

РАДИОТЕХНІКА, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯ ТА ЕЛЕКТРОНІКА Частина 2

УДК 621.372.8

ВЛИЯНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

Брескин В.А., Корнейчук В.И.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
vbr2001@mail.ru; kvikes@mail.ru*

ВПЛИВ ЧУТЛИВОСТІ ПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ РОЗДІЛЕННЯМ КАНАЛІВ

Брескін В.О., Корнійчук В.І.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.
vbr2001@mail.ru; kvikes@mail.ru*

INFLUENCING OF THE RECEIVER SENSITIVITY ON THE FIBER OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS WDM CAPACITY

Breskin V.A., Kornichuk V.I.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa, 65029, Ukraine
vbr2001@mail.ru; kvikes@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрено изменение чувствительности приёмных устройств ВОСП при переходе от технологии SDH к WDM и, как следствие, изменение допустимого количества спектральных каналов (СК). Приведены численные оценки максимально достижимого количества СК в зависимости от уровня передачи, чувствительности приемного устройства и числа усилительных участков на секции регенерации ВОСП-WDM.

Ключевые слова: SDH, WDM, спектральное мультиплексирование, число каналов, приемное устройство, чувствительность, нелинейные искажения.

Анотація. Розглянута зміна чутливості приймальних пристроїв ВОСП при переході від технології SDH до WDM і, як наслідок, зміна допустимої кількості спектральних каналів (СК). Приведені числові оцінки максимально досяжної кількості СК залежно від рівня передавання, чутливості приймального пристрою та числа підсилювальних ділянок на секції регенерації ВОСП-WDM.

Ключові слова: SDH, WDM, спектральне мультиплексування, кількість каналів, приймальний пристрій, чутливість, нелінійні спотворення.

Abstract. The change of sensitiveness of the receiving devices in fiber optic transmission systems (FOTS) transition from the SDH technology to WDM and, as a result, change of quantitative estimation of size of possible quantity of spectral channels is considered. Numeral estimations of the maximally attainable quantity spectral channels depending on the level of transmission, sensitiveness of receiving and number of amplifying path on the section of the WDM FOTS regeneration distance resulted.

Key words: SDH, WDM, wavelength division multiplexing, number spectral channels, receiver, sensitivity, nonlinear distortions.

Потребность пользователей в получении большей скорости передачи является постоянным стимулом к увеличению операторами связи пропускной способности телекоммуникационной сети. Существенным достижением в этом направлении стало появление одноволновых волоконно-оптических систем передачи ВОСП [1, 2] вначале на основе цифровых систем плездохронной (PDH), а затем и синхронной (SDH) цифровых иерархий.

Увеличение скорости передачи в таких ВОСП ограничивалось дисперсионными искажениями сигнала в оптическом волокне (ОВ) [6] и схмотехническими проблемами. Кардинальное увеличение пропускной способности ВОСП стало возможным при переходе к технологии спектрального мультиплексирования каналов – ВОСП-СРК (англ. Wavelength Division Multiplexing – WDM) [3, 4, 5].

Применение WDM позволило обойти указанные трудности и наращивать цифровую ёмкость системы передачи за счёт увеличения количества спектральных каналов (СК).

Считалось, что освоение новых частотных диапазонов одномодового ОВ – это путь к увеличению СК и, как следствие – путь к росту пропускной способности. Однако возможности этого направления тоже ограничены. В работах [7, 8] рассмотрены факторы, влияющие на количество СК при переходе от ВОСП-SDH к ВОСП-WDM.

Целью статьи является оценка влияния улучшения чувствительности приёмных оптоэлектронных модулей (ПРОМ) на количество СК и, тем самым, на пропускную способность ВОСП-WDM.

Будем считать, что на передаче используется общепринятая модуляция несущих по интенсивности [1-3].

В ВОСП-WDM следует различать *предельное* $N_{СК-П}$, *требуемое* $N_{СК-Т}$ и *допустимое* $N_{СК-Д}$ число спектральных каналов.

