

А. В. УШАКОВ, Е. С. ЯИЦКАЯ

## КОММУТАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВА ЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ РЕКУРРЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОДОВ

Рассматривается задача коммутации структуры пространства линейных устройств рекуррентного преобразования двоичных кодов с помощью нелинейно формируемого сигнала. Предлагаются алгоритмы синтеза таких устройств.

*Ключевые слова:* рекуррентное преобразование, структура пространства, матрица коммутирующего входа, сигнал коммутации, основная конъюнкция вектора состояния.

**Введение. Постановка задачи.** Устройства рекуррентного преобразования двоичных кодов являются двоичными динамическими системами. В теории двоичных динамических систем (ДДС) сформировались два направления [1—3] их синтеза, которые развиваются по законам системной диалектики практически независимо друг от друга.

Первое направление, основанное на теории конечных автоматов, связано с решением задач вычислительной техники при синтезе микропрограммных автоматов, а также частично задач общетехнической дискретной автоматики. С точки зрения общесистемного подхода „автоматная“ ветвь ДДС представляет собой класс нелинейных двоичных динамических систем (НДДС), аналитически описываемых выражениями

$$x(k+1) = \lambda\{x(k), u(k)\}, y(k) = \delta\{x(k), u(k)\}; \quad (1)$$

$$x(k+1) = \lambda\{x(k), u(k)\}, y(k) = \delta\{x(k)\}, \quad (2)$$

где формула (1) предназначена для автоматной логики Мили, а формула (2) — для автоматной логики Мура; здесь  $x$ ,  $u$ ,  $y$  — соответственно вектор состояния ДДС, входная и выходная последовательности:  $\dim x = n_A$ ,  $\dim u = r$ ,  $\dim y = m$ ;  $k$  — дискретное время, выраженное числом интервалов дискретности длительностью  $\Delta t$ ; функции  $\lambda(\cdot)$ ,  $\delta(\cdot)$  носят названия функции перехода и функции выхода соответственно.

Отличительной особенностью автоматного представления ДДС в форме (1) или (2) является возможность использования любых типов триггеров. Реализация автоматной логики в виде (1) или (2) в силу последнего обстоятельства требует дополнения их функциями возбуждения информационных входов  $v(k)$  используемых триггеров, которые определяются исходным состоянием  $x(k)$ , состоянием перехода  $x(k+1)$  и входной последовательностью  $u(k)$ :

$$v(k) = \tilde{v}\{x(k+1), x(k), u(k)\}. \quad (3)$$

Если в выражении (3) подставить представления для  $x(k+1)$  из формулы (1), то функции возбуждения будут иметь вид

$$v(k) = \tilde{v}\{\lambda\{x(k), u(k)\}, x(k), u(k)\} = \tilde{v}\{x(k), u(k)\}. \quad (4)$$

В результате автоматная реализация двоичной динамической системы, исходное описание функционирования которой задается или графом переходов из состояния в состояние, или граф-схемой алгоритма смены состояний, сводится к реализации двух систем булевых функций:

$$\left. \begin{aligned} v(k) &= \tilde{v}\{x(k), u(k)\}; \\ y(k) &= \begin{cases} \delta\{x(k), u(k)\} & \text{для автоматной логики Мили,} \\ \delta\{x(k)\} & \text{для автоматной логики Мура.} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Следует отметить, что если триггер выбранного типа используется в синхронном режиме, то в булевых функциях (5) должен учитываться синхросигнал.

