = q + s, \tag{13}$$

где

$$q = q_1 + q_2 + \ldots + q_\mu, \tag{14}$$

($q_1, q_2, \ldots, q_\mu$ — числа элементов, составляющих соответственно наборы $\{\hat{h}_{\xi_1}\}, \{\hat{h}_{\xi_2}\}, \ldots, \{\hat{h}_{\xi_\mu}\}$),

$$s = s_1 + s_2 + \ldots + s_\mu \tag{15}$$

($s_1, s_2, \ldots, s_\mu$ — числа элементов, составляющих соответственно наборы $\{a_{\eta L_1}\}, \{a_{\eta L_2}\}, \ldots, \{a_{\eta L_\mu}\}$).

В (11) и (12) в качестве переменного параметра входит время t. Это означает, что в общем случае набор H с течением времени может изменяться как по составу, так и по количеству входящих в него элементов. Помимо этого, выбор набора в текущий момент зависит от исхода операции сопоставления в предыдущий момент. Отмеченное наглядно иллюстрируется диаграммой с разветвленной структурой (рис. 2), где приведены наборы начальных тактов работы цифратора и указаны условия перехода от наборов предыдущего такта к наборам текущего такта.

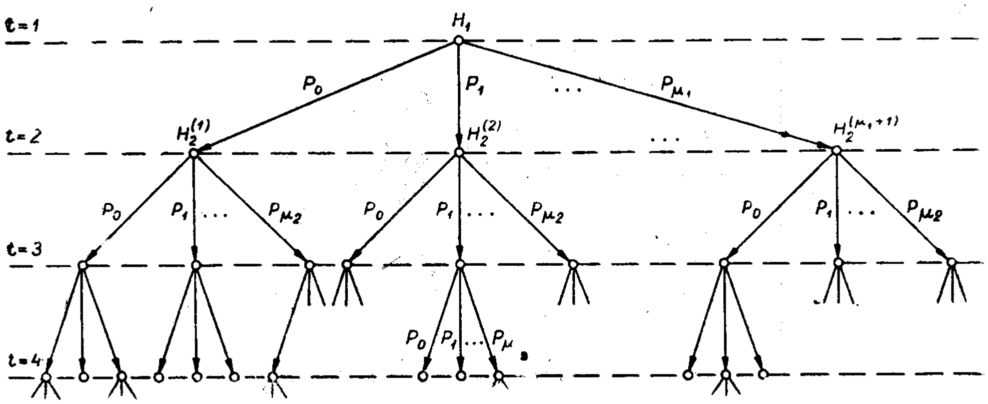

Рис. 2.

Согласно приведенному ранее описанию, при выполнении операции $\Phi_H^{(h)}$ используются исключительно двоичные последовательности. Поэтому в тех практических случаях, когда цифратор работает совместно с цифровой вычислительной машиной, целесообразно функции формирования кодовых значений делений шкалы, а также хранения элементов наборов $\{\hat{h}_{\xi_1}\}, \{\hat{h}_{\xi_2}\}, \ldots, \{\hat{h}_{\xi_\mu}\}$ передать машине. При этом конструкцию цифратора можно существенным образом упростить.

Итак, моделью универсального цифратора назовем объект V_y, функционирование которого описывается выражениями (10), (11), (12).

выходящие из квадратов стрелки обозначают переменные, которые являются результатом выполнения той или иной операции. Привлекает внимание замкнутость связей между (10), (11), (12). Это свидетельст-

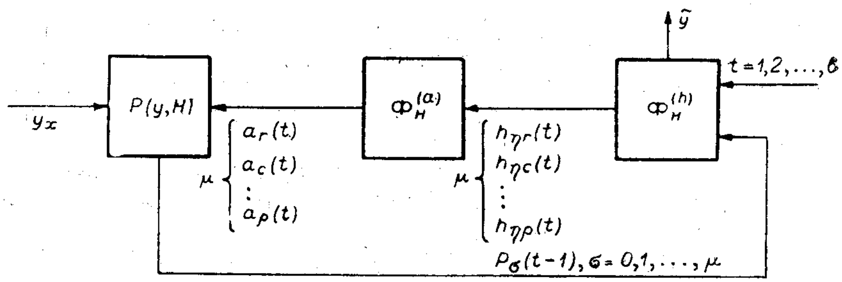

Рис 3.

вует о том, что настоящая модель является динамическим объектом с обратной связью. Указанная связь на рис. 3 выделена жирной линией.