Предельное количество СК определяет цифровую ёмкость WDM, т.е. максимальную (суммарную для ВОСП-WDM) скорость передачи V_{Σ} , которую можно организовать в определенном спектральном диапазоне ОВ по всем каналам WDM

$$V_{\Sigma} = V_{СК} \times N_{СК-П},$$

где $V_{СК}$ – максимальная скорость передачи в одном спектральном канале. Например, для «С» участка спектра одномодового ОВ (с граничными длинами волн и частот $\lambda_1 = 1529$ нм $\rightarrow f_1 \cong 196$ ТГц и $\lambda_2 = 1569$ нм $\rightarrow f_2 \cong 191$ ТГц) ширина частотного диапазона равна $\Delta F_{СК} = 5$ ТГц. Для ВОСП-DWDM полоса частот, отводимая на один СК, $\Delta F_{СК} = 0,1$ ТГц и предельное количество спектральных каналов в диапазоне «С»

$$N_{СК-П} = \Delta F_C / \Delta F_{СК} = 5 / 0,1 = 50.$$

По одному СК в ВОСП-DWDM можно осуществить передачу цифрового потока уровня STM-256 со скоростью $V_{СК} = 40$ Гбит/с при использовании кода NRZ, так как в этом случае ширина спектра линейного оптического сигнала $\Delta F_{ЛОС} \cong 82$ ГГц $< \Delta F_{СК} = 100$ ГГц. Поэтому цифровая ёмкость этого спектрального диапазона

$$V_{\Sigma} = 40 \text{ Гбит/с} \times 50 = 2 \text{ Тбит/с}.$$

Требуемое количество СК $N_{СК-Т}$ определяется новой нагрузкой, которая и стала причиной переоборудования ВОСП-SDH на ВОСП-WDM и способом защиты трафика в сети WDM.

Допустимое количество СК $N_{СК-Д}$ определяется защищённостью сигнала от помех и зависит от следующих факторов:

- помех участка регенерации переоборудованной ВОСП-SDH;
- помех, накопленных на усилительных участках регенерационной секции WDM и, соответственно, от количества n усилительных участков на этой секции;

- помех взаимных влияний между каналами ВОСП-СРК;
- уровня передачи группового оптического сигнала ВОСП-СРК;
- уровня чувствительности новых приемных модулей ВОСП-СРК, заменяющих модули исходной, переоборудованной ВОСП-SDH.

Помехи взаимных влияний между каналами при спектральном мультиплексировании являются следствием нелинейных искажений («продуктов нелинейности») тракта передачи [9, 10]. Величина продуктов нелинейности зависит от их «порядка» и «рода». Наиболее опасны продукты нелинейности третьего порядка и первого рода, которые суммируются по напряжению. Продукты нелинейности первого рода большие по величине в тех оптических волокнах, для которых значение дисперсии мало и наоборот.

ВОСП-WDM работают в третьем окне прозрачности ОВ. Для этого окна малая удельная дисперсия присуща волокну типа DSF (рек. G. 653) и большая – волокну типа SF (рек. G. 652). Поэтому допустимое количество спектральных каналов будет большим для ОВ типа SF.

Количество СК существенно зависит от уровня передачи группового оптического сигнала ВОСП-WDM.

Изменение уровня передачи двояко влияет на количество СК: 1) увеличение уровня сигнала повышает защищённость сигнала от канальных помех и 2) ухудшает (уменьшает) защищённость от межканальных переходов – продуктов нелинейности.

Следствием этих противоречивых влияний является наличие оптимального уровня передачи, при котором максимизируется значение $N_{СК}$.

Совокупность факторов, позволяющих увеличить количество каналов при переходе от ВОСП-SDH к ВОСП-WDM, называют «ресурсом переоборудования» [3]. Ресурсами переоборудования являются:

- уменьшение коэффициента затухания ОВ α при переходе из 2-го окна прозрачности ОВ в третье и, как следствие, увеличение номинальной длины участка регенерации по затуханию l_H ;

- отличное от нуля значение запаса по затуханию участка регенерации

$$\Delta A_{уч} = \alpha_2 l_{H-2} - \alpha_3 l_{\phi-2}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где α_2 и α_3 – коэффициенты затухания ОВ во втором и третьем окнах прозрачности соответственно; l_{H-2} и $l_{\phi-2}$ – значения номинальной и фактической длины участка регенерации переоборудованной ВОСП-SDH, работающей во втором окне прозрачности;

- оптимизация уровня передачи p_w ;
- улучшение уровня чувствительности приемного оборудования

$$\Delta p_{чув} = p_{чs} - p_{чw} \quad (2)$$

за счёт изменения чувствительности ПРОМ усилительного участка ВОСП-WDM $p_{чw}$ по сравнению с чувствительностью ПРОМ регенеративной секции ВОСП-SDH $p_{чs}$.

