АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 5 1969

ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.20

И. Я. КОРЧАГИН, Б. Г. МАТИЕНКО
(*Новосибирск*)

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ И СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С УПРАВЛЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ

Под устройством с управляемой структурой (УУС) понимаются различные по своему назначению и характеристикам цифровые приборы, аналого-цифровые преобразователи и другие дискретные измерительные устройства и системы, способные автоматически изменить алгоритмы своей работы. В настоящее время сделаны лишь первые шаги в теории и практике подобных средств измерения [1, 2]. Интерес к ним вызван прежде всего тем, что с помощью устройств такого класса можно построить более эффективные средства измерения и контроля, чем существующие сейчас. Так, за счет возможности автоматического выбора в каждом случае наиболее рационального для данной измеряемой величины алгоритма уравновешивания, шага квантования по уровню, времени, пространству можно ожидать увеличения быстродействия, помехоустойчивости и точности.

Обобщенная блок-схема УУС представлена на рис. 1. Она включает в себя операционный блок (S_v), или собственно управляемую структуру, и устройство управления структурой (блок T). Управляемой структурой последовательно реализуется конечное множество известных функций (операторов, алгоритмов) $\Phi = \{F_1, \ldots, F_j, \ldots, F_m\}$ ($m \geqslant 2$) [3]. Порядок реализации функций из множества Φ может быть жестким или адаптивным. Задается он алгоритмом блока $T(\varphi_T)$, с помощью которого вырабатывается последовательность двоичных управляющих воздействий $U_j(\tau)$, где выполнению каждой функции $F_j \in \Phi$ в S_v сопоставлен свой сигнал управления. Конкретный вид функции φ_T зависит от типа УУС, характера решаемой задачи и поэтому здесь не уточняется. Однако всегда в

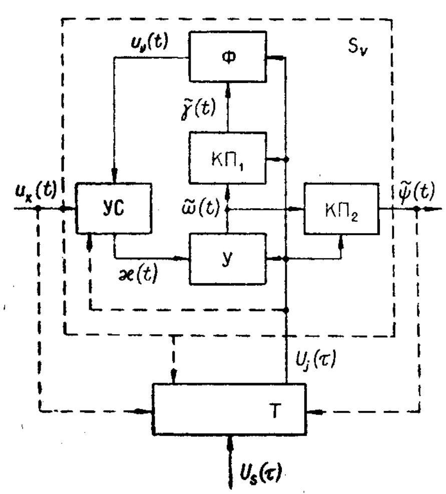


Рис. 1.

управляемой структуре в дискретном времени $\tau=1, 2, 3, \ldots$, моменты которого называют тактами перестройки, реализуется какая-либо одна функция $F_j \in \Phi$ и в силу этого на сигналы $U_j(\tau)$ накладываются два ограничения:

$$\bigvee_{j=1}^{m} U_j(\tau) = 1 \quad (1a);$$

$$\bigvee_{j \neq \lambda} U_j(\tau) \wedge U_\lambda(\tau) = 0 \quad (1б),$$

где $j, \lambda \in \{1, 2, \ldots, m\}$.

Управляемая структура цифровых измерительных устройств (ЦИУ) состоит из устройства сравнения (УС) (группы УС), блока формирования образцовых величин (Ф) (преобразователя «код — аналог»), местного многотактного устройства управления (У) и связанных с ним однотактных кодовых преобразователей (блоки $КП_1$ и $КП_2$). Под воздействием сигналов управления, вырабатываемых в блоке T, может изменяться функционирование любого из упомянутых устройств. В [4] было показано, что совокупность многотактных блоков в ЦИУ можно описать конечными автоматами. Для описания этих же блоков в управляемой структуре естественно привлечь более общие модели — автоматы с перестройкой.

Ниже приводятся функции переходов (2) и выходов (3) блока У при описании его автоматом Мура с перестройкой, дополненные уравнениями для выходных преобразователей $КП_1$ (4) и $КП_2$ (5) и функцией, реализуемой блоком Ф (6):

$$\tilde{a}(t+1) = f_1[\tilde{a}(t), \tilde{\varkappa}(t), U_j(\tau)]; \quad (2)$$

$$\tilde{\omega}(t) = f_2[a(t)]; \quad (3)$$

$$\tilde{\gamma}(t) = f_3[\tilde{\omega}(t), U_j(\tau)]; \quad (4)$$

$$\tilde{\psi}(t) = f_4[\tilde{\omega}(t), U_j(\tau)]; \quad (5)$$

$$\tilde{V}_\nu(t) = f_5[\tilde{\gamma}(t), U_j(\tau)]. \quad (6)$$

В функциях (2)—(6) $\tilde{a} \in \tilde{A}$, где $\tilde{A}$ — алфавит внутренних состояний блока У; $\tilde{\varkappa} \in \tilde{K}$, где $\tilde{K}$ — выходной алфавит блока УС; $U_j \in \tilde{R}$, где $\tilde{R}$ — выходной алфавит блока Т; $\tilde{\omega} \in \tilde{\Omega}$, где $\tilde{\Omega}$ — выходной алфавит блока У; $\tilde{\gamma} \in \tilde{\Gamma}$ — множество кодированных значений шкалы [5], вырабатываемое цифровой частью УУС; $\tilde{\psi} \in \tilde{\Psi}$, где $\tilde{\Psi}$ — множество значений результатов измерений; $\tilde{V}_\nu \in \tilde{B}$, где $\tilde{B}$ — множество вещественных значений шкалы [5] (множество значений образцовых величин), вырабатываемое управляемой структурой; t — моменты дискретного времени, не совпадающие в общем случае с такими τ. Множества $\tilde{A}$, $\tilde{K}$, R, $\tilde{\Omega}$, $\tilde{\Gamma}$, $\tilde{\Psi}$, $\tilde{B}$ конечны.

Общий смысл функций (2)—(6) в том, что для каждого $U_j(\tau)$ они имеют, вообще говоря, свой вид*. Это обстоятельство существенно от-

* В частных случаях эта зависимость может иметь место лишь для некоторых значений индекса j.

личает их от аналогичных функций, используемых для блочного описания ЦИУ обычного типа [4]. Поэтому для решения задач синтеза управляемой структуры необходимо рассмотреть методы описания и на их основе разработать методику проектирования блоков с управляемой структурой. Данная работа посвящена рассмотрению особенностей описания и структурного синтеза многотактных блоков цифровых измерительных устройств с управляемой структурой.

