

УДК 519.725

Л.Б. Макаров, А.Н. Битченко, Г.Ф. Коняхин, Н.А. Коваленко

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## СИНТЕЗ ИНВЕРСНЫХ ПОРОГОВЫХ СХЕМ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ В НЕАЛГЕБРАИЧЕСКИХ ДЕКОДЕРАХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОДОВ

*В статье рассматривается синтез инверсных пороговых схем в базе арифметических сумматоров и возможности применения их в некоторых простых неалгебраических декодерах канальных кодов. В частности, показана эффективность применения пороговых схем в качестве логических блоков проверки синдромов в декодерах с вылавливанием ошибок.*

**Ключевые слова:** пороговые схемы, декодеры корректирующих кодов, синдром, декодер Меггита с выловом ошибок, логический блок проверки скользящих синдромов, пространственно-временная диаграмма.

### Введение

**Постановка проблемы.** Высокая достоверность передачи информации в цифровых каналах связи обеспечивается путем повышения их помехоустойчивости, прежде всего, за счет использования помехоустойчивого (канального, корректирующего, избыточного) кодирования, в частности, разработка и практическая реализация так называемых турбокодов, позволили вплотную приблизиться к потенциальной помехоустойчивости даже при работе в сильно зашумленных низкоэнергетических каналах передачи информации. Однако вопрос простоты реализации кодеров и, прежде всего, декодеров, обеспечение высоких скоростей обработки в них цифровой информации и, тем самым, возможности использования их в высокоскоростных цифровых каналах передачи и некоторые другие вопросы, пока еще остаются не в полной мере разрешенными и требуют дальнейших исследований.

**Анализ публикаций и исследований.** Известно, что наиболее слабым вопросом реализации основной идеи помехоустойчивости кодирования и практической разработки кодеров, является разработка простых и эффективных декодеров, а также методов декодирования. За пятьдесят лет своего интенсивного развития в технике связи, записи на ЗУ и прочитывания данных были успешно введены пороговые, синдромные, мажоритарные декодеры, эффективный алгоритм Витерби декодирования сверточных кодов, коды РС и их кодеки, каскадные схемы кодирования, алгебраические декодеры для длинных блоковых кодов, а также разработки последнего времени: алгоритмы для турбокодов и многопороговые декодеры (МПД) [1 – 3]. Этому способствовали огромные достижения в технологии микроэлектроники, которые дали возможность создания достаточно мощных алгоритмов коррекции ошибок.

В то же время не утратили своей значимости и востребованности и короткие коды (Хемминга, цик-

лические, БЧХ, Галлея и др.), которые используются как автономно, так и в составе каскадных конструкций [1 – 3]. Среди декодеров, декодирующих их кодовые слова (синдромные, пороговые, мажоритарные), выделяются простотой, универсальностью и эффективностью работы декодеры Меггита с выловом ошибок, структурные электрические схемы которых с описанием принципа их действия, приведены в [1, 2, 4]. Одним из основных блоков таких декодеров является так называемый логический блок проверки скользящих синдромов согласно заданным критериям или просто «логический блок». Это устройство может быть выполнено как в аппаратном варианте на основе интегральных микросхем малой и средней степени интеграции (МИС и СИС), так и на основе микропроцессора (МП), в программно-аппаратном варианте. При выборе элементной базы в данном случае была взята за основу блок-схема алгоритма выбора элементной базы при проектировании цифровых узлов РТС [5].

Анализ рассматриваемого логического блока декодера в соответствии с указанным алгоритмом указывает на преимущество выполнения логического блока на ИМС «жесткой» логики. Однако реализация пороговых и мажоритарных устройств в базе логических элементов громоздка, поэтому в [5] предложен и рассмотрен эффективный вариант синтеза пороговых схем в базе четырехразрядных арифметических сумматоров, который отличается простотой и малым количеством ИМС. Правда, рассматриваются в этом учебнике лишь пороговые схемы, которые работают по принципу выходной реакции лишь по факту превышения заданного порога суммой входных сигналов (логических единиц).