Допустимое количество СК определяется из уравнения защищённостей [7, 8] и вычисляется по формуле

$$N_{ок-Д} = \frac{(b_N^2 + 0,1a_N)^{0,5} - b_N}{2 \times a_N}, \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_N &= 10^{-0,1\Delta A_{1N}}; \quad b_N = 10^{-0,1\Delta A_{2N}}; \\ \Delta A_{1N} &= A_{10} - 2p_w - A_F \lg(n); \\ \Delta A_{2N} &= 16 + \Delta A_{уч} + (p_w - p_s) + \Delta p_{ч} - 10 \lg(n). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь A_{10} – защищённость от нелинейных помех при $N_{СК} = 1$ и $p_w = 0$ дБм. Значение A_{10} зависит от вида нелинейных помех (1 или 2-го рода) и удельной дисперсии ОВ

$$A_{10} = \begin{cases} 73,8 \text{ дБ} - \text{ для ОВ типа SF,} \\ 57,8 \text{ дБ} - \text{ для ОВ типа DSF;} \end{cases} \quad (5)$$

где A_F – параметр, характеризующий эффект накопления нелинейных помех 1 или 2-го рода с увеличением количества усилительных участков n внутри регенеративной или мультиплексной секции.

$$A_F = \begin{cases} 10 \text{ дБ} - \text{ для ОВ типа SF,} \\ 20 \text{ дБ} - \text{ для ОВ типа DSF.} \end{cases} \quad (6)$$

Очевидно, что $N_{СК-д}$ является функцией следующих параметров

$$N_{ок-д}[p_w; (p_w - p_s); \Delta A_{уч}; \Delta p_c; n]. \quad (7)$$

Здесь p_s – уровень передачи переоборудуемых мультиплексоров SDH; $\Delta A_{уч}$ – запас по затуханию, определяемый соотношением (1); n – требуемое максимальное (худший случай) количество усилительных участков на секции регенерации.

Рассмотрим влияние чувствительности приемных устройств при переходе от ВОСП-SDH к ВОСП-WDM на количество спектральных каналов.

Приемное устройство цифровой ВОСП (рис. 1) состоит из следующих компонентов:

1 – предварительного оптического усилителя (ПОУ); 2 – оптического полосового фильтра (спектрального демультиплексора); 3 – приёмника излучения (ПИ) на основе полупроводникового фотодиода (ФД) $p-i-n$ - или лавинного (ЛФД) типа; источника смещения