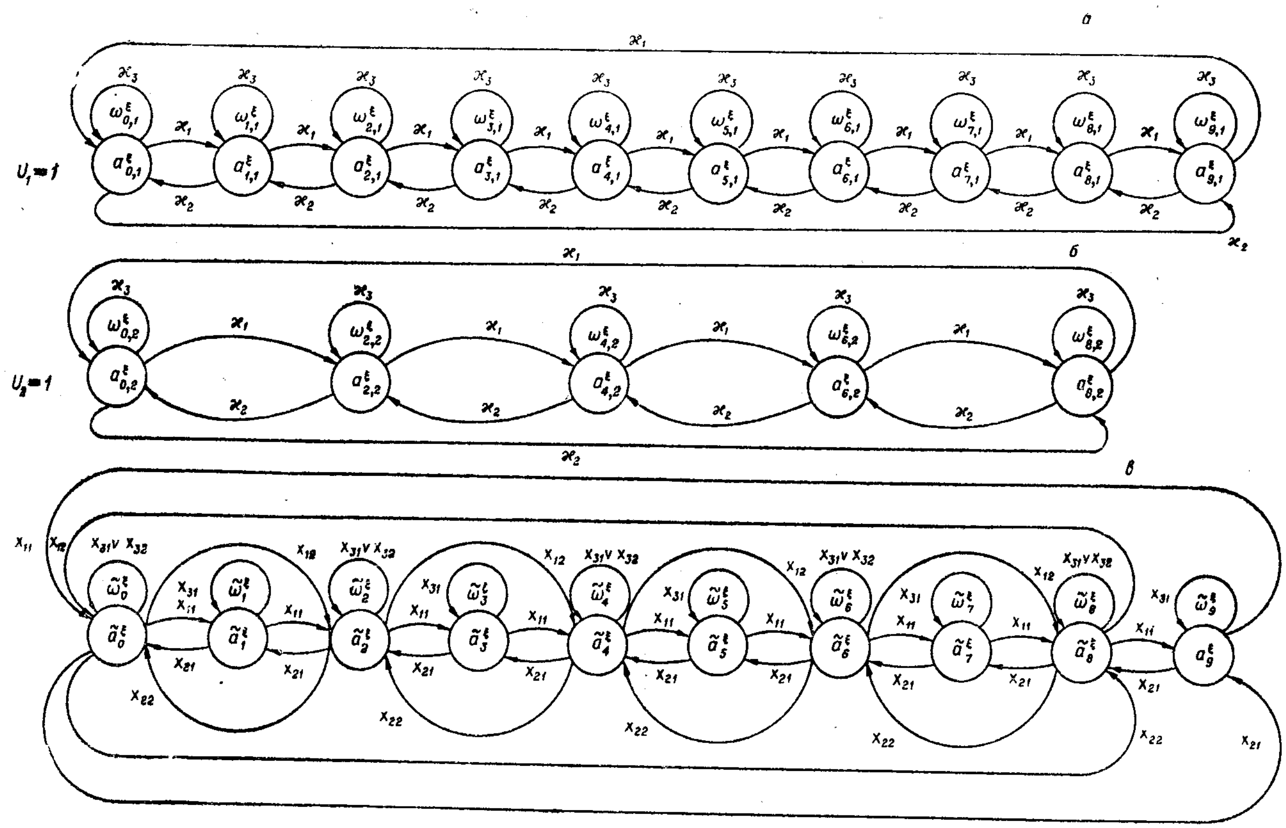
Для многотактных устройств задача синтеза формулируется следующим образом: заданы автоматно полный набор элементов и конечное множество известных алгоритмов измерения $\Phi = \{F_1, \ldots, F_m\}$; требуется найти минимальную по числу используемых элементов структуру многотактного устройства (блок У на рис. 1), которая под воздействием внешних сигналов $U_j \in R$ позволяет последовательно реализовать любой алгоритм $F_j \in \Phi$.

Для проведения структурного синтеза необходимо располагать описанием алгоритма работы соответствующего многотактного устройства, выполненным в какой-либо стандартной форме (графической, аналитической, в операторном виде и т. д.).

Рассмотрим на конкретном примере построение диаграммы переходов автомата Мура с перестройкой. Пусть $\Phi = \{F_1, F_2\}$ $(m=2)$, причем $K_1 \equiv K_2 \equiv \{\varkappa_1, \varkappa_2, \varkappa_3\}$, где $\varkappa_1 = 1$ при $u_x(t) > u_\text{v}(t)$, $\varkappa_2 = 1$ при $u_x(t) < u_\text{v}(t)$, а $\varkappa_3 = 1$ при $u_x(t) = U_\text{v}(t)$. На рис. 2, *а, б* представлены соответственно диаграммы переходов ζ-й декады устройства управления цифрового прибора следящего типа с обычным (F_1) и удвоенным (F_2) шагом квантования по уровню. Каждому состоянию диаграммы a_{ij}^ζ соответствует значение образцовой величины, равное $10^{\zeta-1} \cdot i\Delta$ [4], где Δ — шаг квантования по уровню; $\zeta = 1, 2, \ldots, M$; M — число декад, а $i = 0, 1, 2, \ldots, 9$. Пусть при $U_1(\tau) = 1$ рассматриваемая декада работает по алгоритму F_1 (см. рис. 2, *а*), а при $U_2(\tau) = 1$ — по алгоритму F_2 (см. рис. 2, *б*).

Диаграмма переходов соответствующего автомата с перестройкой представлена на рис. 2, *в*. Входным алфавитом является $x = \{\varkappa_1 \Lambda U_1, \varkappa_2 \Lambda U_1, \varkappa_3 \Lambda U_1, \varkappa_1 \Lambda U_2, \varkappa_2 \Lambda U_2, \varkappa_3 \Lambda U_2\} = \{x_{11}, x_{21}, \ldots, x_{32}\}$, $\widetilde{\Omega} = \{\widetilde{\omega}_0^\zeta, \widetilde{\omega}_1^\zeta, \ldots, \widetilde{\omega}_9^\zeta\}$, где по вырабатываемым значениям образцовых величин эквивалентны выходные сигналы: $\widetilde{\omega}_0^\zeta \sim \omega_{0,1}^\zeta \sim \omega_{0,2}^\zeta$, $\widetilde{\omega}_1^\zeta \sim \omega_{1,1}^\zeta$, $\widetilde{\omega}_2^\xi \sim \omega_{2,1}^\zeta \sim \omega_{2,2}^\zeta, \ldots, \widetilde{\omega}_9^\zeta \sim \omega_{9,1}^\zeta$. Аналогично алфавитом внутренних состояний рассматриваемого автомата является $\widetilde{A} = \{\widetilde{a}_0^\zeta, \widetilde{a}_1^\zeta, \ldots, \widetilde{a}_9^\zeta\}$, где эквивалентными (по отметкам ω_{ij}^ζ) являются внутренние состояния $\widetilde{a}_0^\zeta \sim a_{0,1}^\zeta \sim a_{0,2}^\zeta$, $\widetilde{a}_1^\zeta \sim a_{1,1}^\zeta, \ldots, \widetilde{a}_9^\zeta \sim a_{9,1}^\zeta$