Если V_y — модель универсального цифратора, то объединенное множество элементов

$$R = \left\{\{a_{\eta L_1}\},\ \{a_{\eta L_2}\},\ \ldots,\ \{a_{\eta L_\mu}\};\ \{\hat{h}_{\xi_1}\},\ \{\hat{h}_{\xi_2}\},\ \ldots,\ \{\hat{h}_{\xi_\mu}\}\right\}$$

по отношению к рассматриваемому классу устройств является искомым набором элементов.

Исходя из способов и характера связей между элементами набора R, отметим основные признаки рассматриваемого нами класса устройств. Выражение (11) описывает способ взаимодействия элементов наборов $\{\hat{h}_{\xi_1}\}, \{\hat{h}_{\xi_2}\}, \ldots, \{\hat{h}_{\xi_\mu}\}$ (алгебраическое сложение элементов наборов). Выражение (12) описывает, с одной стороны, способ взаимодействия элементов наборов $\{a_{\eta L_1}\}, \{a_{\eta L_2}\}, \ldots, \{a_{\eta L_\mu}\}$ (сложение элементов наборов), с другой — способ взаимодействия элементов наборов $\left\{\{a_{\eta L_1}\}, \{\hat{h}_{\xi_1}\}\right\}, \left\{\{a_{\eta L_2}\}, \{\hat{h}_{\xi_2}\}\right\}, \ldots, \left\{\{a_{\eta L_\mu}\}, \{\hat{h}_{\xi_\mu}\}\right\}$. (Если $h_{\eta r}, h_{\eta c}, \ldots, h_{\eta\rho}$ и $a_{\eta L_1}, a_{\eta L_2}, \ldots, a_{\eta L_\mu}$ представить в качестве векторов в s-мерном пространстве, то правые части (12) — скалярные произведения векторов $(h_{\eta r}, a_{\eta L_1}), (h_{\eta c}, a_{\eta L_2}), \ldots, (h_{\eta\rho}, a_{\eta L_\mu})$.

Далее, из (11), (12) следует детерминированный характер изменения связей. Таким образом, указанные способы связей элементов, а также детерминированный характер работы — важнейшие признаки рассматриваемых нами цифраторов.

Укажем параметры, характеризующие с количественной стороны структуру модели универсального цифратора:

1. Параметр q. Характеризует общее количество элементов, составляющих наборы $\{\hat{h}_{\xi_1}\}, \{\hat{h}_{\xi_2}\}, \ldots, \{\hat{h}_{\xi_\mu}\}$. Определяется по (14).

2. Параметр s. Характеризует общее количество элементов, составляющих наборы $\{a_{\eta L_1}\}, \{a_{\eta L_2}\}, \ldots; \{a_{\eta L_\mu}\}$. Определяется по (15).

3. Параметр n. Характеризует общее количество элементов модели. Определяется по (13).

4. Параметр k. Характеризует одновременно число делений шкалы, число строк матрицы (7), а следовательно, и число возможных состояний модели.

ВЫВОДЫ

Набор элементов, полученный в результате обобщенного анализа автоматического измерения, удовлетворяет требованию общности применения и может быть использован для построения моделей, воспроизводящих наиболее существенные закономерности строения и функционирования широкого класса цифраторов.

Полученные представления о структуре модели универсального цифратора использованы автором при количественной оценке сложности цифраторов различных типов.

В заключение автор выражает благодарность д-ру техн. наук М. П. Цапенко, канд. техн. наук А. Н. Касперовичу и канд. техн. наук Б. В. Карпюку за ценные замечания, высказанные в процессе выполнения данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Karl Euler. Neue Prinzipien zur Analog-Digital-Umwandlung und deren optimale Auslegung. Frequenz, 1963, 17, № 10.
2. Э. И. Гитис, Е. Г. Пронин. Обобщенные характеристики многоканального полупроводникового преобразователя напряжения в код с поразрядным кодированием. ИВУЗ, Приборостроение, 1964, № 2.
3. М. П. Цапенко. О классификации цифровых измерительных приборов. Измерительная техника, 1962, № 5.
4. М. Ф. Маликов. Основы метрологии, ч. 1. М., Изд-во Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1949.
5. Н. А. Криницкий, Г. А. Миронов, Г. Д. Фролов. Программирование. Справочная математическая библиотека. М., Физматгиз, 1963.

Поступила в редакцию
23 сентября 1964 г.