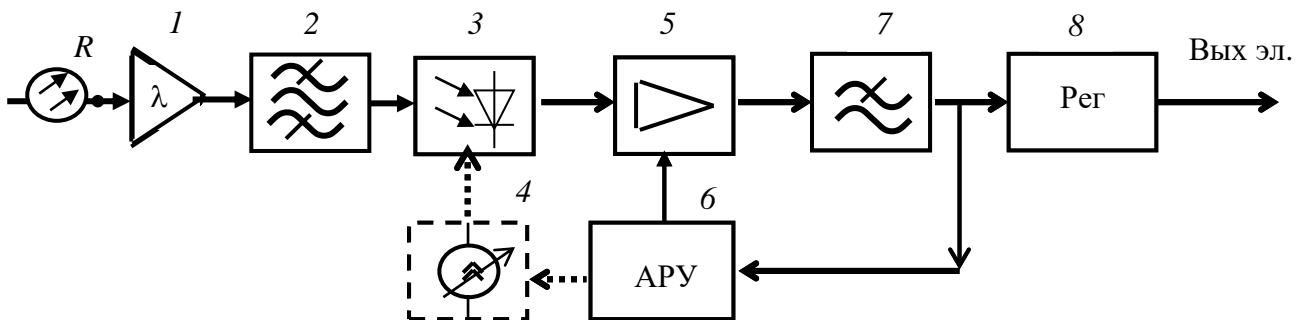


Рисунок 1 – Структурная схема приемного устройства с оптическим предусилителем

ПИ 4 (автоматически управляемого в случае использования ЛФД); 5 – электронного усилителя (ЭУ) с цепями автоматической регулировки усиления (АРУ) 6; фильтра нижней частоты (ФНЧ) – 7, ограничивающего шумовую полосу частот ПРОМ; регенератора электрического сигнала – 8.

Качество приёма цифровых сигналов оценивается значением BER, которое определяется отношением сигнал/шум (ОСШ) на его выходе. Источниками шума в ПРОМ являются приемник излучения (ФД или ЛФД), сопротивление нагрузки приёмника

излучения и электронный усилитель. Чаще применяется более дешёвые приёмники излучения ПИ на основе *p-i-n* ФД, реже, с целью увеличения длины участка регенерации SDH, лавинные фотодиоды ЛФД. В ВОСП-WDM используют ПИ на основе *p-i-n* ФД в сочетании с предварительным ОУ (ПОУ), а для компенсации потерь в линейном тракте на передающей стороне устанавливается оптический усилитель мощности (ОУМ).

Для выделения/ввода необходимого СК в оптических мультиплексорах ввода-вывода OADM (рис. 2) используются спектральные демультиплексор (DEMUX) и мультиплексор (MUX) соответственно.

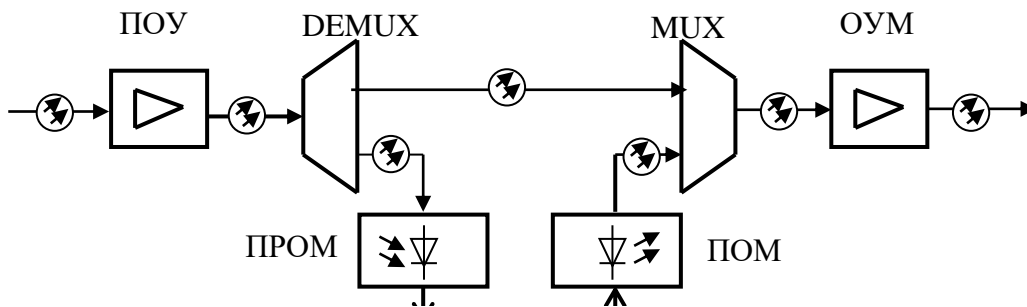


Рисунок 2 – Структурная схема OADM

Оптический сигнал выделяемого СК преобразуется в электрический эквивалент при помощи ПРОМ. Электрический сигнал с вводимого СК с помощью передающего оптоэлектронного модуля (ПОМ) подается в мультиплексор, где объединяется с другими спектральными каналами. Если нужен не электрический, а оптический интерфейс сигналов выделенных СК, то вместо ПРОМ и ПОУ используются соответствующие преобразователи длин волн – транспондеры.

В ПОУ необходимо учитывать шумы спонтанного излучения сигнала на входе и приведенные на вход шумы ПРОМ [11, 12]. Использование ПОУ с усилением порядка 20...30 дБ позволяет существенно уменьшить влияние шумов ПРОМ и улучшить чувствительность.

Чувствительностью приемного устройства $p_{\text{чув}}$ называют минимальный уровень сигнала на его оптическом входе (опорная точка R), который превышает результирующей уровень оптического шума $p_{\text{ш вх}}$, приведенный к этой точке, на величину допустимой защищённости $A_{\text{доп}}$, обеспечивающей требуемое значение $\text{BER} = 10^{-10} \dots 10^{-12}$

$$p_{\text{чув}} = p_{\text{ш вх-оу}} + A_{\text{доп}}. \quad (8)$$

Значение чувствительности ограничивают мультипликативные (квантовые шумы оптического сигнала) и аддитивные (дробовые и тепловые шумы ПРОМ). В случае применения ЛФД к ним добавляются шумы лавинного умножения. Тепловой шум создают резистор нагрузки ФД и активные элементы ЭУ.