По отношению к автоматам, реализующим отображения (алгоритмы измерения) $F_1, \ldots, F_m$ автомат, заданный на конечных множествах $\widetilde{X}, \widetilde{A}, \widetilde{\Omega}$, является эквивалентно продолжающим [6]. Таблица переходов (и выходов) такого автомата содержит в себе как составные части таблицы автоматов, реализующих алгоритмы $F_1, \ldots, F_m$. Таким образом, используя ограничения (1а), (1б), задание автоматов с перестройкой удается свести к автоматам Мура (Мура — Мили) с обычными (не варьируемыми по j) функциями переходов и выходов. Так, вместо автомата Мура с функцией переходов (2), рассматривается обычный автомат Мура с функцией переходов $\widetilde{a}(t+1) = f[\widetilde{a}(t), \widetilde{x}(t)]$, где $\widetilde{a} \in \widetilde{A}$; $\widetilde{x} \in \widetilde{X} = \bigcup_{j=1}^{m} k_j \wedge u_j$.



$x_{11}=\varkappa_1\wedge U_1$; $x_{21}=\varkappa_2\wedge U_1$; $x_{31}=\varkappa_3\wedge U_1$; $x_{12}=\varkappa_1\wedge U_2$; $x_{22}=\varkappa_2\wedge U_2$; $x_{32}=\varkappa_3\wedge U_2$

Рис. 2.

Структурный синтез последнего осуществляется технически с помощью тех же приемов [6, 7], которые используются при структурном синтезе многотактных блоков ЦИУ обычного типа [4].

Главная особенность задачи структурного синтеза устройств управления с изменяемым алгоритмом работы заключается в характере функций возбуждения элементов памяти (ЭП), зависящих, в частности, от целочисленного аргумента j. Например, при синтезе УУС, описываемых автоматами Мура, функции возбуждения принимают соответственно следующий вид:

$$q_{\mu}(t) = f_{\mu}^{\mathrm{I}}[x_1(t), \ldots, x_l(t), \widetilde{\psi}_0(t), \ldots, \widetilde{\psi}_{\widetilde{N}-1}(t), j], \tag{7а}$$

или

$$q_{\mu}(t) = f_{\mu}^{\mathrm{II}}[x_1(t), \ldots, x_l(t), Q_1, \overline{Q}_1(t), \ldots, \overline{Q}_k(t), j], \tag{7б}$$

где $\widetilde{\psi}_0, \ldots, \widetilde{\psi}_{\widetilde{N}-1}$ — выходные сигналы дешифратора триггерного регистра, имеющего $\widetilde{N}$ возможных внутренних состояний; $Q_1, \overline{Q}_1, \ldots, \overline{Q}_k$ — потенциальные выходные сигналы ЭП регистра; $k = \log_2]\widetilde{N}[$; $\mu \in \{1, 2, \ldots, \rho_0\}$; $\rho_0 = ck$ — суммарное число входов k элементов памяти.

В функциях (7а), (7б) переменные $x_1, \ldots, x_l\ \widetilde{\psi}_0, \ldots, \widetilde{\psi}_{\widetilde{N}-1}$ подчинены ограничениям вида (2а), (2б) и являются двоичными. Так как в этом случае аргументы $x_1, \ldots, x_l$, $\psi_0, \ldots, \widetilde{\psi}_{\widetilde{N}-1}$, $Q_1, \ldots, Q_k$ и сами функции (7а), (7б) принимают в качестве своих значений только 0 или 1, а j — любые целочисленные значения от 1 до m включительно, то функции $f_{\mu}^{\mathrm{I}}[\ldots]$, $f_{\mu}^{\mathrm{II}}[\ldots]$, по определению [8], являются временными булевыми функциями (ВБФ)*.

Если придать j некоторое фиксированное значение из $\{1, 2, \ldots, m\}$, то функции (7а), (7б) примут обычный вид [8]. Заставляя j пробегать всю область допустимых значений $1, 2, \ldots, m$, получим соответственно последовательность обычных функций возбуждения ЭП. Учитывая определение сигналов управления $U_j(\tau)$ и наложенные на эти сигналы ограничения (1а), (1б), функции возбуждения ЭП вида (7а), (7б) можно записать в так называемой совершенной дизъюнктивной форме ВБФ [8], имеющей в рассматриваемом случае следующий вид:

$$q_{\mu}(t) = f_{\mu_1}^{\alpha}[\ldots] \wedge U_1(\tau) \vee f_{\mu_2}^{\alpha}[\ldots] \wedge U_2(\tau) \vee \ldots$$
$$\ldots \vee f_{\mu j}^{\alpha}[\ldots] \wedge U_j(\tau) \vee \ldots \vee f_{\mu m}^{\alpha}[\ldots] \wedge U_m(\tau), \tag{8}$$

где $f_{\mu j}^{\alpha}[\ldots]$ — функция возбуждения ЭП для j-го алгоритма измерения; $\alpha \in \{\mathrm{I}, \mathrm{II}\}$.

Таким образом, задача структурного синтеза устройств управления измерительных УУС, описываемых автоматами Мура, сводятся к получению по кодированным таблицам системы ВБФ вида (8) и к минимизации полученной системы функций.

К аналогичной задаче сводится проблема синтеза однотактных кодовых преобразователей: функции $f_{\mu j}^{\mathrm{I}}[\ldots]$ в (8) при этом имеют более частный вид.

При синтезе на ЭП, описываемых автоматами Мура — Мили для k-разрядных асинхронных регистров на первом этапе требуется по-

---

* В отличие от обычных булевых функций n переменных $f(x_1, \ldots, x_n)$ ВБФ $f(x_1, \ldots, x_n, j)$ определены на $m \cdot 2^n$ наборах.

лучить ρ_0 функций возбуждения вида (8), где в качестве $f_{\mu j}$ [. . .] выступают формулы типа (7а) или (7б), зависящие также и от выходных импульсных сигналов $p_{\rho *}$, $r_{\rho *}$, т. е. и в этом случае мы приходим к необходимости минимизации системы ВБФ.

Задача оптимальной минимизации системы ВБФ в математическом плане не решена, потому что не известен эффективный алгоритм для минимизации системы булевых функций обычного, не временного типа. Отсутствие эффективного алгоритма минимизации систем ВБФ приводит к необходимости осуществлять структурный синтез многоактных и одноактных блоков, как правило, в два этапа.

