

УДК 621.391.25:681.7.068

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОДОВ В ВОСП-СРК

БРЕСКИН В.А., РОЗЕНВАССЕР Д.М.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

SPECIALITIES OF ERROR-CONTROL CODES USAGE IN FOTS-WDM

BRESKIN V.A., ROZENVASSER D.M.

Odessa national academy of telecommunications n. a. A.S. Popov

Аннотация. В настоящей работе исследуется эффективность применения блочных корректирующих кодов BCH и Рида-Соломона для увеличения количества оптических каналов и цифровой ёмкости ВОСП – СРК на оптическом одномодовом волокне SF.

Annotation. In this paper we study the effectiveness of block BCH and Reed-Solomon error-control codes to increase the number of optical channels and a digital capacity of FOTS – WDM on SF single mode optical fiber.

Проблема повышение эффективности функционирования транспортных участков телекоммуникационной сети старых операторов, использующих волоконно-оптические системы передачи синхронной иерархии (ВОСП – СЦИ), решается сегодня путём переоборудования этих линии передачи заменой ВОСП – СЦИ на ВОСП – СРК [1].

Увеличение количества оптических каналов (ОК) ВОСП – СРК требует увеличения уровня передачи группового линейного оптического сигнала (ГЛОС) СРК, чтобы сохранить требуемую защищённость сигнала от помех.

Однако увеличение уровня передачи приводит к появлению нелинейных искажений в оптическом волокне (ОВ), возникновению нелинейных помех четырёхволнового смешения [2], а значит к ухудшению защищённости оптических канальных сигналов СРК. Это обстоятельство ограничивает допустимое количество оптических каналов $N_{ок}$, которое может быть увеличено с помощью корректирующего кода.

Целью статьи является численная оценка достижимых количества оптических каналов и цифровой ёмкости ВОСП – СРК при применении корректирующего кода (КК) с учётом запаса по затуханию в переоборудуемой ВОСП – СЦИ; а также оптимизация параметров наиболее подходящих для этой цели блочных КК.

В [3] показано, что допустимое количество оптических каналов $N_{ок}$, переоборудуемой ВОСП – СРК, определяется решением уравнения защищённостей:

$$10^{-0.1A_1} + 10^{-0.1A_2} = 10^{-0.1(A_{NM})}, \quad (1)$$

где A_1 и A_2 – ожидаемые защищённости от нелинейных и остальных помех секции регенерации соответственно, а A_{NM} – допустимая защищённость, определяемая допустимой вероятностью ошибки и запасом по защищённости.

Показано, что выбор величины ГЛОС СРК (p) противоречиво влияет на величину $N_{ок}$, формируя экстремум функции $N_{ок}(p)$, а численная оценка величины $N_{ок}$ существенно зависит от "нулевого" затухание нелинейности A_{10} . Величина A_{10} определялась с учётом расчётов, выполненных в [4]. Однако реальные значения могут быть и меньше. Примем $A_{10} = 60$ дБ.

Решение (1) имеет вид:

$$N_{ок}(p) = \frac{c - a(p)}{b(p)}, \quad (2)$$

где $a(p)$ - функция, зависящая от уровня передачи группового сигнала СРК и нелинейных свойств ОВ,

$b(p)$ - функция, зависящая от:

1. запаса по затуханию $\Delta A_{\text{уч}}$,
2. приращения уровня передачи в ВОСП – СРК по сравнению с переоборудуемой ВОСП – СЦИ,
3. допустимой вероятности ошибки, исправляющей способностью используемого корректирующего кода. c - коэффициент, зависящий от:
 - выбранной величины запаса по защищённости NM ,
 - допустимой вероятности ошибки,
 - исправляющей способности корректирующего кода КК.

Здесь запас по затуханию равен

$$\Delta A_{\text{уч}} = \alpha_n l_n - \alpha_{\text{уч}} l_{\text{уч}}, \quad (3)$$

где l_n и $l_{\text{уч}}$ - номинальная и фактическая длины участка регенерации переоборудуемой ВОСП - СЦИ;

α_n , $\alpha_{\text{уч}}$ - коэффициенты затухания ОВ, соответствующие l_n и $l_{\text{уч}}$;

Приведенные соотношения определяют ресурсы, использование которых позволяет увеличить количество оптических каналов $N_{\text{ок}}$ при внедрении СРК.

