

УДК 621.372.8

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОГЕРЕНТНОЙ ВОСП

Мазур А.Д., Педяш В.В.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
pedyash@onat.edu.ua*

ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ КОГЕРЕНТНОЇ ВОСП

Мазур Г.Д., Педяш В.В.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
pedyash@onat.edu.ua*

ESTIMATION OF INFLUENCE OF OPTICAL SIGNAL NON-LINEAR DISTORTIONS ON QUALITY PARAMETERS OF OPTICAL FIBER SYSTEM

Mazur A.D., Pedyash V.V.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa 65029, Ukraine.
pedyash@onat.edu.ua*

Аннотация. Статья посвящена исследованию процесса передачи сигнала в оптической среде распространения с нелинейными искажениями. Для решения поставленной задачи использовалась имитационная модель одноканальной когерентной ВОСП, построенная в программе MatLab. Моделирование среды распространения выполнялось посредством метода Фурье расщепления по физическим факторам. На примере сигнала КАМ-4 получены зависимости Q-фактора от параметров ВОСП для скоростей передачи 10,7 Гбит/с (OTU2) и 43,01 Гбит/с (OTU3). Показано, что увеличение мощности сигнала передатчика от -13 дБм до +7 дБм приводит к снижению Q-фактора примерно на 30 дБ независимо от количества секций трассы. Увеличение количества оптических секций трассы от 1 до 10 приводит к снижению Q-фактора на 15-20 дБ.

Ключевые слова: оптическое волокно, когерентный прием, ВОСП, DWDM, модель, нелинейность, Q-фактор.

Анотація. Стаття присвячена дослідженню процесу передавання сигналу в оптичному середовищі поширення з нелінійними спотвореннями. Для розв'язання поставленого завдання використовувалася імітаційна модель одноканальної когерентної ВОСП, побудована в програмі MatLab. Моделювання середовища поширення виконувалося за допомогою методу Фур'є розщеплення за фізичними факторами. На прикладі сигналу КАМ-4 отримані залежності Q-фактора від параметрів ВОСП для швидкостей передавання 10,7 Гбіт/с (OTU2) і 43,01 Гбіт/с (OTU3). Показано, що збільшення потужності сигналу передавача від -13 дБм до +7 дБм призводить до зниження Q-фактора приблизно на 30 дБ незалежно від кількості секцій траси. Збільшення кількості оптичних секцій траси від 1 до 10 призводить до зниження Q-фактора на 15 ... 20 дБ.

Ключові слова: оптичне волокно, когерентний прийом, ВОСП, DWDM, модель, нелінійність, Q-фактор.

Abstract. The article investigates the signal transmission process in the optical propagation medium with non-linear distortion. To solve this problem was used a simulation MatLab model of single-channel

coherent fiber communication system. Modeling of the propagation medium was carried out by split-step Fourier method. For example, the dependence of Q-factor from parameters of the system for transmission speeds of 10.7 Gb/s (OTU2) and 43,01 Gb/s (OTU3) was obtained. It is shown that increase in transmitter signal power from -13 dBm to +7 dBm reduces Q-factor of about 30 dB regardless of the number of track sections. Increasing the quantity of optical sections from 1 to 10 leads to a decrease in Q-factor of 15-20 dB.

Key words: fiber, coherent receiver, fiber communication system, DWDM, model, nonlinear distortion, Q-factor.

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) являются основой для создания транспортных сетей последующих поколений (СПП). За период своего существования было разработано несколько поколений данных систем передачи, отличающихся количеством используемых длин волн и методами модуляции оптического сигнала. Первые образцы ВОСП использовали одну длину волны и модуляцию оптического излучения по интенсивности. Несмотря на появление ВОСП со спектральным разделением каналов (СРК), разработчики телекоммуникационного оборудования стремятся повысить спектральную эффективность сигнала путем использования более совершенных видов модуляции (ФМ, КАМ и OFDM) [1]. Поэтому транспондеры современных коммерческих ВОСП СРК широко используют методы когерентного приема для организации каналов со скоростями передачи до 112 Гбит/с (OTU4 OTN). Известно, что оптическое волокно (ОВ) вносит линейные (дисперсионные) и нелинейные (эффект Керра) искажения [2]. В современных ВОСП основная часть дисперсионных искажений ОВ устраняется в корректорах на базе волоконных брэгговских решеток. Оставшаяся часть линейных искажений корректируется в тракте приема путем обработки сигнала с выхода фотодетектора в цифровом фильтре. Поэтому сегодня основную проблему представляют нелинейные искажения – фазовая самомодуляция и перекрестная модуляция приводят к искажению формы сигналов. Четырехволновое смешение приводит к генерации паразитных нелинейных комбинационных продуктов, попадающих в рабочую полосу частот ВОСП СРК. Минимизировать перечисленные нелинейные искажения можно использованием модуляции с постоянной энергией символа, например КАМ-4, однако исследование влияния нелинейных искажений отдельно от других шумов на параметры качества ВОСП не проводилось.