Результаты расчетов [11] чувствительности приемных устройств в зависимости от ширины полосы пропускания оптического и электрического сигналов приведены в табл. 1 для следующих условий: цифровая передача данных в формате NRZ; длина волны оптической несущей $\lambda = c/v \approx 1310$ или 1550 нм; коэффициент шума ОУ составляет 2,8 (4,5 дБ); $\text{BER} = 10^{-10}$; для *p-i-n*-ФД токовый отклик равен 0,8 А/В и темновой ток 10 нА; для ЛФД коэффициент умножения 10; спектральная плотность эквивалентного шумового тока ЭУ равна 8 пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Отметим, что приведенные в табл. 1 экспериментальные данные достаточно хорошо совпадают с расчетными.

Таблица 1 – Уровень чувствительности (дБм) приемных устройств в зависимости от ширины полосы пропускания оптического и электрического сигналов

Ширина полосы пропускания электрического сигнала Δf , ГГц		0,1	1,0	2,5	10,0	40,0
1. <i>p-i-n</i> -ПРОМ	Расчет	-30,0	-25,0	-23,0	-20,0	-16,8
	Эксперимент	-33,0	-	-23,0	-20,0	-
2. ЛФД-ПРОМ	Расчет	-39,7	-34,18	-31,76	-27,65	-22,77
	Эксперимент	-	-	-32,0	-28,0 ^{о)}	-
Ширина полосы пропускания оптического сигнала $\Delta \nu$, ГГц		12,5			50,0	100,0
3. ПОУ, $K_p = 10^2$ (20 дБ)	Расчет	-42,5	-41,14	-39,83	-36,5	-32,0
	Эксперимент	-43,28	-43,09	-42,92	-37,5	-32,4
4. ПОУ, $K_p = 10^3$ (30дБ)	Расчет	-	-48,0	-	-33,4 ^{д)}	-

Для инженерных приложений оценку значения $p_{\text{чув}}$ для *p-i-n*-ФД и улучшения чувствительности приемного устройства $\Delta p_{\text{чув}}$ за счёт использования ЛФД и ПОУ [12] можно сделать при помощи данных табл. 2.

Таблица 2 – Улучшение чувствительности ПРОМ с ЛФД и ПОУ

Чувствительность ПРОМ с <i>p-i-n</i> -ФД $p_{\text{чув}}(\text{дБм}) \approx$	Выигрыш в чувствительности ($\Delta p_{\text{чув}}$) по сравнению <i>p-i-n</i> -ФД при использовании:	
	ЛФД	ПОУ
$-23 + 10\lg\Delta f(\text{ГГц})$	≈ 10 дБ	≈ 25 дБ

Последним из перечисленных параметров, определяющих величину допустимого количества спектральных каналов $N_{\text{СК-д}}$, является уровень передачи группового сигнала WDM p_w . Правильным решением было бы не задавать, а определять оптимальное значение $p_{w\text{-опт}}$, при котором величина $N_{\text{СК-д}}$ достигает максимума. Для этого, используя соотношение (3), строится график зависимости $N_{\text{СК-д}}$ от p_w при прочих заданных параметрах.

На рис. 3 приведены результаты расчёта по формулам (3)...(6) количества спектральных каналов $N_{\text{СК}}$ ВОСП-WDM для ОБ типа SF и разных значений выигрыша по чувствительности $\Delta p_{\text{чув}}$ в зависимости от уровня передачи p_w . Принятое в расчетах $\Delta A_{\text{уч}} = 10$ дБ значение запаса по затуханию приблизительно соответствует минимальному, которое получается за счёт перехода из второго окна прозрачности в третье при замене ВОСП-SDH на ВОСП-WDM, если фактическая длина участка регенерации исходной ВОСП-SDH не