Таковыми ресурсами являются:

- оптимизация уровня передачи,
- использование запаса по затуханию $\Delta A_{\text{уч}}$ [3],
- увеличение запаса по затуханию $\Delta A_{\text{уч}}$, которое можно реализовать при использовании оптических усилителей (ОУ),
- использованием корректирующих кодов (КК).

В данной работе будем оценивать возможности ресурса КК для SF.

Эффективность применения корректирующего кода КК оценивается энергетическим выигрышем кодирования – ЭВК [5].

$$\text{ЭВК} = A_3 - A_{3,\text{КК}}, \quad (4)$$

где $A_3 = 10 \lg(h_1^2)$ и $A_{3,\text{КК}} = 10 \lg(h_2^2)$ - защищенности (в дБ), а h_1^2 и h_2^2 - отношения мощностей сигнала и шума (в раз) в системе передачи без кодирования и с кодированием соответственно.

Отличительной особенностью ВОСП является работа с низкими значениями вероятности ошибки порядка 10^{-12} - 10^{-15} . Из работы [6] следует, что для таких вероятностей ошибки наилучшие характеристики обеспечивают блочные коды. Основным класс блочных кодов – это коды БЧХ.

Величина ЭВК зависит от необходимого отношения сигнал/шум (ОСШ) и параметров используемого кода. Параметры кода БЧХ связаны между собой соотношением

$$n - k \leq m \cdot q_{\text{исп}}, \quad (5)$$

где n – длина кодового слова, k – количество информационных бит в блоке, m – основание кода, $m \geq \log_2(n+1)$, $q_{\text{исп}}$ – количество исправляемых ошибок, R – скорость кода, показывает какую часть в кодовом слове составляют информационные биты, $R = k/n$.

Вероятность ошибки p в системе передачи без кода вычисляется с помощью Q-функции. Для модуляции АМ-2

$$p = Q(h), \quad (6)$$

где

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (7)$$

Для расчетов удобно воспользоваться аппроксимацией этой функции

$$Q(z) \approx 0,65 \exp(-0,44(z+0,75)^2). \quad (8)$$

При использовании корректирующего кода

$$p_{\text{дек}} \approx \frac{d_{\min}}{n} \sum_{q=d_{\text{исп}}+1}^n C_n^q p^q (1-p)^{n-q}, \quad (9)$$

где $p_{\text{дек}}$ – вероятность ошибки бита на выходе декодера, d_{\min} – минимальное кодовое расстояние, $d_{\min} = 2q_{\text{исп}} + 1$.

По графику вероятности ошибки как функции защищенности A_3 , дБ находятся значения A_3 и $A_{3,\text{кк}}$ и ЭВК (4)

На рис 1 представлены результаты расчетов ЭВК кода БЧХ от скорости кода R для длины кодового слова 15 бит (кривые 1,2), 255 бит (кривые 3,5) и 1023 бита (кривые 4,6) при вероятности ошибки в канале 10^{-6} (кривые 1,3,4) и 10^{-12} (кривые 2,5,6).

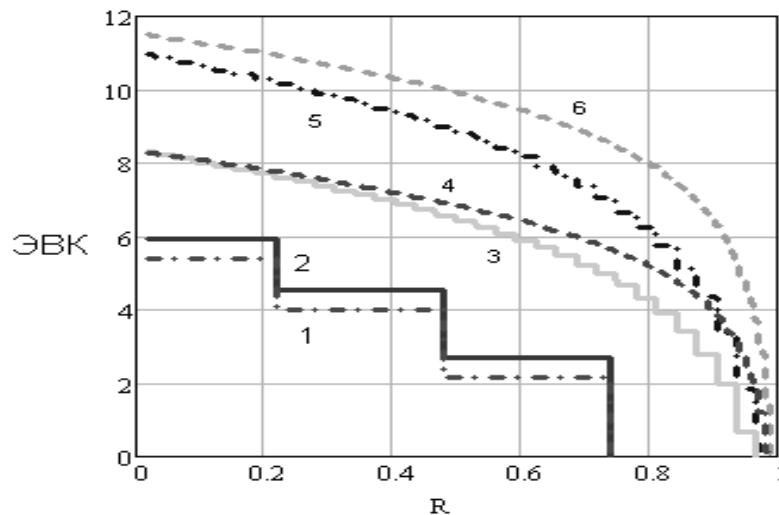


Рисунок 1 – Зависимость ЭВК корректирующего кода БЧХ от скорости кода R для разной длины блока и вероятности ошибки

Видно, что

- уменьшение скорости кода R ,
- увеличение длины блока и

- уменьшение величины требуемой вероятности ошибки позволяет увеличить ЭВК корректирующего кода.