Поэтому **целью данной статьи** является исследование влияния нелинейных искажений оптического волокна на качественные характеристики когерентной ВОСП с квадратурной амплитудной модуляцией.

Наибольшую сложность при оценке параметров ВОСП представляет разработка модели середины распространения согласно нелинейному уравнению Шредингера, которое в общем случае не имеет аналитического решения. Поэтому решение поставленной задачи выполнялось при помощи имитационной модели ВОСП с когерентным приемом (рис. 1), построенной в среде MatLab R2016.

Для формирования ортогональных сигналов синфазного и квадратурного подканалов передатчик ВОСП содержит два генератора двоичной псевдослучайной последовательности (ГПСП) и два одинаковых фазовых модулятора (ФМ) с девиацией фазы π . Поскольку каждый символ КАМ-4 переносит 2 бита, скорость передачи данных в каждом подканале составляет $B/2$ (в два раза меньше информационной скорости ВОСП, равной B). С целью обеспечения ортогональности несущих подканалов, в передатчике используется один лазер непрерывного излучения (ЛНИ), выходной сигнал которого разделяется разветвителем (Р) и проходит через фазовращатель для получения несущей квадратурного подканала. На выходе объединителя (О) формируется сигнал со средней мощностью $P_{пер}$ следующей формы:

$$E_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{\sqrt{P_{\text{ген1}}}}{\sqrt{2}} e^{j\omega_{\text{H}}t} \left[e^{j\pi a(t)} + e^{j\pi b(t)} e^{-j\pi/2} \right], \quad (1)$$

где $P_{\text{гет1}}$ – пиковая мощность гетеродина (ЛНИ) передатчика; $E_{\text{гет1}}(t)$ – сигнал гетеродина передатчика; π – девиация фазы; $a(t)$ и $b(t)$ – двоичные последовательности $\{-1;1\}$ на выходе ГПСП1 и ГПСП2 соответственно.