Второе направление синтеза двоичных динамических систем, основанное на линейном векторно-матричном представлении, формировалась в рамках теории помехозащитного преобразования кодов (ППК) [4] и линейных последовательностных машин [5], получивших впоследствии название линейных двоичных динамических систем (ЛДДС). В этом случае для аналитического описания динамических процессов в ДДС используются рекуррентные векторно-матричные представления вида

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k), \quad x(0), \\ y(k) &= \mathbf{C}x(k) + \mathbf{H}u(k). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Основная особенность ЛДДС заключается в том, что в них используются D-триггеры, аналитически представляющие собой элементы задержки на интервал длительностью  $\Delta t$ , т.е. на один такт. В выражении (6) переменные  $x$ ,  $u$ ,  $y$ ,  $k$  имеют тот же смысл, что и в формулах (1), (2); размерности этих переменных следующие:  $\dim x = n$ ,  $\dim u = r$ ,  $\dim y = m$ , при этом в общем случае  $n \neq n_A$ ,  $n > n_A$ ;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{H}$  — соответственно матрица состояния, матрица входа, матрица выхода и матрица вход—выход, размерности которых согласованы с размерностями переменных. Пошаговое использование модельного представления (6), называемого „рекуррентным“, приводит к „суммарному“ аналитическому представлению ЛДДС, которое также является решением системы (6):

$$\left. \begin{aligned} x(k) &= \mathbf{A}^k x(0) + \sum_{i=0}^{k-1} \mathbf{A}^i \mathbf{B} u(k-1-i), \\ y(k) &= \mathbf{C} x(k) + \mathbf{H} u(k). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Следует заметить, что в теории и практике ДДС существуют „пограничные“ задачи, решение которых обуславливает необходимость изменения структуры пространства ДДС рекуррентного преобразования кодов вида (1), (2) или вида (6). Эти задачи сводятся в основном к организации перехода ДДС из конкретного исходного состояния  $x(k)$  в требуемое состояние перехода  $x(k+1)$  под действием служебного сигнала коммутации  $u_k$ .

Задача коммутации структуры пространства линейных устройств рекуррентного преобразования двоичных кодов, или иначе ЛДДС, решается путем введения в нее с помощью дополнительной матрицы  $\mathbf{B}_k$  коммутирующего входа и нелинейно формируемого дополнительного сигнала  $u_k$ .

Цель настоящей статьи — построение алгоритмов формирования матрицы  $\mathbf{B}_k$  коммутирующего входа и скалярного сигнала коммутации  $u_k$ , не привязанного жестко к дискретному времени  $k$ , для двух случаев реализации ЛДДС рекуррентного преобразования кодов (6), первый из которых характеризуется условием отсутствия входной последовательности  $u(k) = 0$  (автономная версия ЛДДС), а второй — условием ее наличия (версия ЛДДС, возбуждаемой произвольной входной последовательностью  $u(k)$ ).

В соответствии с изложенным описанием ЛДДС с линейно коммутируемой структурой принимает следующий вид:

— для автономной версии системы

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}_k u_k, \quad (8)$$

— для версии системы, возбуждаемой ненулевой входной последовательностью  $u(k)$ ,

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{B}_k u_k. \quad (9)$$

Рассматриваемыми в статье задачами являются:

1) формирование аналитических представлений

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{B}_k(\mathbf{A}, x(k+1), x(k)) \quad (10)$$

для автономной версии системы и

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{B}_k(\mathbf{A}, x(k+1), x(k), \mathbf{B}, u(k)) \quad (11)$$

для версии системы, возбуждаемой ненулевой входной последовательностью  $u(k)$ , в предположении, что в выражениях (8) и (9) выполняется условие

$$u_k = 1; \quad (12)$$

2) поиск способов обеспечения выполнения условия (12).

**Структура пространства матрицы состояния ЛДДС.** В общей постановке структура пространства матрицы состояния ДДС рекуррентного преобразования кодов характеризуется следующими факторами:

- неподвижными состояниями системы при нулевом и единичном значениях входной последовательности;
- наличием собственных векторов матрицы состояния;
- наличием замкнутых циклов;
- состояниями, из которых ЛДДС переходит в нулевое состояние.

Если ЛДДС имеет неприводимый полином степени  $m$  в качестве характеристического, то этот полином, а следовательно, и его матрица состояния  $\mathbf{A}$  принадлежат показателю  $\mu$ , так что выполняется соотношение  $\mathbf{A}^\mu = \mathbf{I}$ , где  $\mu = 2^m - 1$ . В такой системе структура пространства матрицы состояния может быть представлена:

— неподвижным состоянием  $x(k) = 0$  при  $u(k) \equiv 0$ ;

— неподвижным состоянием  $x(k) = (\mathbf{I} + \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}$  при  $u(k) \equiv 1$ ;

— двумя замкнутыми циклами максимальной длиной  $\mu = 2^m - 1$ , каждый со своей структурой (последовательностью перехода из состояния в состояние) при  $u(k) \equiv 0$  и при  $u(k) \equiv 1$ , так что  $x(k) = x(k + \mu)$ .