Так при длине блока (1023 бита), скорости кода ($R = 0,1$) и вероятности ошибки 10^{-12} , ЭВК кода БЧХ может достигать 11 дБ.

На рис. 2 приведены значения $N_{ок}$ в зависимости от ЭВК и величины $\Delta A_{уч}$, рассчитанные по (2) при нулевом уровне мощности группового сигнала.

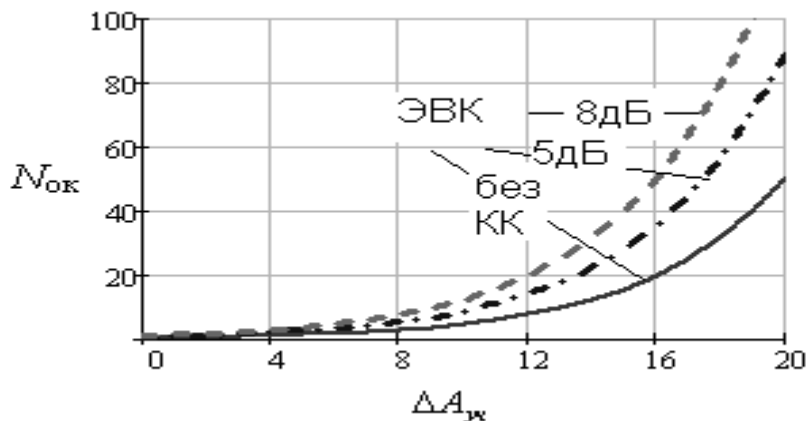


Рисунок 2 – Зависимость количества ОК от запаса по затуханию для разных значений ЭВК

Полученные зависимости (рис. 2) показывают, что применение корректирующего кода позволяет увеличить количество оптических каналов $N_{ок}$.

Так при запасе по затуханию 16 дБ, использование простого кода БЧХ (255,239), который обеспечивает ЭВК порядка 5 дБ, позволяет увеличить количество ОК СРК с 20 (до 35, т.е. на 75%.)

Практически оптические каналы СРК используются с разной эффективностью.

Рассмотрим, в качестве примера, плотные СРК, для которого полоса частот на один оптический канал равна 100 ГГц.

В выпускаемых промышленностью мультиплексорах СРК, использующих модуляцию оптического сигнала по интенсивности, фактическая полоса частот определяется наличием двух боковых, учетом двух лепестков спектра и использованием манчестерского кода. В этом случае при передаче STM-64 со скоростью 10 Гбит/с, фактическая полоса частот $\Delta F_{фс} = 82$ ГГц. Следовательно, допустимая скорость корректирующего кода может быть

равна $R = \frac{\Delta F_{фс}}{F} = \frac{82}{100} = 0,82$, что позволяет использовать этот запас для увеличения ЭВК

и, соответственно, количества ОК.

На рис. 3 приведена зависимость достижимого количества $N_{ок}$ от используемой скорости кода R при разных запасах по затуханию и фиксированной длине кода 255 бит.

Там же приведены значения скорости исходного сигнала B в одном канале рассматриваемого примера. Кривые 1,2,3 соответствуют запасу по затуханию 5, 10 и 12 дБ соответственно, уровню передачи 10 дБ и вероятности ошибки в канале 10^{-12} .

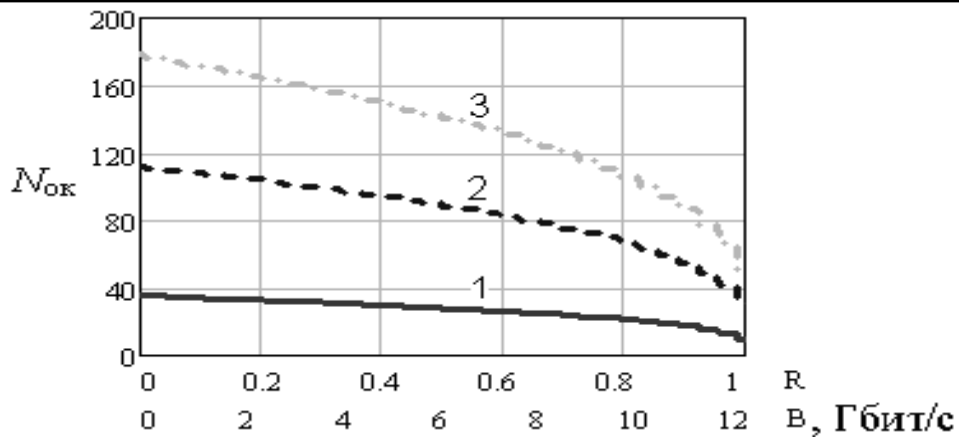


Рисунок 3 – Зависимость количества оптических каналов от скорости кода БЧХ и исходного сигнала в одном канале при длине блока 255 бит

