*К. т. н. Ю. Д. ИВАНОВ*

Украина, Одесский национальный политехнический университет

Дата поступления в редакцию
31.10 2008 г.

Оппонент *д. т. н. Э. А. СУКАЧЁВ*
(ОНАС им. А. С. Попова, г. Одесса)

# УНИВЕРСАЛЬНАЯ МАТРИЦА СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ $n$-МЕРНОГО КУБА $E^n$ ЕДИНОГО КОДИРУЮЩЕГО ФОРМАТА

*Показана возможность реализации универсальной матрицы, предназначенной для построения единого кодирующего формата, кодовой комбинации структурно-логического кода и исправления ошибок преобразования в кодовых комбинациях СЛК.*

Одной из основных задач при преобразовании дискретных данных в ЭВМ является обеспечение необходимой помехоустойчивости этих данных в случае аппаратных сбоев. Для решения этой задачи часто используются корректирующие коды, которые позволяют с высокой вероятностью достичь требуемой помехоустойчивости превращаемых данных. В любом случае, использование корректирующих кодов приводит к усложнению аппаратной части при реализации кодирующих-декодирующих устройств (кодеков), увеличению требуемого объема памяти, снижению относительной скорости обработки данных, при программной реализации алгоритмов кодирования-декодирования — к понижению производительности процессора.

В качестве альтернативы известным методам обеспечения помехоустойчивости данных с помощью корректирующих кодов можно использовать структурно-логические коды (**СЛК**) [1], что приводит к относительно небольшому усложнению аппаратной части, в сравнении с известными корректирующими кодами, понижению требуемого объема памяти за счет представления данных на основе инфимумных дизъюнктивных нормальных форм (**ИДНФ**) булевых функций (**БФ**) [2], к значительно меньшему снижению относительной скорости обработки данных за счет использования естественной структурно-логической избыточности [3], а также к незначительному снижению производительности ЭВМ при реализации простого алгоритма.

Для проведения структурно-логических кодирующих и декодирующих преобразований конъюнкций ИДНФ БФ необходимо организовать единый кодирующий формат (**ЕКФ**), кодовую комбинацию СЛК в виде куба $n$-й мерности $E^n$, который обеспечивал бы достаточную логическую избыточность переменных развертывания этого куба для коррекции помех на длине кодовой комбинации. Длина кодовой комбинации определяется мерностью $n'$ куба $E^{n'}$ единого кодирующего формата, являющегося подкубом куба $E^n$, и составляет

$$n_{\text{слк}} = 2^{n'} n_{\text{в}}, \qquad (1)$$

где $2^{n'}$ — число вершин $n'$-мерного куба $E^{n'}$ ЕКФ;
$n_{\text{в}}$ — число битов (разрядов) вершины куба $E^{n'}$ ЕКФ, причем $n_{\text{в}} \geq n'$.

Число вершин куба $E^{n'}$ ЕКФ определяет логическую избыточность переменных развертывания этого куба, а следовательно, корректирующие свойства СЛК, подробно рассмотренные в [1—3]. Процедуры кодирующих и декодирующих преобразований конъюнкций ИДНФ БФ организуются в терминах ЕКФ [4] СЛК, что при общем подходе к построению кодирующего-декодирующего устройства, т. е. кодека СЛК, предопределяет необходимость реализации универсальной матрицы структурно-логических преобразований в терминах ЕКФ соответствующего СЛК.

Согласно общей методике кодировки СЛК [1], каждая из конъюнкций ИДНФ булевой функции преобразуется в соответствующий куб $E^{n'}$ ЕКФ, представляющий собой кодовую комбинацию СЛК, причем размерность $n'$ куба $E^{n'}$ ЕКФ одинакова для всех преобразуемых конъюнкций ИДНФ. Правда, в пределах выбранного ЕКФ конъюнкции ИДНФ с различными рангами обеспечивают разную логическую избыточность [3], что необходимо учитывать при анализе корректирующих свойств СЛК.

Длина кодовой комбинации СЛК, согласно выражению (1), определяет объем кодирующей матрицы преобразования, состоящей из $2^{n'}$ столбцов и $n_{\text{в}}$ строк, соответственно.

Число разрядов вершин куба $E^{n'}$ соответствует числу переменных, составляющих эти вершины, и определяет их ранг, то есть

$$n_{\text{в}} = r_{\text{в}}. \qquad (2)$$

С другой стороны, число переменных, составляющих конъюнкцию, определяет ранг этой конъюнкции, то есть

$$n_{v} = r_{v}. \qquad (3)$$

Таким образом, при равенстве рангов вершин куба $E^{n'}$ и конъюнкций ИДНФ, т. е. при $r_{\text{в}} = r_{v}$, число переменных, по которому возможно развитие исходной вершины, соответствующей конъюнкции ИДНФ, в куб $E^{n'}$, будет равно

$$n' = r_{\text{в}} - r_{v} = 0, \qquad (4)$$

что определяет число столбцов кодирующей матрицы превращений как

$$2^{n'}=2^{r_{\text{в}}-r_{\nu}}=2^0=1. \qquad (5)$$

Эти рассуждения корректны только в том случае, когда мощность множества переменных, составляющих вершины куба $E^{n'}$, равна или больше мощности множества переменных, образующих конъюнкции преобразуемой ИДНФ, то есть

$$\left|x_{n_{\hat{a}}-1}, \ldots, x_1, x_0\right| \geq \left|x_{n_{\nu\max}-1}, \ldots, x_1, x_0\right|, \qquad (6)$$

$n_{\nu\max}$ — число переменных, составляющих конъюнкции совершенной дизъюнктивной нормальной формы (**СДНФ**) преобразуемой БФ.