Таким образом, ЛДДС с матрицей состояния  $\mathbf{A}$  размерности  $(m \times m)$  может генерировать периодические последовательности максимальной длиной  $L = \mu = 2^m - 1$ . Следует заметить, что возможна реализация ЛДДС, при которой будут генерироваться периодические последовательности максимальной длиной  $L$ , если характеристический полином матрицы состояния ЛДДС будет иметь вид  $\det(\lambda \mathbf{I} + \mathbf{A}) = \lambda^L + 1$ , причем значение  $L$  может быть произвольным, а не из ряда  $L = 2^m - 1$ , где  $m$  — целое положительное число. Основным недостатком такого класса ЛДДС является увеличенная размерность матрицы  $\mathbf{A}$ , которая принимает значение  $\dim \mathbf{A} = (L \times L)$ .

В настоящей статье рассматриваются в основном проблемы коммутации структуры пространства состояний, принадлежащих указанным выше замкнутым циклам.

**Формирование аналитических представлений для матрицы  $\mathbf{B}_k$  коммутирующего входа ЛДДС.** Для решения задачи линейной коммутации структуры пространства состояний ЛДДС сформулируем следующие утверждения.

**Утверждение 1.** Если ЛДДС автономна, т.е. описывается соотношением (8), при этом заданы вектор состояния перехода  $x(k+1)$  и вектор исходного состояния  $x(k)$ , а также выполняется условие (12), то матрица  $\mathbf{B}_k$  коммутирующего входа, с помощью которой осуществляется переход из  $x(k)$  в  $x(k+1)$ , определяется выражением

$$\mathbf{B}_k = x(k+1) + \mathbf{A}x(k). \quad \square (13)$$

**Доказательство** утверждения строится на использовании соотношения (8) в предположении заданных значений  $x(k+1)$ ,  $x(k)$  и  $u_k = 1$  с последующим решением уравнения (8) относительно матрицы  $\mathbf{B}_k$ . ■

**Примечание 1.** Из выражения (13) следует, что переход из состояния  $x(k)$  в состояние  $x(k+1)$  невозможен, если выполняется условие  $x(k+1) + \mathbf{A}x(k) = \mathbf{O}$ , т.е. в случае, если  $x(k)$  — собственный вектор матрицы  $\mathbf{A}$ .

**Утверждение 2.** Если ЛДДС возбуждается ненулевой входной последовательностью  $u(k)$ , описываемой соотношением (9), при этом заданы вектор состояния перехода  $x(k+1)$  и вектор исходного состояния  $x(k)$ , а также выполняется условие (12), то матрица  $\mathbf{B}_k$  коммутирующего входа, с помощью которой осуществляется переход из  $x(k)$  в  $x(k+1)$ , определяется выражением

$$\mathbf{B}_k = x(k+1) + \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k). \quad \square (14)$$

**Доказательство** утверждения строится на использовании соотношения (9) в предположении заданных значений  $x(k+1)$ ,  $x(k)$  и  $u_k = 1$  с последующим решением уравнения (9) относительно матрицы  $\mathbf{B}_k$ . ■

**Примечание 2.** Из выражения (14) следует, что структура матрицы  $\mathbf{B}_k$  коммутирующего входа зависит от значения входной последовательности  $u(k)$  на момент коммутации, так что при  $u(k) = 0$

$$\mathbf{B}_k|_{u(k)=0} = \mathbf{B}_{k0} = x(k+1) + \mathbf{A}x(k), \quad (15)$$

а при  $u(k) = 1$  —

$$\mathbf{B}_k|_{u(k)=1} = \mathbf{B}_{k1} = x(k+1) + \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}. \quad (16)$$

**Примечание 3.** Очевидно, что введение двух матриц коммутации (15) и (16) приводит к тому, что сигнал коммутации  $u_k$  становится векторным:  $u_k = [u_{k0} \ u_{k1}]^T$ , при этом сигнал  $u_{k0}$  поступает на вход системы (9) через матрицу  $\mathbf{B}_{k0}$ , а сигнал  $u_{k1}$  — через матрицу  $\mathbf{B}_{k1}$ .