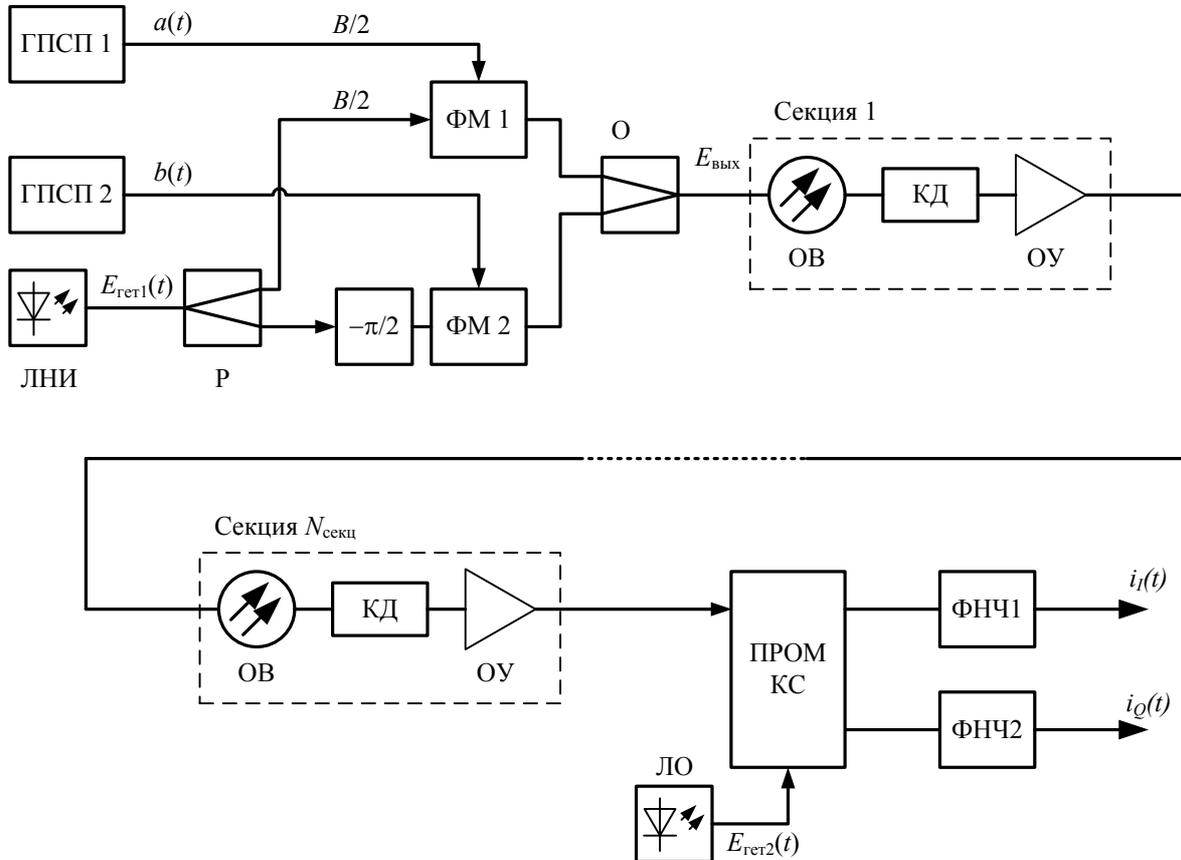


Рисунок 1 – Структурная схема модели когерентной ВОСП с КАМ-4

Волоконно-оптический линейный тракт (ВОЛТ) состоит из $N_{\text{секц}}$ одинаковых оптических секций, каждая из которых включает: ОВ типа SMF длиной $L_{\text{ов}} = 100$ км, компенсатор хроматической дисперсии (КД) и оптический усилитель (ОУ) на базе волокна, легированного эрбием. Моделирование ОВ выполнялось методом Фурье расщепления по физическим факторам. В качестве компенсатора дисперсии использовалось устройство со следующей передаточной функцией [2]:

$$H_{\text{КД}}(\omega) = \frac{1}{e^{-j\beta_2\omega^2/2}}, \quad (2)$$

где β_2 – коэффициент хроматической дисперсии ОВ второго порядка.

Модель ОУ предполагала внесение усиления G со значением

$$G = e^{\alpha L_{\text{ов}}} \quad (3)$$

и аддитивного шума усиленного спонтанного усиления со спектральной плотностью мощности

$$S(\omega) = 2n_{\text{сп}}(G-1)h\nu, \quad (4)$$

где $n_{\text{сп}}$ – коэффициент спонтанной эмиссии ОУ; h – постоянная Планка; ν – центральная частота оптического сигнала.

В приемнике сигнал локального лазерного осциллятора (ЛО) поступает на вход приемного оптического модуля когерентного сигнала (ПРОМ КС), содержащего

фотодетекторы и смеситель оптических сигналов на базе 3 дБ разветвителей (рис. 2) с передаточной матрицей каждого [3]:

$$\begin{bmatrix} E_{\text{ВЫХ1}} \\ E_{\text{ВЫХ2}} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{ВХ1}} \\ E_{\text{ВХ2}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Проведя на основании структурной схемы ПРОМ КС (рис 2) соответствующие преобразования, получаем следующую передаточную матрицу каскада из четырех разветвителей:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_1 \\ E_4 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_c - E_{\text{гер2}} \\ -jE_c - jE_{\text{гер2}} \\ -jE_c - jE_{\text{гер2}}e^{j\pi/2} \\ -jE_c + E_{\text{гер2}}e^{j\pi/2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