На первом этапе каждая ВБФ вида (8) минимизируется отдельно. На втором этапе отыскиваем вариант бесповторной схемы логического многополюсника. Эта схема касается ВБФ в классе функций (7б) (и аналогичных функций с $p_{\rho *}$, $r_{\rho *}$ при синтезе на ЭП, описываемых как элементарные автоматы (ЭА) Мура — Мили). В классе функций (7а) второй этап является единственным средством упрощения полученной системы.

В классе функций (7б) можно указать на два подхода к минимизации ВБФ. При первом подходе каждая функция $f_{\mu j}^{\text{II}}$ [. . .] минимизируется отдельно, и поэтому не приводит к получению абсолютно минимальных схем [8], хотя позволяет проводить синтез автоматов с довольно большим числом внутренних состояний. При втором подходе функции возбуждения ЭП вида (8) записываются по кодированной таблице эквивалентно продолжающего автомата в совершенной дизъюнктивной форме ВБФ, которые затем и подвергаются минимизации. При этом можно получить абсолютно минимальное выражение для каждой функции. Однако сам процесс синтеза более трудоемкий за счет того, что одновременно рассматривается бóльшая по размерам кодированная таблица и бóльшее число двоичных переменных.

Таблица 1

Выходной сигнал	$\tilde{\omega}^{\xi}$	$\tilde{\omega}_1^{\xi}$	$\tilde{\omega}_2^{\xi}$	$\tilde{\omega}_3^{\xi}$	$\tilde{\omega}_4^{\xi}$	$\tilde{\omega}_5^{\xi}$	$\tilde{\omega}_6^{\xi}$	$\tilde{\omega}_7^{\xi}$	$\tilde{\omega}_8^{\xi}$	$\tilde{\omega}_9^{\xi}$
Состояние / Выходной сигнал	$\tilde{a}_0^{\xi}$	$\tilde{a}_1^{\xi}$	$\tilde{a}_2^{\xi}$	$\tilde{a}_3^{\xi}$	$\tilde{a}_4^{\xi}$	$\tilde{a}_5^{\xi}$	$\tilde{a}_6^{\xi}$	$\tilde{a}_7^{\xi}$	$\tilde{a}_8^{\xi}$	$\tilde{a}_9^{\xi}$
$x_{11} = x_1 \wedge U_1$	$\tilde{a}_1^{\xi}$	$\tilde{a}_2^{\xi}$	$\tilde{a}_3^{\xi}$	$\tilde{a}_4^{\xi}$	$\tilde{a}_5^{\xi}$	$\tilde{a}_6^{\xi}$	$\tilde{a}_7^{\xi}$	$\tilde{a}_8^{\xi}$	$\tilde{a}_9$	$\tilde{a}_0^{\xi}$
$x_{21} = x_2 \wedge U_1$	$\tilde{a}_9^{\xi}$	$\tilde{a}_0^{\xi}$	$\tilde{a}_1^{\xi}$	$\tilde{a}_2^{\xi}$	$\tilde{a}_3^{\xi}$	$\tilde{a}_4^{\xi}$	$\tilde{a}_5^{\xi}$	$\tilde{a}_6^{\xi}$	$\tilde{a}_7^{\xi}$	$\tilde{a}_8^{\xi}$
$x_{31} = x_3 \wedge U_1$	$\tilde{a}_0^{\xi}$	$\tilde{a}_1^{\xi}$	$\tilde{a}_2^{\xi}$	$\tilde{a}_3^{\xi}$	$\tilde{a}_4^{\xi}$	$\tilde{a}_5^{\xi}$	$\tilde{a}_6^{\xi}$	$\tilde{a}_7^{\xi}$	$\tilde{a}_8^{\xi}$	$\tilde{a}_9^{\xi}$
$x_{12} = x_1 \wedge U_2$	$\tilde{a}_2^{\xi}$	—	$\tilde{a}_4^{\xi}$	—	$\tilde{a}_6^{\xi}$	—	$\tilde{a}_8^{\xi}$	—	$\tilde{a}_0^{\xi}$	—
$x_{22} = x_2 \wedge U_2$	$\tilde{a}_8^{\xi}$	—	$\tilde{a}_0^{\xi}$	—	$\tilde{a}_2^{\xi}$	—	$\tilde{a}_4^{\xi}$	—	$\tilde{a}_6^{\xi}$	—
$x_{32} = x_3 \wedge U_2$	$\tilde{a}_0^{\xi}$	—	$\tilde{a}_2^{\xi}$	—	$\tilde{a}_4^{\xi}$	—	$\tilde{a}_6^{\xi}$	—	$\tilde{a}_8^{\xi}$	—

Примечание. „—“ запрещенные переходы.

Применение каждого из упомянутых выше подходов к синтезу цифровой части измерительных УУС определяется объемом и условиями задачи. При синтезе цифровых измерительных приборов (при небольших значениях m) оказывается возможным выполнить минимизацию ВБФ по второму методу.

Рассмотрим на примере особенности минимизации функций возбуждения при структурном синтезе измерительных УУС. Будем решать задачу структурного синтеза декады следящего прибора с изменяемым законом функционирования (см. рис. 2, *в*).

Табл. 1 является отмеченной таблицей переходов рассматриваемого автомата. Будем считать, что коды блока формирования образцовой величины Ф и регистра совпадают (используется взвешенный двоично-десятичный код 4221). В таком случае табл. 2 задает необходимые варианты кодирования $\tilde{a}_i^{\xi}$, а табл. 3 является кодированной таблицей переходов рассматриваемого автомата. В качестве ЭП используются триггеры со счетным импульсным входом $q_{s\rho}$ (здесь $\rho=1, 2, 3, 4$), имеющие два потенциальных $(Q_\rho, \bar{Q}_\rho)$ и два импульсных (p_ρ, r_ρ) выхода. Триггеры такого типа являются элементарными (два внутренних состояния) автоматами Мура — Мили.

Таблица 2

	4	2	2	1
$\tilde{a}_0^{\xi}$	0	0	0	0
$\tilde{a}_1^{\xi}$	0	0	0	1
$\tilde{a}_2^{\xi}$	0	0	1	0
$\tilde{a}_3^{\xi}$	0	0	1	1
$\tilde{a}_4^{\xi}$	0	1	1	0
$\tilde{a}_5^{\xi}$	0	1	1	1
$\tilde{a}_6^{\xi}$	1	0	1	0
$\tilde{a}_7^{\xi}$	1	0	1	1
$\tilde{a}_8^{\xi}$	1	1	1	0
$\tilde{a}_9^{\xi}$	1	1	1	1

Запись функций возбуждения ЭП осуществляется по кодированной таблице. При этом требуется [7], чтобы на всех наборах $x(t)\, Q_1(t) \ldots Q_k(t)$ множество значений функций возбуждения $q_{s\rho}$ совпадало бы с множеством значений, принимаемых каким-либо набором импульсных сигналов $p_{\rho*}(r_{\rho*})$, каждый из которых снимается с выхода соответствующего ЭП регистра $(\rho^* \in \{\rho+1, \rho+2, \ldots, \rho^\bullet\};$ $\rho = 1, 2, \ldots, \rho_0;$ $\rho_0 = ck;$ здесь $c=1$, $k=4)$.

