

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 Δt ; 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 Δt , 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 описание 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 μ , 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).

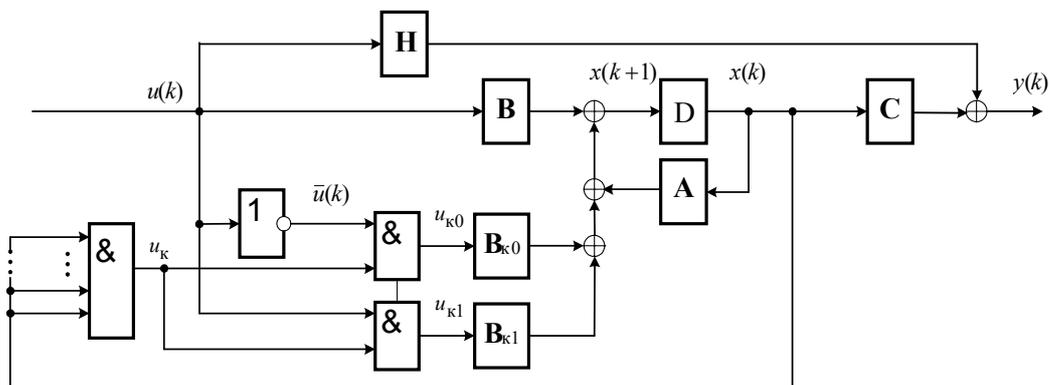


Рис. 1

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.

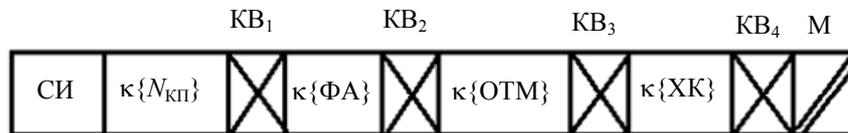


Рис. 2

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_{Σ} выходах n_{Σ} -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_{Σ} 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.