Выражение (6) сводится к

$$n_{\text{в}} \geq n_{\nu\max}. \qquad (7)$$

С учетом вышесказанного справедлива лемма 1:

*Число столбцов кодирующей матрицы преобразований конъюнкции ИДНФ БФ определяется как*

$$2^{n'}=2^{n_{\text{в}}-n_{\nu}}, \qquad (8)$$

при $n'=n_{\text{в}}-n_{\nu}$ и $n_{\text{в}} \geq n_{\nu\max}$.

Рассмотрим пример кодирующей матрицы преобразований конъюнкций ИДНФ БФ, заданной выражением

$$f_{\text{èäí ô}} = \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3 x_0 \vee \bar{x}_2 x_1 \vee x_3 x_2 \bar{x}_1. \qquad (9)$$

В качестве ЕКФ выберем куб $E^3$, т. е. $n'=3$, с числом разрядов вершин $n_{\text{в}}=5$. При этом условие (7) выполняется, т. к. число переменных составляющих конъюнкции СДНФ БФ, заданной ИДНФ (9), составляет $n_{\nu\max}=4$.

Согласно лемме 1, число столбцов кодирующей матрицы преобразований (**МП**) определится как $2^{n'}=2^3=8$ для всех конъюнкций (9). Правда, для конъюнкции $\bar{x}_2\bar{x}_0$, $\bar{x}_3 x_0$, $\bar{x}_2 x_1$ при разворачивании их в куб $E^3$ по методу СМР [3] используются соответствующие дополняющие переменные развертывания, т. е. $x_4 x_3 x_1$, $x_4 x_2 x_1$, $x_4 x_3 x_0$. Для конъюнкции $x_3 x_2 \bar{x}_1$ в качестве дополняющих могут использоваться переменные $x_4$, $x_0$, по которым возможно развертывание только куба $E^2$. В качестве 3-й разворачивающей могут быть использованы переменные $x_3$, $x_2$ или $x_1$, что, однако, приведет к снижению исправляющей способности кодовой комбинации конъюнкции $x_3 x_2 \bar{x}_1$, т. к. истинная логическая избыточность реализуется только в пределах куба $E^2$, который построен по переменным $x_4$, $x_0$.

Кодирующая МП для ИДНФ (9) представлена на **рис. 1**. В МП для конъюнкции $x_3 x_2 \bar{x}_1$ при развитии куба $E^2$ в куб $E^3$ использована переменная $x_2$, что не позволяет реализовать максимальную логическую избыточность по переменным $x_3$, $x_2$ и $x_1$ в пределах куба