В рассматриваемом случае функции возбуждения записываются следующим образом*:

$$q_{s1} = [x_{11}(\tilde{\psi}_5 \vee \tilde{\psi}_9)] \wedge p_2 \vee [x_{21} \wedge (\tilde{\psi}_0 \vee \tilde{\psi}_6)]\, r_2 \vee$$

$$\vee [x_{12}(\tilde{\psi}_4 \vee \tilde{\psi}_8)] \wedge p_2 \vee [x_{22} \wedge (\tilde{\psi}_0 \vee \tilde{\psi}_6)] \wedge r_2;$$

$$q_{s2} = [x_{11} \wedge (\tilde{\psi}_3 \vee \tilde{\psi}_5 \vee \tilde{\psi}_7 \vee \tilde{\psi}_9)] \wedge p_4 \vee [x_{21} \wedge (\tilde{\psi}_0 \vee \tilde{\psi}_4 \vee \tilde{\psi}_6 \vee \tilde{\psi}_8)] \wedge r_4 \vee$$

$$\vee [x_{12} \wedge (\tilde{\psi}_2 \vee \tilde{\psi}_4 \vee \tilde{\psi}_6 \vee \tilde{\psi}_8)] \wedge \text{СИ} \vee [x_{22} \wedge (\tilde{\psi}_0 \vee \tilde{\psi}_4 \vee \tilde{\psi}_6 \vee \tilde{\psi}_8)] \wedge \text{СИ};$$

$$q_{s3} = [x_{11} \wedge (\tilde{\psi}_1 \vee \tilde{\psi}_9)] \wedge p_4 \vee [x_{21} \wedge (\tilde{\psi}_0 \vee \tilde{\psi}_2)] \wedge r_4 \vee$$

* Для компактности записи наборы $Q_1, \ldots, Q_k$ (9) заменены соответствующими сигналами дешифраторов $\tilde{\Psi}_0, \tilde{\Psi}_1, \ldots, \tilde{\Psi}_9$; СИ — синхроимпульсы.

Номер строки	Выходной сигнал	$Q_1(t)$	$Q_2(t)$	$Q_3(t)$	$Q_4(t)$	Выход дешифратора	$Q_1(t+1)$	$Q_2(t+1)$	$Q_3(t+1)$	$Q_4(t+1)$	ЭА₁ q_{s1}	ЭА₁ p_1	ЭА₁ r_2	ЭА₂ q_{s2}	ЭА₂ p_2	ЭА₂ r_2	ЭА₃ q_{s3}	ЭА₃ p_3	ЭА₃ r_3	ЭА₄ q_{s4}	ЭА₄ p_4	ЭА₄ r_4
1	x_{11}	0	0	0	0	$\tilde{\psi}_0$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2	x_{11}	0	0	0	1	$\tilde{\psi}_1$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
3	x_{11}	0	0	1	0	$\tilde{\psi}_2$	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
4	x_{11}	0	0	1	1	$\tilde{\psi}_3$	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
5	x_{11}	0	1	1	0	$\tilde{\psi}_4$	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
6	x_{11}	0	1	1	1	$\tilde{\psi}_5$	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
7	x_{11}	1	0	1	0	$\tilde{\psi}_6$	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
8	x_{11}	1	0	1	1	$\tilde{\psi}_7$	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0
9	x_{11}	1	1	1	0	$\tilde{\psi}_8$	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
10	x_{11}	1	1	1	1	ψ_9	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
11	x_{21}	0	0	0	0	$\tilde{\psi}_0$	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
12	x_{21}	0	0	0	1	$\tilde{\psi}_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
13	x_{21}	0	0	1	0	$\tilde{\psi}_2$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1
14	x_{21}	0	0	1	1	$\tilde{\psi}_3$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
15	x_{21}	0	1	1	0	$\tilde{\psi}_4$	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1
16	x_{21}	0	1	1	1	$\tilde{\psi}_5$	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
17	x_{21}	1	0	1	0	$\tilde{\psi}_6$	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1
18	x_{21}	1	0	1	1	$\tilde{\psi}_7$	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
19	x_{21}	1	1	1	0	$\tilde{\psi}_8$	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1
20	x_{21}	1	1	1	1	$\tilde{\psi}_9$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
21	x_{31}	0	0	0	0	$\tilde{\psi}_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	x_{31}	0	0	0	1	$\tilde{\psi}_1$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	x_{31}	0	0	1	0	$\tilde{\psi}_2$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	x_{31}	0	0	1	1	$\tilde{\psi}_3$	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	x_{31}	0	1	1	0	$\tilde{\psi}_4$	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	x_{31}	0	1	1	1	$\tilde{\psi}_5$	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	x_{31}	1	0	1	0	$\tilde{\psi}_6$	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	x_{31}	1	0	1	1	$\tilde{\psi}_7$	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	x_{31}	1	1	1	0	$\tilde{\psi}_8$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	x_{31}	1	1	1	1	$\tilde{\psi}_9$	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

П р и м е ч а н и е. Коэффициенты b в строках 34—45 являются неопределенными.