**Примечание 4.** Из выражения (14) следует, что переход из состояния  $x(k)$  в состояние  $x(k+1)$  невозможен, если выполняется условие  $x(k+1) + \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k) = \mathbf{O}$ , т.е. если  $x(k)$  — собственный вектор матрицы  $\mathbf{A}$  при  $u(k) = 0$ , и если  $\{x(k+1), x(k)\} = \arg\{x(k+1) + \mathbf{A}x(k) = \mathbf{B}\}$  при  $u(k) = 1$ .

#### **Формирование сигналов коммутации структуры пространства состояний ЛДДС.**

**Определение 1.** Основной конъюнкцией  $\&\{(\cdot)\}$  набора  $(\cdot) = (x_1, x_2 \dots x_i \dots x_n)$  двоичных переменных называется конъюнкция, которая для данного набора принимает единичное значение  $\&\{(\cdot)\} = 1$ . □

Используем это определение для набора булевых переменных применительно к вектору, составленному из тех же переменных.

**Определение 2.** Основной конъюнкцией  $\&\{(*)\}$  вектора  $(*) = (x(k))$ , составленного из элементов  $x_i \in \text{GF}(2) = \{0; 1\}$ , называется конъюнкция, которая для данного набора двоичных переменных, образующих вектор  $x(k)$ , принимает единичное значение  $\&\{(*)\} = 1$ . □

Сформулируем утверждения для сигнала коммутации  $u_k$  различных ДДС рекуррентного преобразования кодов: автономной системы и системы, возбуждаемой входной последовательностью.

**Утверждение 3.** Сигнал коммутации  $u_k$  для автономной ДДС может быть сформирован в виде основной конъюнкции исходного вектора состояния  $x(k)$ . □

**Доказательство.** Рассмотрим автономную систему (8) с формируемым в ней сигналом коммутации  $u_k$ . На момент коммутации, т.е. на момент начала перехода из исходного состояния  $x(k)$ , только оно представлено сигналом. Формируя основную конъюнкцию для вектора  $x(k)$ , гарантированно можно получить скалярный сигнал единичного значения:  $u_k = \&\{x(k)\}$ . ■

**Утверждение 4.** Компоненты сигнала коммутации  $u_k = [u_{k0} \ u_{k1}]^T$  для версии ЛДДС (9) при наличии входной последовательности  $u(k)$  могут быть сформированы в виде

$$u_{k0} = \&\{\bar{u}(k), \&\{x(k)\}\}, \quad u_{k1} = \&\{u(k), \&\{x(k)\}\}. \quad \square(17)$$

**Доказательство** утверждения строится по аналогии с доказательством утверждения 3. ■

Схема формирования сигнала коммутации для версии ЛДДС (9) представлена на рис. 1 (здесь D — многомерный D-триггер).