**Целью** данной статьи является демонстрация возможностей синтеза «инверсных» пороговых схем, реагирующих по выходу на факт не превышения суммой входных сигналов порога, эффективно и удачного использования таких схем в каналь-

ных декодерах в качестве логического блока проверки синдромов и детальная потактовая демонстрация функционирования декодера с выловом ошибок с помощью пространственно-временной диаграммы (ПВД).

**Основная часть**

Обычные пороговые схемы срабатывают по превышению порога. Однако в ряде технических применений требуются пороговые схемы, реагирующие на все случаи, когда сумма входов меньше (или не превышает) порога. Такие схемы получили название инверсных пороговых схем (рис. 1).

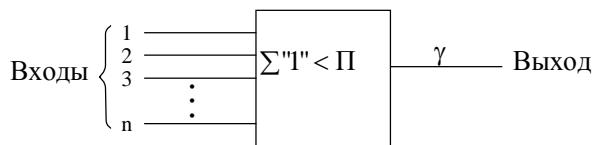


Рис. 1. Структура инверсной пороговой схемы

Для начала рассмотрим пример синтеза инверсных пороговых схем в базисе четырехразрядных арифметических сумматоров подобно тому, как это делается в прямых пороговых схемах.

В этом случае на выход схемы не должны пропускаться числа с весом, равным порогу или превышающим его ( $\omega \geq \dot{I} \rightarrow$  запрещается), где  $\omega$  - вес (значение) числа.

Проиллюстрируем сказанное на примере. Пусть нужно синтезировать инверсную пороговую схему на семь входов с критерием работы

$$\gamma = 1 \Big|_{\omega < \dot{I} = 2} \cdot \tag{1}$$

Схема такого устройства приведена на рис. 2.

Подобные инверсные пороговые схемы находят применение в ряде технических устройств, например, в декодерах Меггита или декодерах с вылавливанием ошибок, где они используются в роли логического блока проверки скользящих синдромов по заданным критериям (ЛБ ПСС).

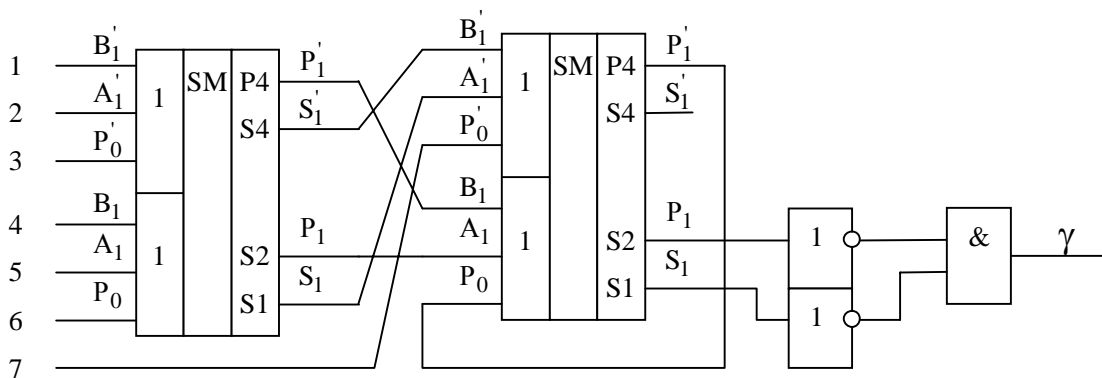


Рис. 2. Инверсная пороговая схема в базисе четырехразрядных арифметических сумматоров с n=7 и Π=2

Как известно, декодер Меггита и его модификации рекомендуются применять лишь для работы с помехоустойчивыми кодами, максимальная кратность исправляемых ошибок которых не превышает трех. В противном случае сложность декодеров стремительно возрастает и их использование практически невозможно.