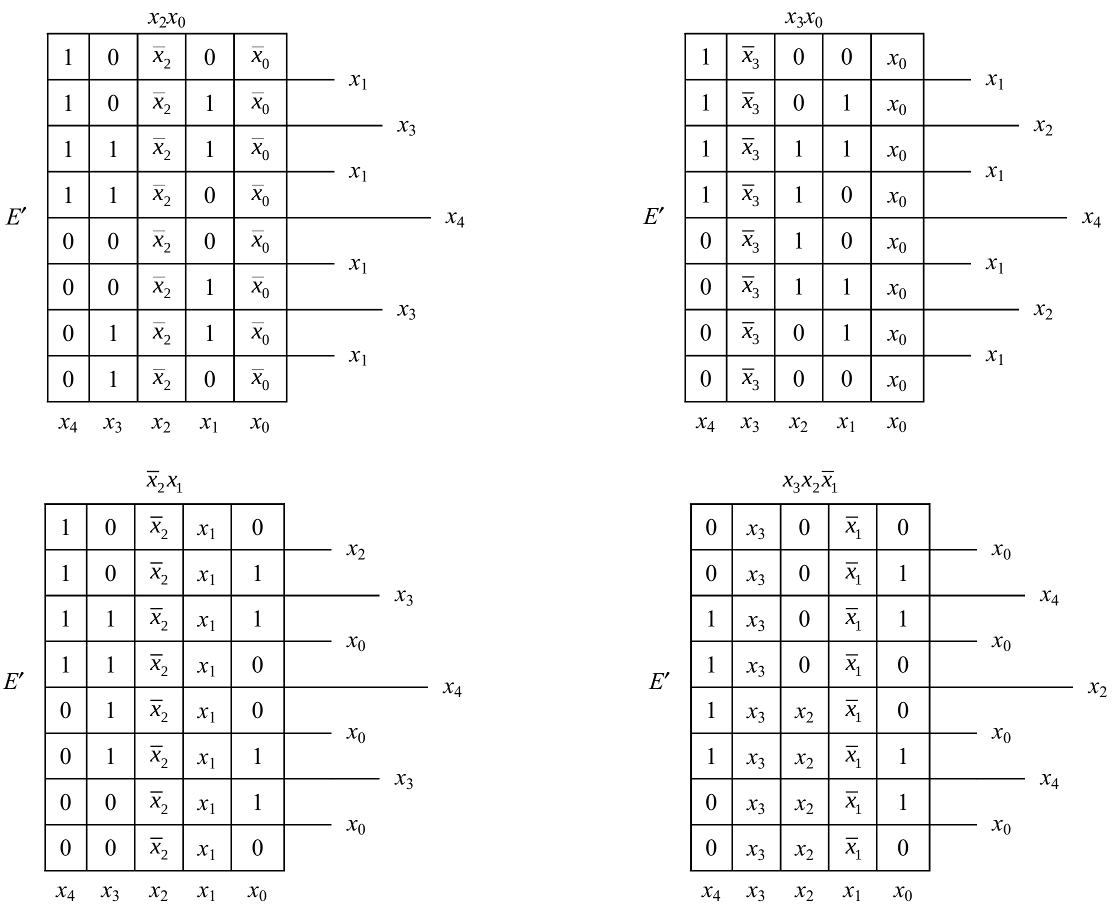



Рис. 1

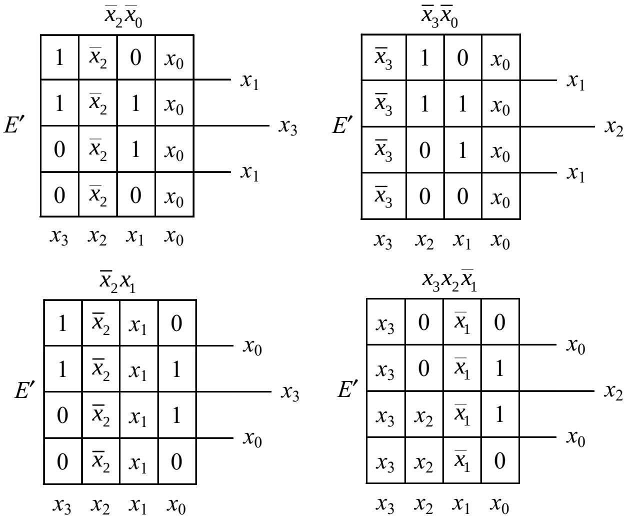



Рис. 2

$E^3$, а только в пределах куба $E^2$ (нижние 4 столбца МП конъюнкции $x_3x_2\bar{x}_1$).

Для конъюнкций ИДНФ (9) в качестве ЕКФ можно выбрать куб $E^2$ при $n'$=2. Пусть число разрядов вершин такого куба будет $n_в$=4. Тогда условие (7) также выполняется для БФ, заданной (9), т. е. 4=4. Число столбцов соответствующей кодирующей МП будет равно $2^2$=4. Кодирующая МП для куба $E^2$ ЕКФ ИДНФ (9) представлена на **рис. 2**.

В МП для конъюнкций $x_3x_2\bar{x}_1$ при развитии куба $E^1$ в куб $E^2$ используется переменная $x_2$, что не позволяет реализовать логическую избыточность по переменным $x_3$, $x_2$, $x_1$ в пределах куба $E^2$ ЕКФ. Полная логическая избыточность реализуется только в пределах куба $E^1$, что снижает корректирующие свойства кодовой комбинации конъюнкции $x_3x_2\bar{x}_1$.

Дискретные данные, представленные в виде кубов $E^{n'}$ ЕКФ, т. е. кодовых комбинаций СЛК, полученных в кодирующей МП, обрабатываются посредством ЭВМ. Обрабатывающие каналы вычисляемых структур либо каких-то других электронных устройств вносят определенные искажения в данные как на программном, так и на аппаратном уровне. Возникающие ошибки и аппаратные сбои данных могут быть исправлены путем соответствующих декодирующих преобразований и полностью либо частично восстановлены.

В общем случае процедура структурно-логических преобразований дискретных данных может быть представлена следующим образом (**рис. 3**).

На первом этапе преобразований дискретные данные представляются на основе инфимумных дизъюнктивных нормальных форм булевых функций [2], что позволяет обеспечить компактное представление данных за счет их сжатия приблизительно в 2 раза и, следовательно, соответственное уменьшение необходимой памяти. Дальнейшая разработка методов представления данных на основе ИДНФ позволит еще больше увеличить коэффициент сжатия и существенно уменьшить объем памяти.

Представленная в минимально возможном объеме дискретная информация кодируется в МП путем представления каждой конъюнкции ИДНФ в виде куба $E^{n'}$ ЕКФ, т. е. кодовой комбинации СЛК. При этом реализуется структурная логическая избыточность переменных развития куба $E^{n'}$ ЕКФ, определяющая корректирующие свойства кодовой комбинации СЛК.

При обработке данных в ЭВМ возникают ошибки как за счет программных, так и аппаратных сбоев, приводящих к искажению информации. В реальных каналах обработки данных ошибки носят, как правило, пакетный характер, т. е. имеют тенденцию к группировке. СЛК хорошо работают в тяжелых каналах, где ошибки коррелированы, что следует из анализа, проведенного в [5].

Основной задачей декодирующей МП является исправление ошибок, появившихся в процессе обработки дискретных данных. Декодирующая МП по своей сути является декодером кодовых комбинаций СЛК, которые представляют собой $n'$-мерные кубы $E^{n'}$ ЕКФ. Основы теории декодирующих преобразований СЛК подробно изложены в [4], однако принципы построения декодирующих МП необходимо рассмотреть детальнее.

Как указывалось ранее, процедуры кодирующих и декодирующих преобразований организуются в единственных терминах $n$-мерного куба $E^n$ ЕКФ, что предопределяет реализацию универсальной кодирующей-декодирующей матрицы структурно-логических преобразований, т. е. структурно-логической МП. Декодирование кодовых комбинаций СЛК, т. е. кубов $E^{n'}$ ЕКФ, определяет конъюнкции ИДНФ. После определения всех конъюнкций осуществляется восстановление ИДНФ путем их объединения. Если ИДНФ восстановлена корректно, то восстановление дискретных данных происходит однозначно.

Структурно-логическая МП является матрицей размерностью $n_в \times 2^{n'}$. Понятно, что для корректной реализации структурно-логической МП (матрица ЕКФ) необходимо выполнение условия (7) и леммы 1. Матрица ЕКФ (ее размерность) остается неизменной как при кодирующих преобразованиях конъюнк-

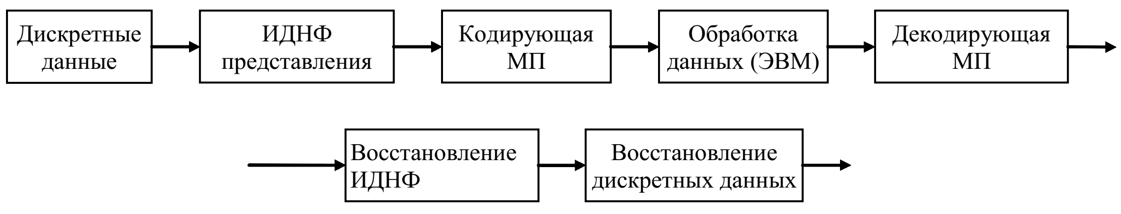



Рис. 3

ций ИДНФ, так и при декодирующих преобразованиях ЕКФ, т. е. при восстановлении конъюнкций ИДНФ. Проведение декодирующих преобразований нуждается в реализации дополнительных функций исправления ошибок переменных конъюнкции, соответствующей декодируемому ЕКФ.