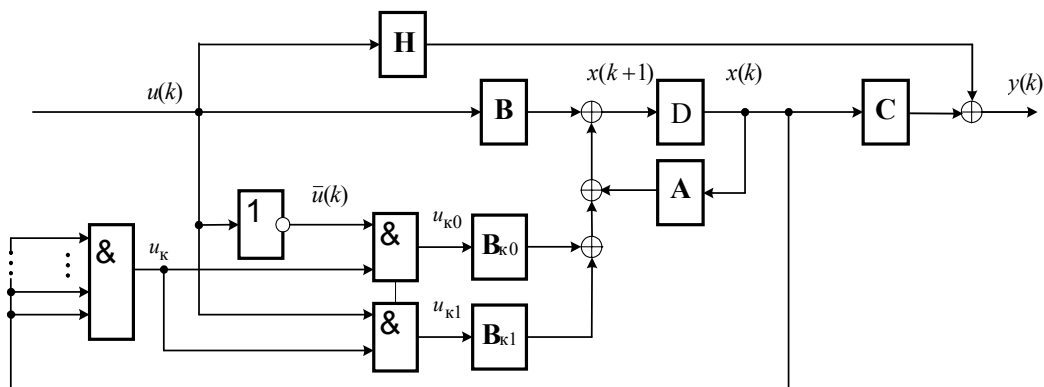


Рис. 1

Представим алгоритмы формирования матрицы  $\mathbf{B}_k$  коммутирующего входа и скалярного сигнала коммутации  $u_k$  для двух случаев реализации ЛДДС.

**Алгоритм (А1) формирования матрицы  $\mathbf{B}_k$  и сигнала  $u_k$  для автономной версии ЛДДС.**

1. Составить структуру циклов и неподвижных состояний системы по исходному векторно-матричному описанию (ВМО) автономной версии ЛДДС  $x(k+1) = \mathbf{A}x(k)$  с помощью графа переходов или таблицы состояний.

2. Задать два набора векторов состояний: один — набор векторов  $\{x(k)\}$  исходных состояний  $x(k)$ , из которых требуется осуществить переход, а другой — набор векторов  $\{x(k+1)\}$  требуемых состояний перехода  $x(k+1)$ , и сформировать для этих наборов пары, задействованные в переходах.

3. Сформировать согласно утверждению 3 набор  $\{u_k\}$  сигналов коммутации  $u_k = \&\{x(k)\}$ .

4. Вычислить набор  $\{\mathbf{B}_k\}$  матриц  $\mathbf{B}_k$  коммутирующих входов в форме (13).

5. Составить векторно-матричное описание полученного устройства коммутации в форме (8).

6. Осуществить проверку правильности функционирования устройства.

7. Осуществить техническую реализацию.

**Алгоритм (А2) формирования матрицы  $\mathbf{B}_k$  и сигнала  $u_k$  для версии ЛДДС, возбуждаемой произвольной входной последовательностью  $u(k)$ .**

1. Составить структуры циклов и неподвижных состояний системы по исходному ВМО версии ЛДДС  $x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k)$  с помощью графов переходов или таблиц состояний для случаев  $u(k) = 0$  и  $u(k) \neq 0$  ( $u(k) = 1$ ).

2. Задать два набора векторов состояний: один — набор векторов  $\{x(k)\}$  исходных состояний  $x(k)$ , из которых требуется осуществить переход, а другой — набор векторов  $\{x(k+1)\}$  требуемых состояний перехода  $x(k+1)$ , и сформировать для этих наборов пары, задействованные в переходах.

3. Сформировать согласно утверждению 4 набор  $\{u_{k0}\}$  сигналов коммутации в форме (17) для случая  $u(k) = 0$ .

4. Вычислить набор  $\{B_{k0}\}$  матриц  $B_{k0}$  коммутирующего входа в форме (15).

5. Сформировать согласно утверждению 4 набор  $\{u_{k1}\}$  сигналов коммутации в форме (17) для случая  $u(k) \neq 0 (u(k) = 1)$ .

6. Вычислить набор  $\{B_{k1}\}$  матриц  $B_{k1}$  коммутирующего входа в форме (16).

7. Составить векторно-матричное описание полученного устройства коммутации в форме (9).

8. Осуществить проверку правильности функционирования устройства.

9. Осуществить техническую реализацию.

**Пример.** Рассмотрим устройство управления приемом помехозащищенного кода (ПЗК), помехозащита которого реализуется в режиме „обнаружение“, причем формат кода составлен из помехозащищенных кодовых компонентов, сформированных в соответствии с рис. 2, где СИ — синхроимпульс;  $\kappa\{N_{\text{КП}}\} = (n_1, k_1)$  — код номера ( $N$ ) контролируемого пункта (КП);  $\kappa\{\text{ФА}\} = (n_2, k_2)$  — код функционального адреса (ФА);  $\kappa\{\text{ОТМ}\} = (n_3, k_3)$  — код номера объекта телемеханизации (ОТМ);  $\kappa\{\text{ХК}\} = (n_4, k_4)$  — код характера команды (ХК); КВ — квитанция; М — маркер;  $n_i$  — полное число разрядов кода,  $k_i$  — число информационных разрядов кода.