Таким образом, декодеры Меггита могут работать по кодам Хемминга, коротким циклическим кодам и кодам БЧХ, обычному и расширенному кодам Галлея и др.

Продemonстрируем пример использования инверсной пороговой схемы, изображенной на рисунке 2, в качестве ЛБ ПСС декодера с вылавливанием ошибок линейного блокового циклического кода БЧХ (15, 7). Этот код обладает следующими характеристиками:

- длина кодового слова  $n = k + r = 15$  бит;
- длина информационной части кодового слова  $k = 7$  бит;
- величина избыточности  $r = 8$  бит;

- минимальное кодовое расстояние  $d_{\min} = 5$ .

Корректирующая способность данного кода определяется следующими параметрами:

- кратность обнаруживаемых ошибок

$$t_{\text{д}} \leq d_{\min} - 1 = 5 - 1 = 4; \tag{2}$$

- кратность исправляемых ошибок

$$t_{\text{и}} \leq \frac{d_{\min} - 1}{2} = \frac{5 - 1}{2} = 2. \tag{3}$$

Из справочника, например [1, 2], можно найти значение образующего полинома  $g(x)$  для рассматриваемого кода, представляемое обычно в 8-ричной форме, и перевести его в полиномиальную.

Для кода БЧХ (15, 7) значение  $g(x)$  равно  $721_8$

$$721_8 = 111\ 010\ 001_2 \rightarrow \rightarrow g(x) = \delta^8 + \delta^7 + \delta^6 + \delta^4 + 1. \tag{4}$$

Структурная схема декодера Меггита с вылавливанием ошибок для кода БЧХ (15, 7) представлена на рис. 3.

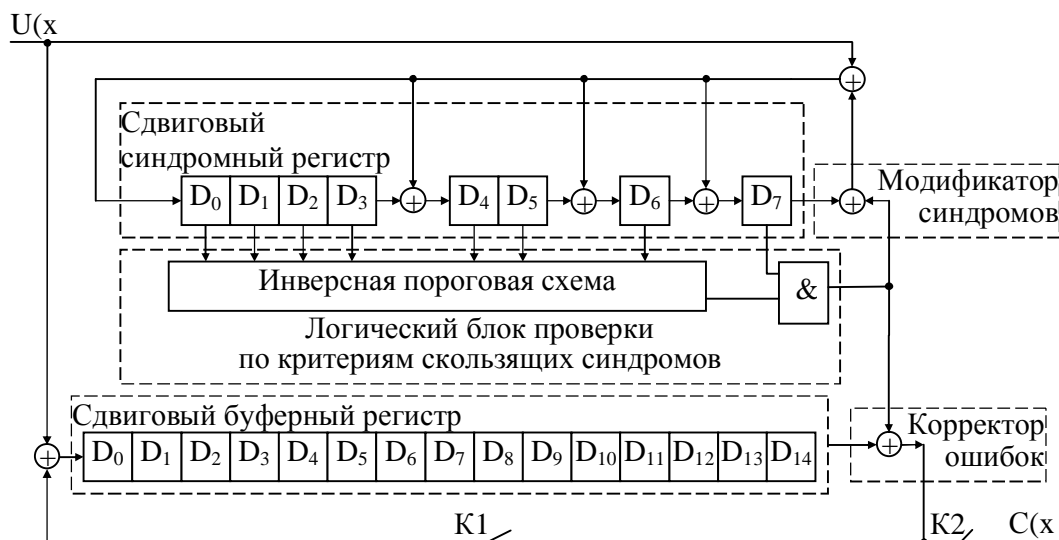


Рис. 3. Структурная схема декодера Меггита с вылавливанием ошибок для кода БЧХ (15, 7)

Такой декодер включает в себя следующие функциональные узлы и блоки:

- сдвиговый синдромный регистр длиной  $n - k$  с цепью обратной связи;
- логический блок проверки скользящих синдромов (ЛБ ПСС);
- сдвиговый буферный регистр длиной  $n$ ;
- выходной корректор ошибок;
- модификатор синдрома;
- цепь обратной связи буферного регистра.