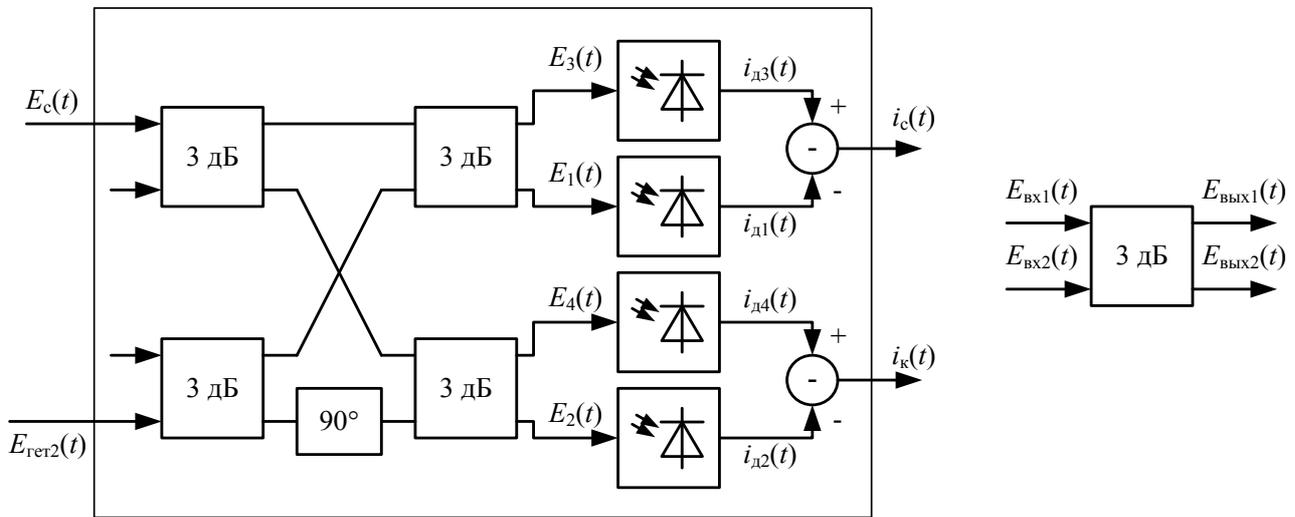


Рисунок 2 – Функциональная схема ПРОМ КС

Сигналы на выходе синфазного $i_c(t)$ и квадратурного $i_k(t)$ канала определяем по формулам:

$$i_{д1}(t) = R E_1(t) E_1^*(t), \quad (7)$$

$$i_{д2}(t) = R E_2(t) E_2^*(t), \quad (8)$$

$$i_{д3}(t) = R E_3(t) E_3^*(t), \quad (9)$$

$$i_{д4}(t) = R E_4(t) E_4^*(t), \quad (10)$$

$$i_c(t) = i_{д3}(t) - i_{д1}(t), \quad (11)$$

$$i_k(t) = i_{д4}(t) - i_{д2}(t), \quad (12)$$

где R – чувствительность фотодиода ($R = 1 \text{ А/Вт}$).

В дальнейшем эти сигналы подвергаются ограничению спектра в ФНЧ Бесселя 4-го порядка с частотой среза $0,75 \cdot B / 2$.

Полученные сигналы $u_I(t)$ и $u_Q(t)$ после коррекции фазы применялись для построения диаграмм рассеяния (сигнальных созвездий) и глаз-диаграмм. В качестве

количественного критерия оценки параметров качества использован Q -фактор, вычисленный по отсчетам выходного сигнала (рис. 3). Рисунок показывает, что зависимость Q -фактора от момента стробирования имеет два локальных максимума, поэтому в дальнейших исследованиях необходимо всегда выполнять поиск глобального экстремума функции $Q(t)$.