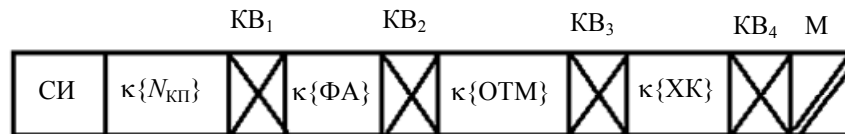


Рис. 2

Приведенный формат ПЗК рассчитан на следующие исходные данные: число КП на один пункт управления (ПУ)  $N_{\text{КП}}/\text{ПУ}$  — 15; число ОТМ — 35; число уставок, передаваемых ОТМ (характер команды), — 3; категория системы телемеханики — III ( $P_{\text{доп}} \leq 10^{-7}$ ); модель двоичного канала связи —  $p_{10} = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $p_{01} = 10^{-5}$ ; структура кода — произвольная. В результате:  $(n_1, k_1) = (7, 4)$ ,  $(n_2, k_2) = (6, 3)$ ,  $(n_3, k_3) = (10, 6)$ ,  $(n_4, k_4) = (5, 2)$ , число служебных разрядов кода (четыре квитанции и маркер) составляет величину  $n_{\text{сл}} = 5$ , полное число разрядов кода  $n_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 n_i + n_{\text{сл}} = 33$ .

Нетрудно видеть, что разрабатываемое устройство управления приемом помехозащищенного кода по существу является распределителем импульсов (РИ), представляющим собой двоичную динамическую систему, генерирующую на  $n_{\Sigma}$  выходах  $n_{\Sigma}$ -разрядные распределительные коды. РИ дополнен линейными цепями коммутации структуры пространства посредством нелинейно формируемого сигнала в связи с характером приема ПЗК в режиме обнаружения.

Базовая структура устройства генерирует последовательность длиной  $n_{\Sigma}$  и строится в виде автономной ЛДДС рекуррентного вида  $x(k+1) = Ax(k)$ , где матрица состояния

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{32 \times 1} & \mathbf{I}_{32 \times 32} \\ 1 & \mathbf{O}_{1 \times 32} \end{bmatrix}.$$

В результате решения, основанного на использовании алгоритма **A1**, сформированы:

1) таблица состояний, в которой отражена структура циклов и неподвижных состояний системы;

$k$	$x^T(k)$	$k$	$x^T(k)$	$k$	$x^T(k)$
0	$[\mathbf{O}_{1 \times 33}]^T$	...	...	27	$[\mathbf{O}_{1 \times 6} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 26}]^T$
1	$[\mathbf{O}_{1 \times 32} \ 1]^T$	14	$[\mathbf{O}_{1 \times 19} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 13}]^T$	...	...
2	$[\mathbf{O}_{1 \times 31} \ 1 \ 0]^T$	15	$[\mathbf{O}_{1 \times 18} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 14}]^T$	31	$[0 \ 0 \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 30}]^T$
...	...	16	$[\mathbf{O}_{1 \times 17} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 15}]^T$	32	$[0 \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 31}]^T$
7	$[\mathbf{O}_{1 \times 26} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 6}]^T$	...	...	33	$[1 \ \mathbf{O}_{1 \times 32}]^T$
8	$[\mathbf{O}_{1 \times 25} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 7}]^T$	25	$[\mathbf{O}_{1 \times 8} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 24}]^T$	—	—
9	$[\mathbf{O}_{1 \times 24} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 8}]^T$	26	$[\mathbf{O}_{1 \times 7} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 25}]^T$	—	—

Примечание. Фоном выделены служебные разряды кода, рамкой — неподвижное состояние.