Видно, что при уменьшении скорости кода с $R = 1$ до $R = 0,82$, использование КК позволяет увеличить количество ОК с 10 до 36 при запасе по затуханию 5 дБ и с 49 до 175 при запасе по затуханию 12 дБ, т.е. в 3,6 раза.

Таким образом, если оператору выгодно иметь большее количество ОК с меньшей скоростью передачи сигнала в каждом канале, то использование КК позволяет осуществить такое увеличение. Например, уменьшение R вдвое (до уровня 0,5), позволяет с помощью КК увеличить количество $N_{ок}$ втрое даже при малом запасе по затуханию 5 дБ.

Эффективным способом увеличения $N_{ок}$ ВОСП – СРК является увеличение длины кода. Ниже приведены расчеты $N_{ок}$ для двух блочных кодов – БЧХ и Рида-Соломона, который является разновидностью кода БЧХ. В РС увеличение длины кода, а значит и ЭВК осуществляется фактически за счёт символьной передачи бит. Этот код используется в рекомендации МСЭ G-975 для ВОСП [7].

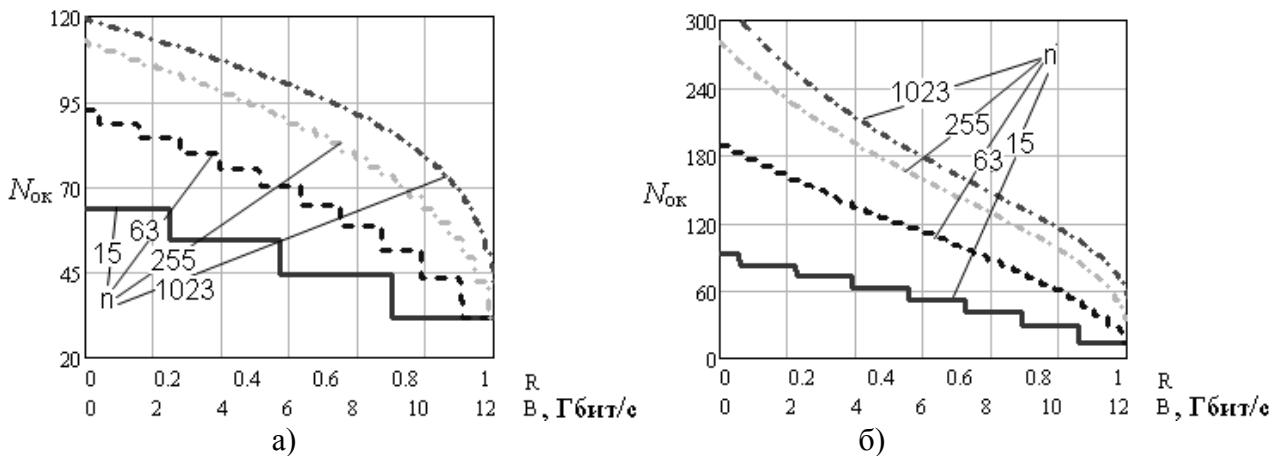


Рисунок 4 – Зависимость количества оптических каналов от скорости исходного сигнала в одном канале при различной длине блока КК БЧХ (а) и РС (б) при вероятности ошибки в канале 10^{-12}

Из рисунка 4 видно, что с увеличением длины блока возможное количество оптических каналов в СРК возрастает.

Так, при длине блока кода БЧХ (рис.4а) $n = 63$ бита, скорости $B = 2,5$ Гбит/с ($R = 0,2$) получаем 85 оптических канала, а при $n = 1023$ – 110 ОК.

Расчеты для кода РС показывают, что, при большей сложности реализации кода можно получить существенный выигрыш в количестве оптических каналов в

переоборудованной СРК. Так для РС с использованием тех же длин блоков, что и для БЧХ получаем 160 и 245 оптических каналов соответственно (рис. 4б).

Корректирующее кодирование (КК) позволяет увеличить цифровую ёмкость используемого СРК частотного диапазона оптического волокна.