Таблица 3

Номер строки	Выходной сигнал	$Q_1(t)$	$Q_2(t)$	$Q_3(t)$	$Q_4(t)$	Выход дешифратора	$Q_1(t+1)$	$Q_2(t+1)$	$Q_3(t+1)$	$Q_4(t+1)$	ЭА$_1$			ЭА$_2$			ЭА$_3$			ЭА$_4$		
											q_{s1}	p_1	r	q_{s2}	p_2	r_2	q_{s3}	p_3	r_3	q_{s4}	p_4	r_4
31	x_{12}	0	0	0	0	$\tilde{\psi}_0$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
32	x_{12}	0	0	0	1	$\tilde{\psi}_1$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
33	x_{12}	0	0	1	0	$\tilde{\psi}_2$	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
34	x_{12}	0	0	1	1	$\tilde{\psi}_3$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
35	x_{12}	0	1	1	0	$\tilde{\psi}_4$	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
36	x_{12}	0	1	1	1	$\tilde{\psi}_5$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
37	x_{12}	1	0	1	0	$\tilde{\psi}_6$	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
38	x_{12}	1	0	1	1	$\tilde{\psi}_7$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
39	x_{12}	1	1	1	0	$\tilde{\psi}_8$	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
40	x_{12}	1	1	1	1	$\tilde{\psi}_9$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	0	b	b	b
41	x_{22}	0	0	0	0	$\tilde{\psi}_0$	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0
42	x_{22}	0	0	0	1	$\tilde{\psi}_1$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
43	x_{22}	0	0	1	0	$\tilde{\psi}_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
44	x_{22}	0	0	1	1	$\tilde{\psi}_3$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
45	x_{22}	0	1	1	0	$\tilde{\psi}_4$	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
46	x_{22}	0	1	1	1	$\tilde{\psi}_5$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
47	x_{22}	1	0	1	0	$\tilde{\psi}_6$	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
48	x_{22}	1	0	1	1	$\tilde{\psi}_7$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
49	x_{22}	1	1	1	0	$\tilde{\psi}_8$	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
50	x_{22}	1	1	1	1	$\tilde{\psi}_9$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
51	x_{32}	0	0	0	0	$\tilde{\psi}_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	x_{32}	0	0	0	1	$\tilde{\psi}_1$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
53	x_{32}	0	0	1	0	$\tilde{\psi}_2$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	x_{32}	0	0	1	1	$\tilde{\psi}_3$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
55	x_{32}	0	1	1	0	$\tilde{\psi}_4$	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	x_{32}	0	1	1	1	$\tilde{\psi}_5$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
57	x_{32}	1	0	1	0	$\tilde{\psi}_6$	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	x_{32}	1	0	1	1	$\tilde{\psi}_7$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
59	x_{32}	1	1	1	0	$\tilde{\psi}_8$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	x_{32}	1	1	1	1	$\tilde{\psi}_9$	—	—	—	—	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45

$$\vee [x_{12} \wedge (\widetilde{\psi}_0 \vee \widetilde{\psi}_8)] \wedge \text{СИ} \vee [x_{22} \wedge (\widetilde{\psi}_0 \vee \widetilde{\psi}_2)] \wedge \text{СИ};$$

$$q_{s4} = [(x_{11} \vee x_{21}) \wedge (\widetilde{\psi}_0 \vee \widetilde{\psi}_1 \vee \widetilde{\psi}_2 \vee \widetilde{\psi}_3 \vee \ldots \vee \widetilde{\psi}_8 \vee \widetilde{\psi}_9)] \wedge \text{СИ}. \quad (9)$$

Полученную выше систему ВБФ необходимо подвергнуть минимизации. Удобным при ручной минимизации является, например, метод карт [8]. Однако его возможности ограничены ввиду того, что размер карт равен $2^n \cdot (2^n - 1)$, где n — число переменных в ВБФ. Более эффективными являются диаграммы Вейча, имеющие 2^n клеток рабочего поля. Здесь предлагается пользоваться при минимизации ВБФ диаграммами Вейча. Для заполнения диаграмм переменные из алфавита $\widetilde{X}$ необходимо представить следующим образом:

$$x_{11} = \varkappa_1 \wedge \overline{\varkappa}_2 \wedge \overline{\varkappa}_3 \wedge U_1 \wedge \overline{U}_2;\ x_{21} = \overline{\varkappa}_1 \wedge \varkappa_2 \wedge \overline{\varkappa}_3 \wedge U_1 \wedge \overline{U}_2;$$

$$x_{31} = \overline{\varkappa}_1 \wedge \overline{\varkappa}_2 \wedge \varkappa_3 \wedge U_1 \wedge \overline{U}_2;\ x_{12} = \varkappa_1 \wedge \overline{\varkappa}_2 \wedge \overline{\varkappa}_3 \wedge \overline{U}_1 \wedge U_2;$$

$$x_{22} = \overline{\varkappa}_1 \wedge \varkappa_2 \wedge \overline{\varkappa}_3 \wedge \overline{U}_1 \wedge U_2;\ x_{32} = \overline{\varkappa}_1 \wedge \overline{\varkappa}_2 \wedge \varkappa_3 \wedge \overline{U}_1 \wedge U_2,$$

т. е. каждая переменная умножается логически на произведение переменных, которое тождественно равно единице. С помощью такого приема мы переходим к необходимой для заполнения таблицы Вейча совершенной дизъюнктивной нормальной форме булевых функций.

На рис. 3, *а* представлен формат диаграммы Вейча для рассматриваемой задачи. В диаграмме учтено лишь девять переменных: U_1, U_2, $Q_1, \ldots, Q_4$, $\varkappa_1$, $\varkappa_2$, $\varkappa_3$, хотя, вообще говоря, помимо указанных переменных, нужно было бы учесть выходные импульсные сигналы p_ρ и r_ρ. На практике при составлении диаграмм можно обойтись без сигналов p_ρ, r_ρ, проводя минимизацию лишь внутрискобочных функций в (10), а эти сигналы учесть в окончательном результате.

Ограничения, наложенные на сигналы $U_j(\tau)$ $(j = 1, 2, \ldots, m)$ и $\varkappa_l(t)$ $(l = 1, 2, 3)$, задают в диаграмме рабочие поля (РП), в пределах которых только и могут быть определены рассматриваемые функции возбуждения (на рис. 3, *а* РП выделены; их общее число равно ml; для примера $ml=6$). Вне рабочих полей клетки диаграммы заполнены неопределенными коэффициентами b. Кроме того, в каждом рабочем поле функции также определены не на всех наборах. Происходит это в силу частичной определенности функций переходов (выходов) рассматриваемого автомата: при $U_1(t)=1$ используется десять состояний регистра из шестнадцати возможных, при $U_2(t)=1$ — пять состояний. Таким образом, получается, что в худшем случае функции возбуждения определены лишь на Wml наборах из 2^{wml} возможных, где w — число выходных сигналов ЭП автомата. Частичная определенность ВБФ характерна для измерительных УУС с двоично-десятичным кодированием, что позволяет при структурном синтезе выполнить минимизацию функций от довольно большого количества аргументов с помощью диаграмм Вейча вручную.

При минимизации функций возбуждения $q_\mu(t)$ возможен такой вариант покрытия диаграмм Вейча, который позволяет проводить склеивание по нескольким РП одновременно. Первоначально диаграммы заполняются нулями, единицами и неопределенными коэффициентами в полном соответствии с кодированной таблицей. В ряде случаев полученное после этого распределение нулей и единиц не позволяет осуществить склеивание по нескольким РП.