2) набор векторов исходных состояний  $\{x(8), x(15), x(26), x(32), x(33)\}$ , из которых требуется осуществить переход; набор векторов требуемых состояний  $\{x(1), x(9), x(16), x(27), x(0)\}$ ;

3) набор сигналов коммутации:

$$u_{k1} = \&\{x(8)\} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots x_{26} \bar{x}_{27} \dots \bar{x}_{33};$$

$$u_{k2} = \&\{x(15)\} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots x_{19} \bar{x}_{20} \dots \bar{x}_{33};$$

$$u_{k3} = \&\{x(26)\} = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots x_8 \bar{x}_9 \dots \bar{x}_{33};$$

$$u_{k4} = \&\{x(32)\} = \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \dots \bar{x}_{33};$$

$$u_{k5} = \&\{x(33)\} = x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \dots \bar{x}_{33};$$

4) набор матриц коммутирующих входов:

$$\mathbf{B}_{k1} = [\mathbf{O}_{1 \times 24} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 7} \ 1]^T;$$

$$\mathbf{B}_{k2} = [\mathbf{O}_{1 \times 17} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 6} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 8}]^T;$$

$$\mathbf{B}_{k3} = [\mathbf{O}_{1 \times 6} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 10} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 15}]^T;$$

$$\mathbf{B}_{k4} = [1 \ \mathbf{O}_{1 \times 5} \ 1 \ \mathbf{O}_{1 \times 26}]^T;$$

$$\mathbf{B}_{k5} = [\mathbf{O}_{1 \times 632} \ 1]^T;$$

5) векторно-матричное описание полученного устройства коммутации:

$$x(k+1) = Ax(k) + \mathbf{B}_{k1}u_{k1} + \mathbf{B}_{k2}u_{k2} + \mathbf{B}_{k3}u_{k3} + \mathbf{B}_{k4}u_{k4} + \mathbf{B}_{k5}u_{k5}.$$

Проверка правильности функционирования полученного устройства осуществляется на базе гипотезы о том, что при передаче кода функционального адреса и кода характера коман-



ды произошла ошибка. Очевидно в этом случае прием кода ФА должен сопровождаться запросом на повторение передачи этого кода, что обеспечивается переходом из состояния  $x(15)$  в  $x(9)$ , т.е.

$$x(k+1) = Ax(k) + B_{k2}|_{k=15} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{32 \times 1} & \mathbf{I}_{32 \times 32} \\ 1 & \mathbf{O}_{1 \times 32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{18 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{14 \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{17 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{6 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{8 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{24 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{8 \times 1} \end{bmatrix} = x(9).$$

Аналогично запрос на повторение кода ХК сопровождается переходом из состояния  $x(32)$  в  $x(27)$ , т.е.

$$x(k+1) = Ax(k) + B_{k4}|_{k=32} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{32 \times 1} & \mathbf{I}_{32 \times 32} \\ 1 & \mathbf{O}_{1 \times 32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \mathbf{O}_{31 \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{O}_{5 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{26 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{6 \times 1} \\ 1 \\ \mathbf{O}_{26 \times 1} \end{bmatrix} = x(27).$$

**Заключение.** Предложенная в статье алгоритмическая среда позволяет конструктивно расширить функциональные возможности линейных двоичных динамических систем путем введения дополнительных линейных цепей коммутации структуры пространства состояний ЛДДС рекуррентного преобразования кодов с помощью нелинейно формируемых сигналов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков А. В., Яицкая Е. С. Рекуррентное систематическое помехозащитное преобразование кодов: возможности аппарата линейных двоичных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 17—25.
2. Баранов С. И. Синтез микропрограммных автоматов. Л.: Энергия, 1979.
3. Бохман Д., Постхофф Х. Двоичные динамические системы. М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 600 с.
5. Гилл А. Линейные последовательностные машины. М.: Наука, 1974. 288 с.

#### Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Ушаков** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: ushakov-AVG@yandex.ru
- Елена Сергеевна Яицкая** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: yaitskayaes@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики

Поступила в редакцию  
25.04.11 г.