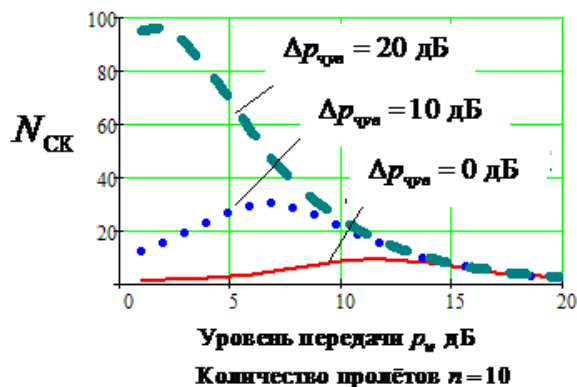


Рисунок 3 – Влияние улучшения чувствительности ПРОМ $\Delta p_{\text{чув}}$ на количество спектральных каналов ВОСП-WDM в зависимости от уровня передачи

сильно отличается от номинальной. Количество усилительных участков n на секции регенерации принято равным 10.

В сетях с большим количеством сетевых узлов количество усилительных участков n может быть больше 10. Накопление шумов на этих участках уменьшает значение $N_{СК}$. Эффект уменьшения $N_{СК}$ с увеличением числа усилительных участков n при запасе чувствительности $\Delta p_{чув} = 20$ дБ иллюстрируют графики на рис. 4.

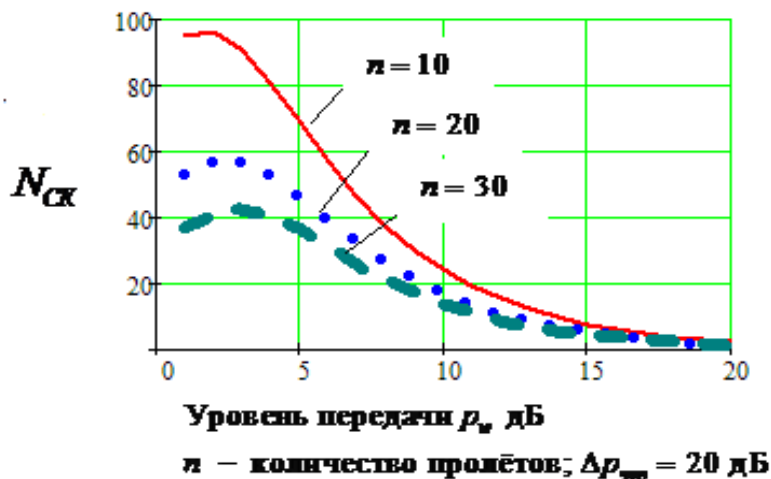


Рисунок 4 – Влияние числа усилительных участков n на количество спектральных каналов ВОСП-WDM в зависимости от уровня передачи

После определения требуемого $N_{СК-т}$ и допустимого количества спектральных каналов $N_{СК-д}$, следует ориентироваться на величину $N_{СК}$, меньшую из найденных $N_{СК-т}$ и $N_{СК-д}$

$$N_{СК} = \min\{N_{СК-т}, N_{СК-д}\}. \quad (9)$$

Проведенное исследование позволяет сделать **выводы**, что при выполнении проектных работ по переоборудованию (замене модулей) ВОСП-SDH на ВОСП-WDM необходимо учитывать чувствительность приемного устройства OADM, так как значение этой чувствительности существенно и положительно влияет на количество допустимых (реализуемых) спектральных каналов ВОСП-WDM.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Корнейчук В. И. Оптические системы передачи: учебник [для вузов связи] / Корнейчук В. И., Макаров Т. В., Панфилов И. П. – К.: Техника, 1994. – 388 с.
2. Бирюков Н. Л. Транспортные сети и сети электросвязи. Системы мультимплексирования: учебник [для вузов по специальности «Телекоммуникации»] / Н. Л. Бирюков, В. К. Степков. – К.: Віпол, 2003. – 352 с.
3. Однорог П. М. WDM / Однорог П. М., Михайленко. Е. В., Омецінська О. Б.; за ред. В. Б. Каток. – [3-е изд.] – К., 2005. – 194 с.
4. Фокин В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети / Фокин В. Г. – М.: Эко-Тренз. 2008. – 288 с.
5. Макаров Т. В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи/ Макаров Т. В. – Одесса: ОНАС им А.С. Попова, 2009. – 218 с.
6. Брескин В. А. Влияние дисперсионных искажений сигнала на длину регенерационной секции волоконно-оптических систем передачи/ В. А. Брескин, А. Д. Мазур // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 1. – С. 80-84.