При кодировке конъюнкции ИДНФ $n_в$ строк матрицы ЕКФ последовательно за $2^{n'}$ такта записываются значения переменных конъюнкций $x_0, x_1, \ldots, x_{n_в-1}$. Значения переменных матрицы ЕКФ должны отвечать значениям переменных конъюнкции ИДНФ таким образом, чтобы соответствующие строки матрицы ЕКФ заполнялись переменными $x_i$=1 или $\overline{x}_i = 0$ по всем $2^{n'}$ столбцам. Строки матрицы ЕКФ, которые не соответствуют переменным кодирующей конъюнкции ИДНФ, заполняются последовательно за $2^{n'}$ тактов двоичными номерами вершин куба $E^{n''}$ согласно совершенному размещению геометрических соседей (СРГС) [3]. Мерность куба $E^{n''}$, а значит и число его вершин, необходимых для заполнения строк матрицы ЕКФ, не соответствующих переменным кодирующей конъюнкции ИДНФ, равное $2^{n''}$, определяется по формуле

$$n''=n_в-n_v. \qquad (10)$$

Если переменных $n''$ из числа разрядов $n_в$ не хватает для развития куба $E^{n'}$, то могут использоваться переменные из числа $n_v$, которые составляют конъюнкцию, в полном соответствии с СРГС. При этом необходимо учитывать определенные ограничения, связанные с уменьшением исправляющей способности кодовой комбинации СЛК, о которых говорилось ранее. Так, например, при $n''$=2 число двухразрядных вершин куба $E^2$ составляет $2^2$=4, которые, согласно СРГС, определены как 00, 01, 11, 10. Заполнение соответствующих строк (в данном случае двух) матрицы ЕКФ осуществляется за 4 такта последовательно, причем первой следует вершина со «старшим» номером, а именно 10, а вершина 00 записывается последней на четвертом такте. При $n''$=3 трехразрядные вершины куба $E^3$ составляют множество 000, 001, 011, 010, 110, 111, 101, 100. Заполнение трех строк матрицы ЕКФ осуществляется за 8 тактов. Первой записывается вершина со «старшим» (по СРГС) номером 100, а последней, восьмой, следует вершина 000.

Полученный в матрице ЕКФ куб $E^{n'}$ записывается в исходную буферную матрицу в параллельном формате, а затем последовательно, построчно, выдается в канал обработки.

Для декодирования кодовой комбинации СЛК куба $E^{n'}$, полученного из канала обработки, используется та же матрица ЕКФ, что и для кодировки дискретных данных. Канальный куб $E^{n'}$ ЕКФ, записанный в матрицу, отличается наличием ошибок переменных ИДНФ, представляющих обрабатываемые данные, что определяет основную задачу при декодировании, а именно исправление ошибок переменных ИДНФ для полного восстановления дискретных данных.

Методы коррекции ошибок при помощи СЛК проанализированы достаточно подробно в [4], однако аппаратная реализация методов декодирования, обусловленных логической избыточностью переменных ИДНФ в кубе $E^{n'}$, как наиболее естественных и простых, требует подробного рассмотрения.

При декодировании матрица ЕКФ служит только для записи канального куба $E^{n'}$, причем число строк определяется числом разрядов вершин куба $E^{n'}$ и составляет $n_в$, а число столбцов равняется $2^{n'}$. Если за основу матрицы ЕКФ принять сдвиговые регистры, то строка будет соответствовать сдвиговому регистру на $2^{n'}$ разрядов. Каждый из $n_в$ регистров имеет последовательный и $2^{n'}$ параллельных выходов. Число выходов матрицы равно числу последовательных выходов всех регистров, причем каждый регистр имеет $2^{n'}$ параллельных выходов. Непосредственное исправление ошибок переменных ИДНФ осуществляется в блоке определителя переменных, значения выходов которого подаются на входы корректора конъюнкций ИДНФ. Корректор конъюнкций непо-