Для расширения возможностей по склеиванию можно считать, что на ряде наборов $x(t)$ $Q_1(t), \ldots, Q_k(t)$ функции $q_\mu(t)$ фиктивно равны единице (при условии, что для этих же наборов соответствующие выходные импульсные сигналы p_ρ, r_ρ по всем $U_j(\tau)$ равны нулю).

Пользуясь этим приемом, систему (9) можно переписать, например, следующим образом [здесь $q'_{s1}, \ldots, q'_{s4}$ введены для отличия от функций $q'_{s1}, \ldots, q'_{s4}$ системы ВБФ (9)]:

$$q'_{s1} = q_{s1} \vee x_{21} \wedge r_2 \wedge (\widetilde{\psi}_1 \vee \widetilde{\psi}_2 \vee \widetilde{\psi}_3 \vee \widetilde{\psi}_4 \vee \widetilde{\psi}_5 \vee \widetilde{\psi}_7 \vee \widetilde{\psi}_8 \vee \widetilde{\psi}_9) \vee$$
$$\vee\, x_{21} \wedge r_2 \wedge (\widetilde{\psi}_2 \vee \widetilde{\psi}_4 \vee \widetilde{\psi}_8);$$

$$q'_{s2} = q_{s2} \vee x_{21} \wedge r_4 \wedge (\widetilde{\psi}_1 \vee \widetilde{\psi}_5 \vee \widetilde{\psi}_7 \vee \widetilde{\psi}_9) \vee x_{11} \wedge p_4 \vee (\widetilde{\psi}_2 \vee \widetilde{\psi}_4 \vee \widetilde{\psi}_6 \vee \widetilde{\psi}_8);$$

$$q'_{s3} = q_{s3} \vee x_{11} \wedge p_4 \wedge (\widetilde{\psi}_0 \vee \widetilde{\psi}_8) \vee x_{21} \wedge r_4 \wedge (\widetilde{\psi}_1 \vee \widetilde{\psi}_3);\ q'_{s4} \equiv q_{s4}. \quad (10)$$

На рис. 3, *б* приведена диаграмма Вейча функции q'_{s2}. Фиктивные единицы в рабочих полях отмечены особо. Из диаграммы следует, что функция q'_{s2} после склеивания может быть записана следующим образом:

$$\varkappa_1 \wedge Q_3 \wedge (p_4 \wedge U_1 \vee U_2 \wedge \text{СИ}) \vee \varkappa_2 \wedge (Q_2 \vee \overline{Q}_3 \vee Q_1) \wedge$$
$$\wedge\, (U_1 \wedge r_4 \vee U_2 \wedge \text{СИ}).$$

Аналогичным образом минимизируются и остальные функции системы ВБФ (10). Окончательно, после декомпозиции минимизированной системы функций возбуждения, получим:

$$q'_{s1} = \varkappa_1 \wedge p_2 \wedge Q_2 \wedge (U_2 \vee Q_4 U_1) \vee \varkappa_2 \vee r_2; \qquad q'_{s2} = \varkappa_1 \wedge Q_3 \wedge T_4 \vee$$
$$\vee\, \varkappa_2 \wedge (Q_1 \vee Q_1 \vee Q_3) \wedge T_5; \qquad q'_{s3} = \varkappa_1 \wedge (\overline{Q}_3 \vee Q_1 \wedge Q_2) \wedge T_4 \vee$$
$$\vee\, \varkappa_2 \wedge \overline{Q}_1 \wedge \overline{Q}_2 \wedge T_5; \quad q'_{s4} = (\varkappa_1 \vee \varkappa_2) \wedge U_1 \wedge \text{СИ},$$

где $T_4 = T_1 \vee T_2$; $T_5 = T_2 \vee T_3$; $T_1 = U_1 \wedge p_4$; $T_2 = U_2 \wedge \text{СИ}$;

$$T_3 = U_1 \wedge r_4.$$

Функциональная схема декады устройства управления для системы ВБФ [см. (10)] представлена на рис. 4, где *1* — элемент И; *2* — элемент ИЛИ; *3* — импульсный сигнал; *4* — потенциальный сигнал; *5* — дифференцирующая цепь.

Рассмотренная выше методика может быть применена при синтезе многотактных и однотактных блоков измерительных УУС с автоматически изменяемым методом уравновешивания, кодом набора образцовых величин (и их представлений) и числом устройств сравнения, участвующих в измерении. В качестве базисных наборов могут выступать потенциально-импульсные и потенциальные цифровые элементы, выполненные на дискретных компонентах или в интегральном виде. В случае использования потенциальной системы элементов область применения методов ограничена структурами с двухтактной синхронизацией.

Это позволило, в частности, проанализировать некоторые реализации многотактных (однотактных) блоков измерительных УУС на перспективной микроэлектронной технике. Было выяснено, что при малом числе последовательно реализуемых алгоритмов измерения (m) возможно применение простейших однородных решеток [9, 10] и неоднородных структур [11] с жесткой организацией. При этом требуемые изменения в функционировании могут быть достигнуты путем подачи с периферии в определенные точки интегральных решеток сигналов управления $U_j(\tau)$. При больших значениях m необходимо переходить к