Не останавливаясь на теоретических вопросах принципов построения и функционирования подобных декодеров, подробно описанных в учебниках и монографиях [1, 3] и др., поясним его работу с помощью динамической пространственно-временной диаграммы (ПВД). Для этого необходимо сформировать одно из кодовых слов  $C(x)$  кода БЧХ (15, 7).

Наиболее простым методом его формирования является несистематический, согласно которому

$$C(x) = i(x)g(x), \quad (5)$$

где  $i(x)$  - информационная часть кодового слова, которая может принимать одно из  $2^k$  значений.

Пусть информационная часть кодового слова имеет вид

$$i(x) = x^6 + 1. \quad (6)$$

Тогда значение кодового слова будет

$$\begin{aligned} C(x) &= (x^6 + 1)(x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1) = \\ &= x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1 = \\ &= x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + 1. \end{aligned}$$

Внесем в полученное кодовое слово две произвольных ошибки, руководствуясь моделью прохождения кодовых слов по каналу связи КС, структура которой приведена на рис. 4.

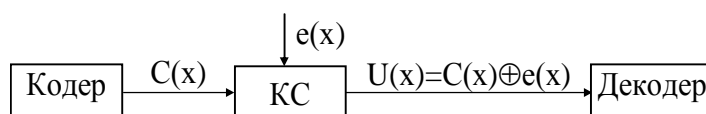


Рис. 4. Модель прохождения кодового слова по каналу связи

Пусть помеха имеет вид

$$e(x) = x^{12} + x^2, \quad (7)$$

тогда кодовое слово, искаженное помехой примет вид

$$\begin{aligned} U(x) &= C(x) \oplus e(x) = \\ &= (x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + 1) \oplus \\ &\oplus (x^{12} + x^2) = x^{14} + x^{13} + 0 + x^{10} + \\ &+ x^8 + x^7 + x^4 + x^2 + 1, \end{aligned} \quad (8)$$

что соответствует следующей двоичной последовательности:

$$U(x) = 110010110010101,$$

где разряды, искаженные помехой в линии связи, выделены цветом.

На рис. 5 построена пространственно-временная диаграмма, которая наглядно демонстрирует принцип работы всех звеньев декодера и механизм исправления ошибок.



Как видно из рисунка, ПВД состоит из двух полей с координатами "пространство" (ячейки регистров) - "время" (такты работы декодера). Левое поле детально демонстрирует последовательность функционирования синдромного регистра в течение трех этапов по 15 тактов каждый.

Метками отмечены места подсоединения цепей обратной связи. Правое поле показывает работу буферного регистра.

Кодовое слово, начиная со старшего разряда, поступает на входы синдромного и буферного регистров.

В синдромном регистре осуществляется параллельно-последовательный ввод и поразрядный сдвиг битов кодового слова.

В буферном регистре – их последовательный ввод и поразрядный сдвиг.

На первом этапе работы (такты 1÷15) в синдромном регистре формируются синдромы  $S(x)$  (признаки ошибок) в соответствии с правилом

$$S(x) = \text{Re}_{g(x)}[U(x)], \quad (9)$$

которое читается так: синдром равен остатку (Remainder) от деления кодовой посылки  $U(x)$  на образующий полином  $g(x)$ .

При этом кодовая посылка  $U(x)$  поступает из канала связи, а образующий полином  $g(x)$  определяет структуру построения синдромного регистра (места подключения цепей обратной связи).

Если к концу первого этапа работы синдромный регистр обнуляется, то в принятой для декодирования кодовой посылке  $U(x)$ , ошибок нет и  $U(x) = \tilde{N}(x)$ , а  $S(x) = 0$ .

В противном случае, как на представленном примере, ошибки в кодовом слове есть и  $U(x) \neq \tilde{N}(x)$ ,  $S(x) \neq 0$ .