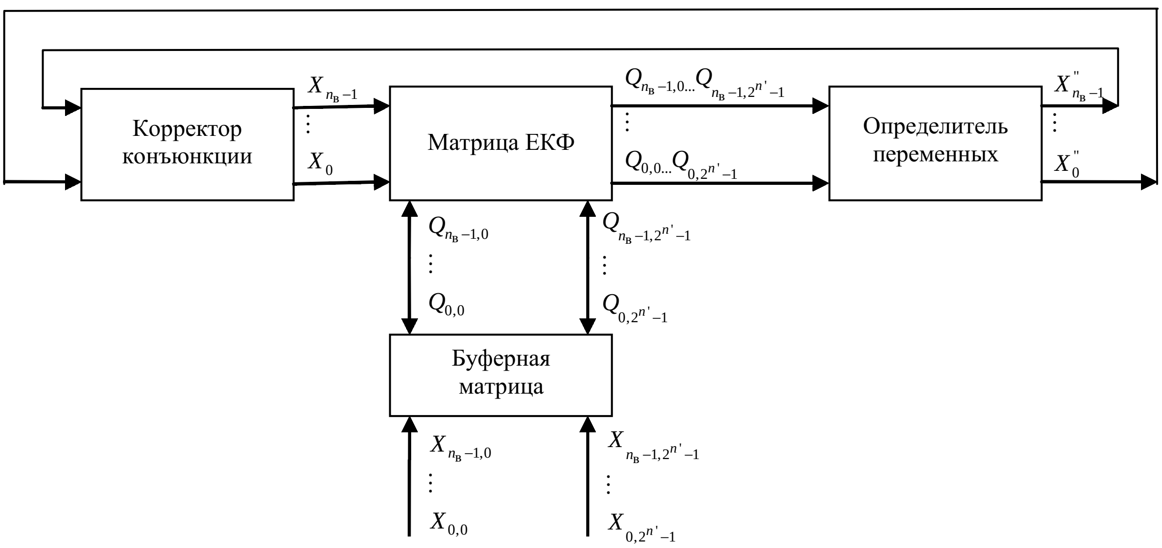



Рис. 4

средственно связан со входами регистров переменных ИДНФ матрицы ЕКФ.

Общая схема структурно-логических кодирующих и декодирующих преобразований СЛК представлена на **рис. 4**.

При кодировании на выходе матрицы ЕКФ появляются данные, которые поступают на обработку. В результате декодирования возобновляется кодовая комбинация СЛК, т. е. куб $E^{n'}$ ЕКФ, который используется для восстановления ИДНФ и, в итоге, дискретных данных.

С помощью корректора конъюнкций выполняется последовательная запись значений переменных конъюнкций в соответствующие строки матрицы ЕКФ. Строки матрицы ЕКФ, которые не отвечают переменным кодирующей конъюнкции ИДНФ, корректор конъюнкций заполняет последовательно двоичными номерами вершин куба $E^{n''}$ размерности $n''$.

Последовательная запись строк (регистров) матрицы ЕКФ выполняется за $2^{n'}$ тактов.

Значения переменных кодирующей конъюнкции ИДНФ считываются корректором конъюнкции из блока конъюнкций (**рис. 5**), а двоичные номера вершин $n''$-мерного куба $E^{n''}$ считываются с матрицы констант, которая заполняется генератором СРГС.

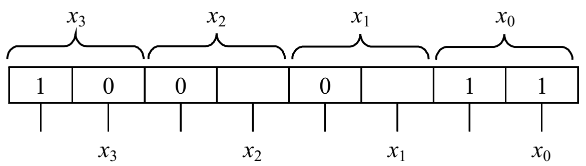



Рис. 5

В блоке конъюнкций каждая переменная занимает 2 бита, причем левая единица отмеченных сверху пар бит говорит о наличии данной переменной в конъюнкции, а правый бит отвечает значению переменной.

Определитель переменных представляет собой блок мажоритарных элементов (**МЭ**), число которых определяется числом регистров (строк) матрицы ЕКФ и отвечает числу разрядов вершин куба $E^{n'}$ ЕКФ $n_в$. На входы МЭ подаются значения выходов триггеров конкретного регистра, который отвечает одной переменной ИДНФ. Таким образом, число входов МЭ определяется числом вершин $n'$-мерного куба $E^{n'}$ ЕКФ и составляет $2^{n'}$. В случае ошибок переменных канальных кубов $E^{n'}$ ЕКФ МЭ определяют действительные значения переменных, причем решение выносится по большинству относительно значения каждой переменной, и с помощью корректора конъюнкций восстанавливают значение переменных в матрице ЕКФ.

Для вынесения корректного решения по большинству более половины из $2^{n'}$ входов МЭ должны быть приняты без ошибок, т. е. порог вынесения решения $M$ определяется согласно лемме 2:

*Порог вынесения корректного решения мажоритарным элементом должен быть хотя бы на 1 больше половины числа всех входов, которое составляет $2^{n'}$, то есть*

$$M \geq 2^{n'-1}+1. \qquad (11)$$

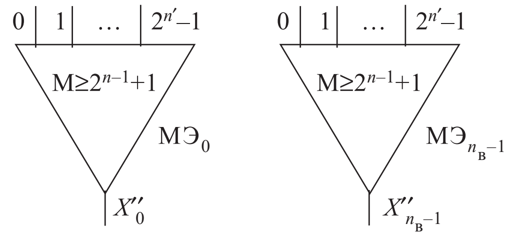



Рис. 6

На **рис. 6** представлена структурная схема определителя переменных.

Определитель переменных выносит решение по каждой из $n_в$ переменных ИДНФ, которые используются корректором конъюнкций для восстановления куба $E^{n'}$ ЕКФ в матрице ЕКФ, и содержит $n_в$ МЭ (по числу разрядов вершин куба $E^{n'}$ ЕКФ). Число входов каждого МЭ составляет $2^{n'}$ и определяется числом вершин куба $E^{n'}$, т. е. числом столбцов матрицы ЕКФ. Выход каждого МЭ подключается к последовательному входу соответствующей строки матрицы ЕКФ через переключатели корректора конъюнкций.

Корректор конъюнкций осуществляет последовательную запись значений переменных конъюнкции по строкам матрицы ЕКФ в режиме кодировки, используя блок конъюнкций, реализованный по схеме на рис. 5, а также осуществляет порядковое введение в матрицу ЕКФ двоичных номеров вершин куба $E^{n''}$, мерность $n''$ которого определяет число строк матрицы ЕКФ, не отвечающих переменным кодирующей конъюнкции ИДНФ. Вершины куба $E^{n''}$ считываются с матрицы констант, которая заполняется согласно СРГС в соответствии с его размерностью $n''$. В режиме коррекции переменных конъюнкций в принятом канальном кубе $E^{n'}$ ЕКФ корректор конъюнкций использует значение переменных, определенных в блоке определителя переменных, т. е. на выходах МЭ $x''_0, x''_1, ..., x''_{n_{â}-1}$. Обеспечение режимов кодировки и коррекции происходит с помощью двух групп переключателей П′ и П. Каждый переключатель из этих групп реализован на элементах «ИЛИ-НЕ». Управление переключателями происходит с использованием управляющих входов М, значение которых будет разъяснено при детальном рассмотрении структурной схемы корректора конъюнкций, представленной на **рис. 7**.