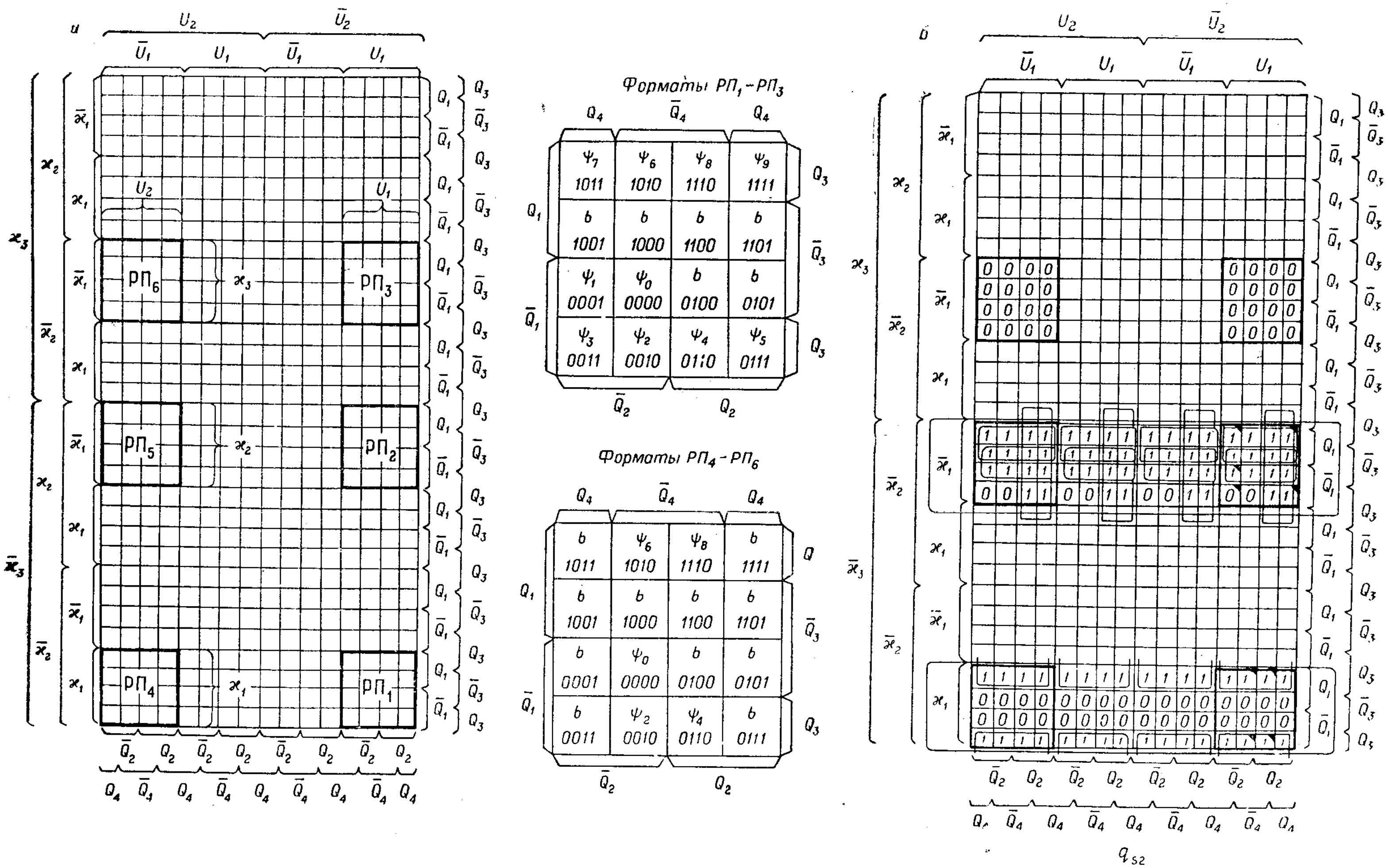


Рис. 3.

использованию автоматически программируемых микроэлектронных структур, в том числе однородных [12], обладающих высокой универсальностью. Возможность использования подобных структур, несмотря на их большую избыточность, вытекает из последовательного характера

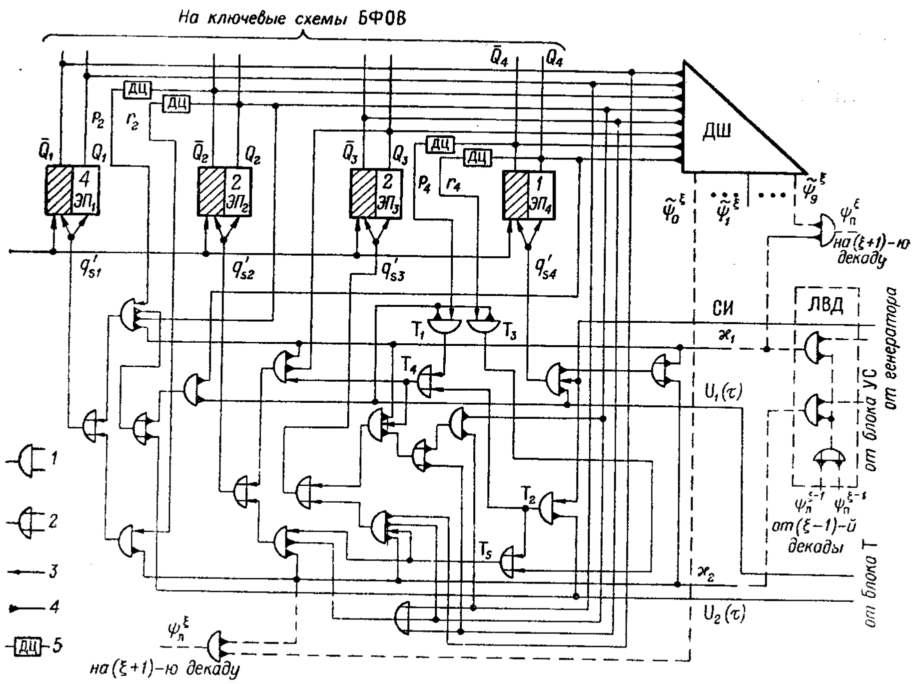


Рис. 4.

реализации ВБФ и частичной определенности этих функций в измерительных задачах.

Авторы выражают признательность д-ру техн. наук М. П. Цапенко за помощь в постановке задачи и консультации при ее решении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Д. Баглай. К вопросу автоматического измерения величин при минимальной априорной информации.— Автометрия, 1965, № 4.
2. Н. И. Гореликов, А. Н. Касперович, И. И. Коршевер, М. П. Цапенко. О построении цифровых приборов уравновешивания с переменной структурой.— Автометрия, 1965, № 4 .
3. Б. Г. Матиенко. Некоторые результаты исследования измерительных устройств с управляемой структурой.— В сб. «Кибернетика в измерительной технике». М., ЦНИИТЭИ приборостроения, 1968.
4. И. Я. Корчагин, Б. Г. Матиенко. Описание и синтез структур цифровых измерительных устройств с использованием теории конечных автоматов.— Автометрия, 1968, № 2.
5. Твердохлеб. О наборе элементов для построения моделей цифраторов.— Автометрия, 1965, № 2.
6. В. М. Глушков. Синтез цифровых автоматов. М., Физматгиз, 1962.
7. Е. Н. Вавилов, Г. П. Портной. Синтез схем электронных цифровых машин. М., «Советское радио», 1963.

8. Д. А. Поспелов. Логические методы анализа и синтеза схем.— М.—Л., «Энергия», 1964.
9. И. В. Прангишвили, Н. А. Абрамова, Е. В. Бабичева, В. В. Игнатущенко. Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических и вычислительных устройств. М., «Наука», 1967.
10. R. C. Minnick. Cutpoint Cellural Logic.— IEEE Trans., 1964, EC-13, № 6.
11. C. E. Marvin, R. M. Walker. Нестандартные схемы из интегральных матриц.— Электроника (перевод с англ.), 1967, т. 40, № 4.
12. Э. В. Евреинов. Теоретические основы построения универсальных вычислительных сред.— Сб. «Вычислительные системы», вып. 15. Новосибирск, ИМ СО АН СССР, 1965.

Поступила в редакцию
7 апреля 1969 г.