Одновременно, в течение первого этапа работы декодера, биты кодовой посылки  $U(x)$  последовательно поступают на вход буферного регистра и с каждым тактом продвигаются к его выходу.

По окончании первого этапа замыкается ключ К1, которым замыкается цепь обратной связи буферного регистра и, начиная с 16-го такта, обеспечивается повторное принудительное прохождение кодовой посылки  $U(x)$  через буферный регистр.

Это необходимо для создания условий для исправления ошибок, расстояние между которыми в кодовой посылке превышает величину

$$n - k = r = 8.$$

Начиная с 16-го такта и уже до конца работы декодера, блок ЛБ ПСС анализирует содержимое

синдромного регистра. Такой анализ происходит путем получения ответов по двум критериям:

$$1. \sum_{\sin dRG} "1" \leq 2 ?$$

2. Одна из этих единиц принадлежит 8-й ячейке синдромного регистра?

Только при утвердительном ответе на оба эти вопроса на выходе блока ЛБ ПСС формируется сигнал логической единицы, который поступает на корректор ошибок и модификатор синдрома, исправляя на следующем такте ошибку в буферном регистре и модифицируя синдром, превращая в "0" сигнал обратной связи в синдромном регистре.

Анализ первого критерия обеспечивает инверсная пороговая схема, реализованная по схеме, приведенной на рис. 2, которая путем арифметического сложения количества логических единиц в его разрядах  $D_0 \div D_6$  выдает уровень логической единицы, если эта сумма меньше заданного порога.

В данном примере, в соответствии с (1),  $\gamma = 2$ , а, следовательно, пороговая схема будет выдавать на выходе логическую "1", если эта сумма будет меньше двух.

Эта единица при наличии логической "1" на ее выходе в старшем разряде синдромного регистра (второй критерий) приводит к срабатыванию логического элемента "И", выходной сигнал которого и поступает на корректор ошибок и модификатор синдрома, производя вышеописанные операции коррекции кода и модификации синдрома.

Анализ ПВД показывает, что наложенные условия на работу ЛБ ПСС выполняются в тактах 27 и 32.

Следовательно, в тактах 28 и 33 произведена коррекция сигнала в цепи обратной связи синдромного регистра и старшего разряда буферного регистра.

Как видно из ПВД, одна ошибка исправляется за время второго этапа работы декодера, а вторая - через случайное число тактов третьего этапа.

С началом 3-го такта работы замыкается ключ К2, и исправленная кодовая посылка в последовательном коде передается в приемное устройство. Кроме того, эта же посылка, к концу 3-го этапа, в параллельном коде хранится в буферном регистре.

К началу 4-го этапа работы декодер готов к обработке очередной кодовой посылки, поступающей из канала связи.

Анализ работы ЛБ ПСС показал, что приведенная на рис. 2 инверсная пороговая схема может быть легко модифицирована для выполнения требуемых функций ЛБ ПСС, как это показано на рис. 6.