В качестве примера рассмотрим структурную схему корректора конъюнкций и матрицы ЕКФ, представленную на **рис. 8**, выполненных для куба $E^2$ ЕКФ с числом разрядов вершин $n_в$=4, которые отвечают переменным кодирующей конъюнкции $x_0$, $x_1$, $x_2$, $x_3$. Из схемы видно, что матрица ЕКФ имеет размерность 4×4.

Число переключателей каждой группы равно 4, и они имеют следующие обозначения: $П'_0, П'_1, П'_2, П'_{n_в-1}, П_0, П_1, П_2, П_{n_в-1}$.

Группа переключателей П′ вместе с матрицей констант куба $E^{n''}$, которая содержит четыре 2-разрядные вершины, т. е. $n''$=2, сгенерированные в соответствии

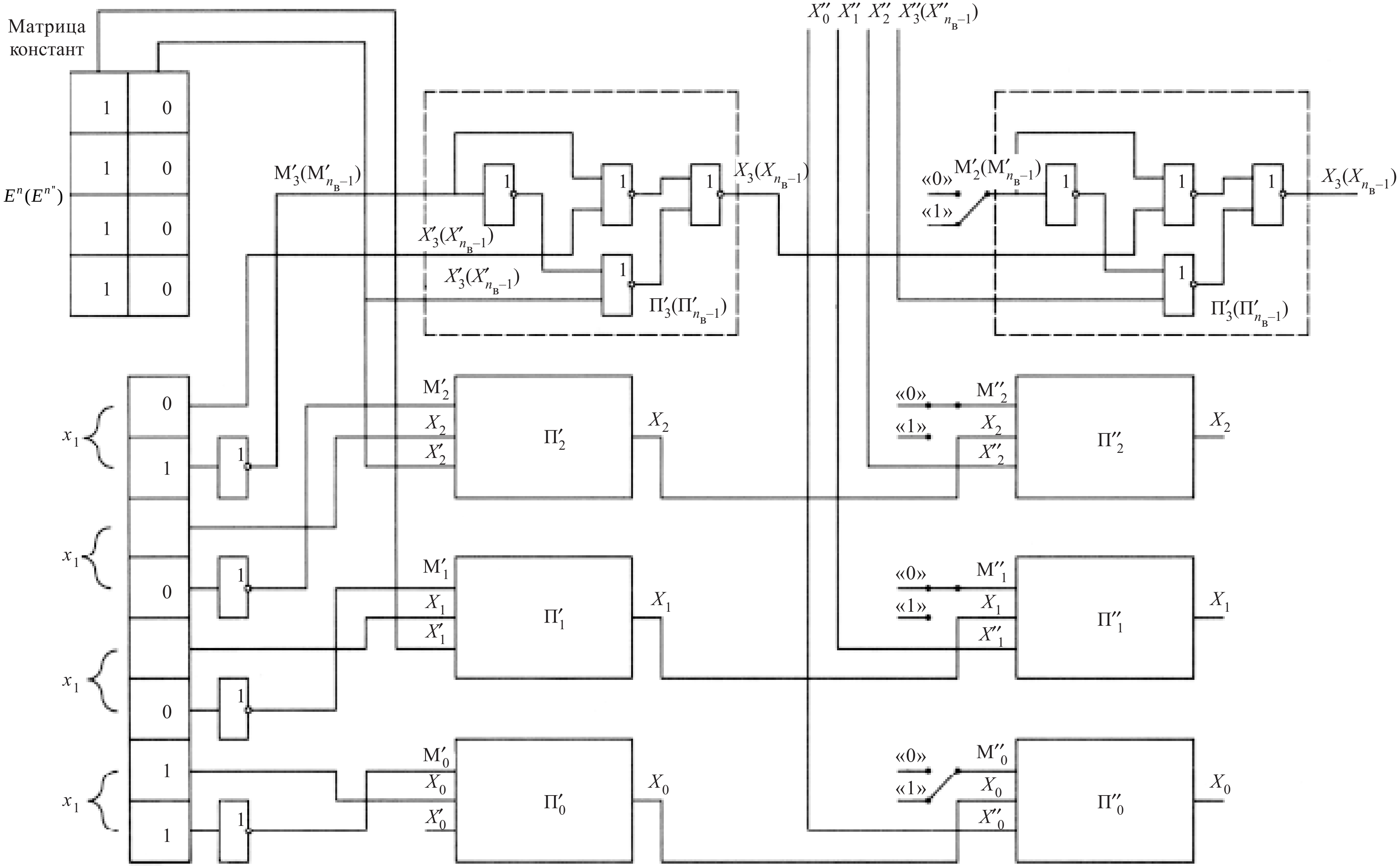
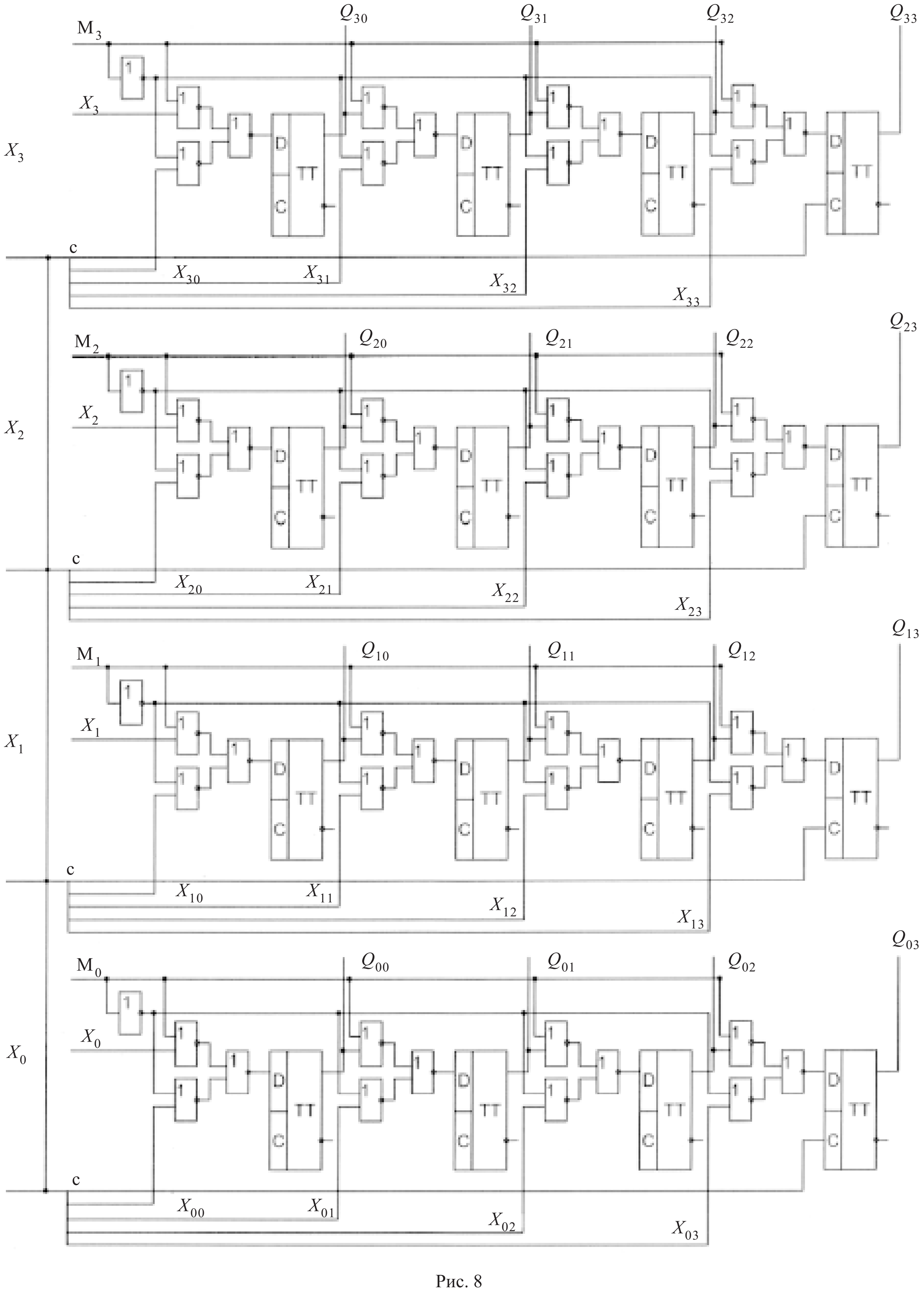