7. Брескин В. А. Ресурсы переоборудования на WDM // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – № 2. – С. 62-67.
8. Брескин В. А. Параметры цепи мультиплексоров WDM // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2013. – № 1. – С. 1-14.
9. Дальняя связь: учеб. пособ. для институтов связи / [Л. Н. Астаханцев, А. М. Зингеренко, В. Б. Изаксон, В. С. Лавриш]; под ред. А. М. Зингеренко. – М.: Связь, 1970. – 408 с.
10. Заславский К. Е. Расчёт мощности помех, возникающих из-за четырёхволнового смешивания в каналах ВОСП-WDM/ К. Е. Заславский, Л. М. Капустенко// Электросвязь. – 2004. – № 10. – С. 10-12.
11. Корнейчук В. И. Анализ чувствительности приемных устройств ВОСП-СРК / В. И. Корнейчук, И. Б., Барба, Г. И. Дойжа // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 2. – С. 36-41.
12. Брескин В. А., Расчёт чувствительности цифровых приёмных устройств ВОСП / В. А. Брескин, В. И. Корнейчук // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій. VI Міжнар наук.-практ. конф. ЗНТУ: тези доп. – Запоріжжя, 2012. – С. 94-96.

REFERENCES:

1. Kornejchuk, V. I. P. Optical transmission systems: a textbook [for communication universities / Kornejchuk, V. I., Makarov, T. V., Panfilov, I. P. – K.: Tehnika, 1994. – 388 p.
2. Birjukov, N. L. Transport networks and telecommunications networks. Multiplexing system: [a textbook for universities in "Telecommunications"] / Birjukov, N. L., Steklov, V. K. – K.: Vipol, 2003. – 352 p.
3. Odnorog, P. M. WDM / Odnorog, P. M., Mihajlenko, E. V., Omecins'ka O. B.; red. V.B. Katok, WDM – K.: 2005. – 194 p.
4. Fokin, V. G. Optical transmission systems and transport network / Fokin, V. G. – M.: Eko-Trenz. 2008. – 288 p.
5. Makarov T. V. Coherent optical fiber transmission systems / Makarov T. V. – Odessa: ONAS im. A.S. Popova, 2009. – 218 p.
6. Breskin V. A. Influence of the dispersion signal distortion on the length of the regeneration section of the fiber-optic transmission systems / V. A. Breskin, A. D. Mazur // *Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova* № 1 (2008): 80-84 p.
7. Breskin V. A. Resources of reequipment on WDM / V. A. Breskin // *Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova*. – № 2 (2009): 62-67 p.
8. Breskin V. A. Circuit parameters of WDM multiplexers / V. A. Breskin // *Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova*. – № 1 (2013): 1-14 p.
9. Long-distance communication: uchebn. posob. dlya institutov svyazi [Astahancev L. N., Zingerenko A. M., Izakson V. B., Lavrish V. S.]; red. A. M. Zingerenko. – Moskva: Svjaz, 1970. – 408 p.
10. Zaslavskij K. E. Calculation of the interference power, arising from the four-channel mixing in FOTS-WDM / K. E. Zaslavskij, L. M. Kapustenko // *Jelektrosvjaz* № 10 (2004): 21-23 p.
11. Kornejchuk V. I. Analysis of the sensitivity of receivers FOTS-WDM / V. I. Kornejchuk, I. B. Barba, G. I. Dojzha // – *Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova* №2 (2010): 36-41 p.
12. Breskin V. A. The calculation of the sensitivity of digital receiving devices FOTS / V. A. Breskin, V. I. Kornejchuk // *Suchasni problemi i dosyagnennya v galuzi radiotekhniki, telekomunikatsiy ta informatsiyних tehnologiy: VI Mizhnar nauk.-prakt. konf.: tezi*, – Zaporizhzhja, 2012. – 94-96 p.