Цифровая ёмкость определяется как максимальная результирующая (суммарная) скорость передачи цифрового сигнала B_{Σ} по всем ОК ВОСП – СРК.

$$B_{\Sigma} = B \cdot N_{ок}, \quad (10)$$

где B - скорость передачи по одному ОК ВОСП – СРК.

Составляющие B и $N_{ок}$ цифровой ёмкости B_{Σ} противоречиво влияют на величину B_{Σ} :

- с одной стороны, увеличение B увеличивает B_{Σ} ;
- с другой стороны увеличение B и соответствующее увеличение R уменьшает $N_{ок}$ и, тем самым, уменьшает B_{Σ} .

Как следствие, зависимость B_{Σ} от R имеет экстремум.

Ниже приведены результаты расчета, как для абсолютных, так и для относительных величин цифровой емкости.

Относительная цифровая емкость (ОЦЕ) рассчитана как отношение цифровой емкости ВОСП с корректирующим кодом к цифровой емкости без использования КК.

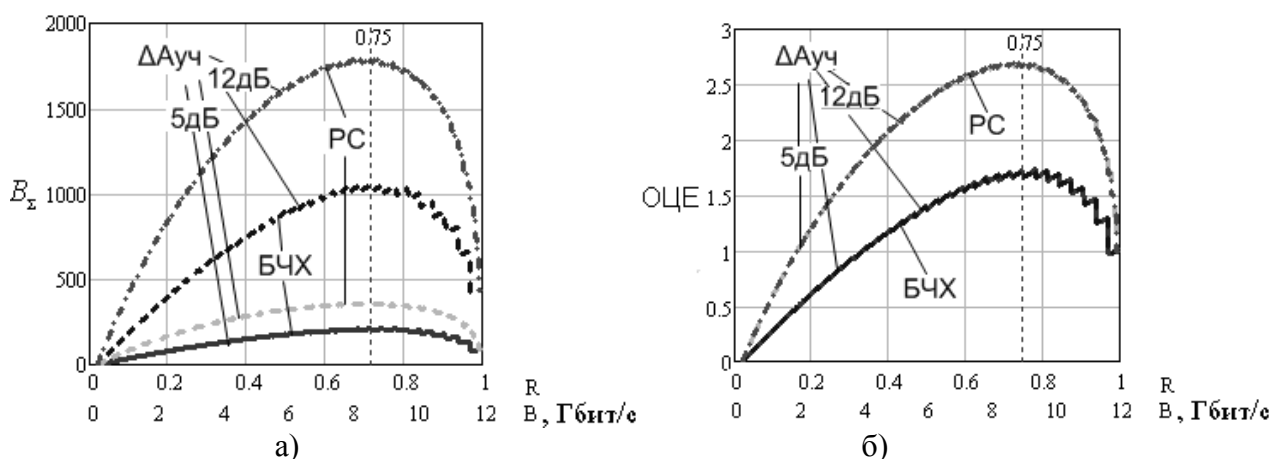


Рисунок 5 – Зависимость цифровой емкости (а) и ОЦЕ (б) ВОСП от скорости кодов БЧХ и РС и скорости исходного сигнала в одном канале при длине блока 255 бит и вероятности ошибки в канале 10^{-12}

Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 5а и рис. 5б при различном запасе по затуханию и уровне передачи 10 дБ:

- максимум достигается при $R = 0,75$ независимо от кода,
- максимальное значение ОЦЕ равно 170% для БЧХ и 270% для РС независимо от величины запаса по затуханию,
- абсолютное значение цифровой емкости ВОСП зависит от величины запаса и составляет при запасе по затуханию 12дБ, уровне передачи 10дБ и длине кода 255 бит, 1 Тбит/с для кода БЧХ и 1,8 Тбис/с для РС.

Ниже приведены расчеты влияния вероятности ошибки в канале и длины кода (рис. 6) для разных КК на цифровую емкость и ОЦЕ ВОСП.

Из рис. 6а видно, что уменьшение требуемой вероятности ошибки в одном канале с 10^{-6} до 10^{-15} позволяет:

- увеличить ОЦЕ для БЧХ на 40% и для РС на 90%.
- при этом максимальное значение ОЦЕ составляет 180% и 290% соответственно.