Матрица констант
$E^n(E^{n''})$
$X''_0$ $X''_1$ $X''_2$ $X''_3(X''_{n_в-1})$
$M'_3(M'_{n_в-1})$
$X_3(X_{n_в-1})$
$X'_3(X'_{n_в-1})$
$\Pi'_3(\Pi'_{n_в-1})$
«0» «1»
$M'_2(M'_{n_в-1})$
$x_1$
$M'_2$ $X_2$ $X'_2$ $\Pi'_2$
$M'_1$ $X_1$ $X'_1$ $\Pi'_1$
$M'_0$ $X_0$ $X'_0$ $\Pi'_0$
$M''_2$ $X''_2$ $\Pi''_2$
$M''_1$ $X''_1$ $\Pi''_1$
$M''_0$ $X''_0$ $\Pi''_0$

Рис. 7



$Q_{30}$ $Q_{31}$ $Q_{32}$ $Q_{33}$
$M_3$
$X_3$
$X_3$
c
$X_{30}$ $X_{31}$ $X_{32}$ $X_{33}$
$Q_{20}$ $Q_{21}$ $Q_{22}$ $Q_{23}$
$M_2$
$X_2$
$X_2$
c
$X_{20}$ $X_{21}$ $X_{22}$ $X_{23}$
$Q_{10}$ $Q_{11}$ $Q_{12}$ $Q_{13}$
$M_1$
$X_1$
$X_1$
c
$X_{10}$ $X_{11}$ $X_{12}$ $X_{13}$
$Q_{00}$ $Q_{01}$ $Q_{02}$ $Q_{03}$
$M_0$
$X_0$
$X_0$
c
$X_{00}$ $X_{01}$ $X_{02}$ $X_{03}$


Рис. 8

с СРГС, обеспечивают кодировку конъюнкции $\bar{x}_3 x_0$, которая записана в блоке конъюнкций. Левый бит двухбитной ячейки, соответствующей конкретной переменной, определяет наличие данной переменной в конъюнкции (если бит содержит единицу, это означает присутствие переменной, и тогда правый бит содержит ее значение).

Значение управляющих входов переключателей М′ определяется значением левого бита блока конъюнкций. При наличии в этом бите единицы, а в нашем случае это отвечает переменным $x_3$ и $x_0$, значение управляющих входов $М'_3 = М'_0 = 0$, что обеспечивает работу входов $x_3$ и $x_0$. При этом на выходах $x_3$ и $x_0$ переключателей $П'_3$ и $П'_0$ появляются значения переменных $x_3$=0 и $x_0$=1, соответственно. Управляющие входы $М'_2$=$М'_1$=1 вызывают срабатывание входов $x'_2$ и $x'_1$ переключателей $П'_2$ и $П'_1$. Значение входов $М'_2$ и $М'_1$, равное 1, объясняется наличием нулей в левых битах переменных $x_2$ и $x_1$, что говорит об отсутствии этих переменных в кодирующей конъюнкции. В этом случае по входам $x'_2$ и $x'_1$ будут записываться значения вершин куба $E^2$ ($E^{n''}$), что отобразится на соответствующих выходах $x_2$ и $x_1$ переключателей $П'_2$ и $П'_1$.