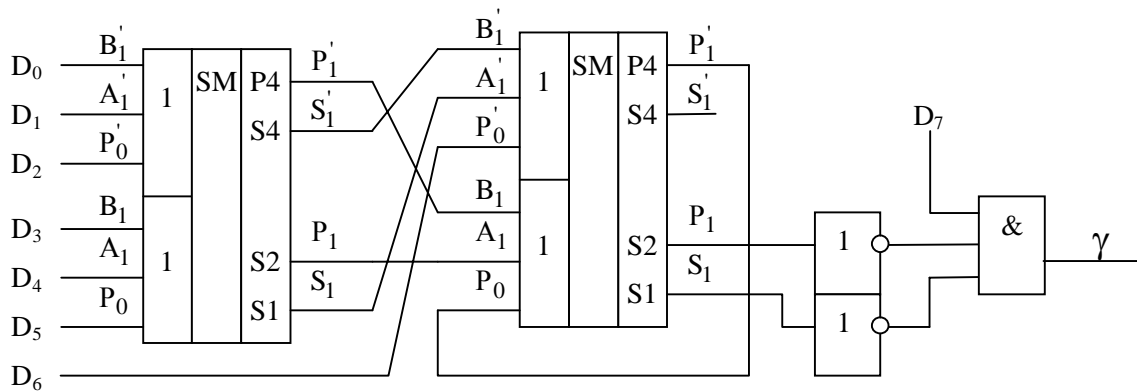


Рис. 6. Модифицированная инверсная пороговая схема для выполнения функций ЛБ ПСС

### Выводы

1. Рассмотренные инверсные пороговые схемы, наряду с другими применениями, весьма эффективны для использования в некоторых типах неалгебраических декодеров канальных кодов в качестве логических блоков проверки скользящих синдромов (ЛБ ПСС) по заданным критериям.

2. Несколько упрощенные инверсные пороговые схемы (с добавленными логическими элементами) являются комбинационными схемами и позволяют мгновенно (параллельно) выдавать ответы на оба критерия блока ЛБ ПСС и его реакцию.

3. Инверсные пороговые схемы, аналогично прямым пороговым схемам, синтезированные в базе арифметических сумматоров, намного проще в реализации подобных схем, спроектированных в базе элементарных логических элементов.

### Список литературы

1. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Дж. Кларк, Дж. Кейн; пер. с англ. под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.

2. Золотарев В.В. Помехоустойчивость кодирования. Методы и алгоритмы: справочник / В.В. Золотарев, Г.Ф. Овечкин; под ред. чл.-кор. РАН Ю.Б. Зубарева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 126 с.

3. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующая ошибки: пер. с англ. / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1986. – 576 с.

4. Патент RU № 85778. Неалгебраический декодер. Зарегистрировано в Гос. реестре полезных моделей РФ 10.08.2009 г. Авторы: Жилияков Е.Г., Белов С.П., Макаров Л.Б., Лихолоб П.Г.

5. Проектирование импульсных и цифровых устройств радиотехнических систем: учеб. пособие для радиотехнических спец. ВУЗов / Ю.П. Гришин, Ю.М. Казаринов, В.М. Катиков и др.; под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: ВШ, 1985. – 319 с.

Поступила в редколлегию 25.11. 2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Сахацкий, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

### СИНТЕЗ ІНВЕРСНИХ ГРАНИЧНИХ СХЕМ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ В НЕАЛГЕБРАЇЧНИХ ДЕКОДЕРАХ КОРИГУВАЛЬНИХ КОДІВ

Л.Б. Макаров, О.М. Бітченко, Г.Ф. Коняхін, М.О. Коваленко

У статті розглядається синтез інверсних граничних схем у базисі арифметичних суматорів і можливості застосування їх у деяких простих неалгебраїчних декодерах канальних кодів. Зокрема, показана ефективність застосування граничних схем як логічні блоки перевірки синдромів у декодерах з виловлюванням помилок.

**Ключові слова:** граничні схеми, декодери коригувальних кодів, синдром, декодер Меггіта з виловом помилок, логічний блок перевірки ковзних синдромів, просторово-тимчасова діаграма

### THE SYNTHESIS OF INVERSION THRESHOLD CHARTS FOR REALIZATION IN UNALGEBRAIC DECODERS OF CORRECTINGS KODAS

L.B. Makarov. O.M. Bitchenko. G.F. Konjakhin. M.O. Kovalenko

In the article the examined synthesis of inverse threshold charts is examined in the base of nonalgebraic adders and possibility of application of them in some simple unalgebraic decoders of channel kodas. In particular, efficiency of application of threshold charts is shown as logical blocks of verification of syndromes in decoders with catching of error.

**Keywords:** threshold charts, decoders of correctings kodas, syndrome, decoder of Meggita from vylo-vom errors, logical block of verification of sliding syndromes, spatio-temporal diagram.