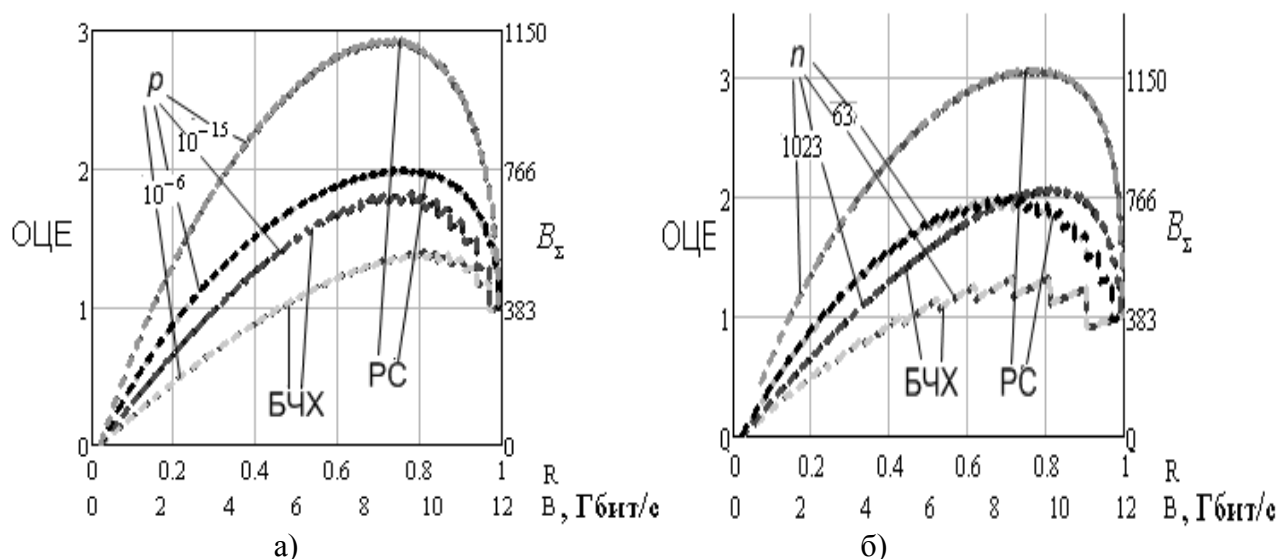


Рисунок 6 – Зависимость цифровой ёмкости и ОЦЕ ВОСП от скорости кода БЧХ и РС и скорости исходного сигнала в одном канале при различной вероятности ошибки в канале и длине блока 255 бит (а) и при различной длине блока и вероятности ошибки в канале 10^{-12} (б)

Из рисунка 6б видно, что увеличение длины блока с 63 до 1023 символов позволяет:

- увеличить ОЦЕ для БЧХ на 80% и для РС на 105%.
- при этом максимальное значение ОЦЕ составляет 210% и 305% соответственно.

ВЫВОДЫ

В работе приведены численные оценки достижимой величины $N_{ок}$ и цифровой ёмкости ВОСП – СРК за счёт использования корректирующих кодов БЧХ и РС.

Показано, что:

- существуют оптимальное значение скорости кода $R = 0,75$, при котором достигается экстремум цифровой ёмкости ВОСП – СРК,
- увеличение величины экстремума ОЦЕ и количества ОК можно получить за счёт увеличения длины блока и уменьшения требуемой вероятности ошибки,
- лучшие результаты по сравнению с БЧХ обеспечивает код Рида-Соломона.

Приведенные расчёты могут быть использованы при проектировании транспортных сетей с СРК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков Н.Л. Транспортные сети и сети электросвязи. Системы мультиплексирования: Учебник для вузов по специальности «Телекоммуникации»/ Н.Л. Бирюков, В.К. Стеклов –К., 2003,– 352 с., ил.
2. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика/ Г. Агравал: пер. с англ.–М.; Мир, 1996. – 232 с., ил.
3. Брескин В.А. Ресурсы переоборудования на WDM/ В.А. Брескин – Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. 2009. – №2.
4. Заславский К.Е. Расчет мощности помех, возникающих из-за четырехволнового смешивания в каналах ВОСП-WDM/ К.Е. Заславский, Л.М. Капустенко – Электросвязь. – № 10. – 2004. – с. 44-46.
5. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования/ Р. Морелос-Сарагоса – М.: Техносфера, 2005.
6. Розенвассер Д.М. Сравнение помехоустойчивых кодов ВОСП/ Д.М. Розенвассер – Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. 2010. – №1.
7. ITU-T Recommendation G.975.1. Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems, 2004.