Значения переменных и констант на выходах $x_3$, $x_2$, $x_1$, $x_0$ переключателей за $2^{n'}=2^2=4$ такта записываются во все $n_в$=4 строки матрицы ЕКФ, что реализует куб $E^2$ ЕКФ кодовой комбинации СЛК заданной конъюнкции .

В режиме кодировки конъюнкций значения управляющих входов $М''_3, М''_2, М''_1, М''_0$ переключателей $П''_3, П''_2, П''_1, П''_0$ равны 0, т. е. $М''_3$=$М''_2$=$М''_1$=$М''_0$=0. В этом случае значения переменных и констант передаются по входам $x_3$, $x_2$, $x_1$, $x_0$ переключателей П′′. В итоге все строки матрицы ЕКФ будут заполнены и куб $E^2$ ЕКФ организован. Полученный куб $E^2$ ЕКФ, т. е. кодовая комбинация СЛК конъюнкции, в параллельном формате построчно переписывается в буферную матрицу (рис. 4).

Для записи данных в буферную матрицу используются выходы триггеров регистров соответствующих строк матрицы ЕКФ, т. е. $Q_{30}$, $Q_{21}$, $Q_{32}$, $Q_{33}$, …, $Q_{00}$, $Q_{01}$, $Q_{02}$, $Q_{03}$. Из буферной матрицы данные поступают в канал обработки.

В режиме коррекции конъюнкций в принятом из канала обработки куба $E^2$ ЕКФ используются значения переменных конъюнкции, определенные в блоке определителя переменных на выходах МЭ $x''_0, x''_1, x''_2, x''_3$. Эти значения подаются на соответствующие входы переключателей П′′. Данные, которые принимаются из канала обработки, записываются сначала в параллельном формате построчно в буферную матрицу по входам $x_{30}$, $x_{31}$, $x_{32}$, $x_{33}$, …, $x_{00}$, $x_{01}$, $x_{02}$, $x_{03}$. Потом принятые данные переписываются по аналогичным входам в матрицу ЕКФ.

Для коррекции используются только те входы МЭ блока определителя переменных, которые соответствуют переменным, присутствующим в конъюнкции. В нашем случае единицами в битах наличия переменной в конъюнкции отмечены переменные $x_3$ и $x_0$ в блоке конъюнкций. Чтобы привести коррекцию значений этих переменных на переключатели П′′ подаются значения выходов $x''_3$ и $x''_0$ МЭ блока определителя переменных. Для этого на управляющие входы $М''_3$ (переключатель $П''_3$) и $М''_0$ (переключатель $П''_0$) подаются логические единицы, что приводит к подключению необходимых выходов МЭ $x''_3$ и $x''_0$. За $2^{n'}$=4 последующих такта полностью корректируются переменные $x_3$ и $x_0$ в матрице ЕКФ. При этом на управляющие входы $М''_2$ и $М''_1$ переключателей $П''_2$ и $П''_1$ подается логический нуль, что обусловливает корректную перезапись за 4 такта тех строк матрицы ЕКФ, которые не отвечают переменным конъюнкции $\bar{x}_3 x_0$. В результате коррекции куб $E^{n'}$ ЕКФ (в нашем случае куб $E^2$) полностью возобновляется.

Матрица ЕКФ собрана на регистровых структурах с использованием *D*-триггеров, причем ввод и вывод данных возможен как в параллельном, так и в последовательном режимах.

## Выводы

Разработана универсальная матрица структурно-логических преобразований дискретной информации в терминах *n*-мерного куба $E^n$, предназначенная для построения единого кодирующего формата, кодовой комбинации структурно-логического кода и исправления ошибок преобразования в кодовых комбинациях СЛК. Матрица может быть реализована на основе современных микроконтроллеров при соответствующем программном обеспечении, что определяет возможность ее широкого использования в вычислительных структурах для обеспечения необходимой помехоустойчивости обрабатываемых дискретных данных.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Іванов Ю. Д., Пампуха І. В., Захарова О. С., Жиров Г. Б. Метод структурно-логічного кодування інфімумних диз'юнктивних нормальних форм булевих функцій в базисі кубу $E^n$ // Зб. наук. праць Військового інституту Київського національн. ун-ту.— 2006.— № 5.— С. 46—49.

2. Лєнков С. В., Боряк К. Ф., Іванов Ю. Д., Селюков О. В. Метод представлення дискретної інформації на основі інфімумних диз'юнктивних нормальних форм булевих функцій // Там же.— 2008.— № 11.— С. 90—97.

3. Іванов Ю. Д., Пампуха І. В., Перегудов Д. О., Захарова О. С. Основи реалізації природньої структурно-логічної надмірності диз'юнктивних нормальних форм представлення даних // Вісн. Київського національн. ун-ту. Військово-спеціальні науки.— 2007.— № 14.— С. 12—15.

4. Іванов Ю. Д., Пампуха І. В., Осипа В. О., Охрамович М. М. Узагальнений метод структурно-логічного декодування інфімумних форм подання булевих функцій // Зб. наук. праць Військового ін-ту Київського нац. ун-ту.— 2006.— № 4.— С. 48—53.

5. Лєнков С. В., Іванов Ю. Д., Пампуха І. В., Боряк К. Ф. Особливості корегуючих властивостей структурно-логічних кодів // Захист інформації.— 2007.— № 4 (36).— С. 75—81.