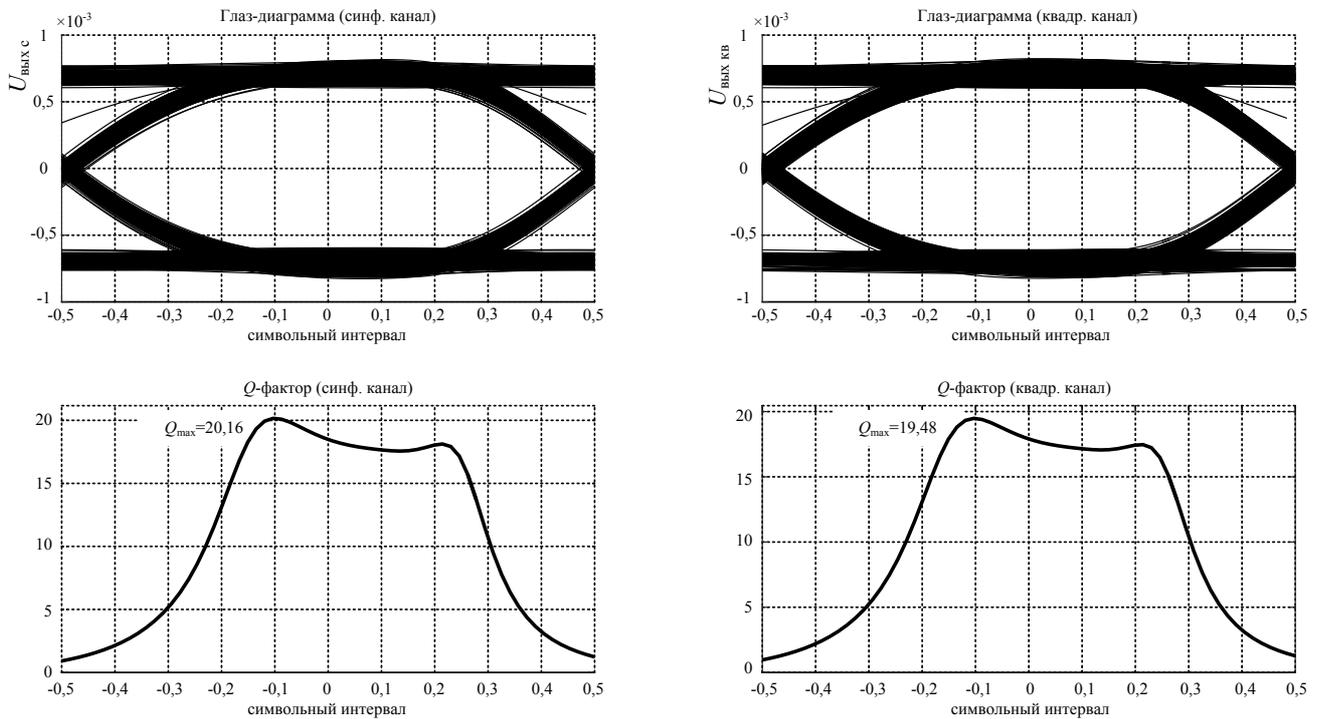


Рисунок 3 – Качественные параметры сигнала на выходе ПРОМ КС
 ($\alpha = 0,2$ дБ/км; $D = 16,75$ пс/(нм·км); $\gamma = 1,31$ 1/(Вт·км); $L_{\text{секц}} = 100$ км; $N_{\text{секц}} = 10$;
 $p_{\text{пер}} = 1$ дБм; $nf = 4$ дБ; $B = 43,01$ Гбит/с)

Зависимость Q -фактора синфазного канала от уровня сигнала передатчика $p_{\text{пер}}$ на входе оптического волокна и количества оптических секций показана на рис. 4. Уровень мощности ЛНИ изменялся от -10 до $+10$ дБм, что при потере 3 дБ в объединителе соответствовало выходной мощности передатчика $-13 \dots +7$ дБм. При минимальной мощности нелинейные искажения практически отсутствуют, поэтому конечное значение Q -фактора объясняется межсимвольной интерференцией сигнала в ФНЧ. Увеличение мощности сигнала на входе ВОЛТ приводит к линейному уменьшению показателей качества. Уменьшение защищенности для ВОЛТ из одной оптической секции для скоростей передачи $10,7$ и $43,01$ Гбит/с составляет 36 и 40 дБ соответственно. Увеличение $n_{\text{секц}}$ от 1 до 10 приводит к снижению защищенности примерно на 20 дБ в рабочем диапазоне уровней мощности сигнала от 0 дБм и выше. Для выбранного значения шум-фактора $nf = 4$ дБ мощность усиленного спонтанного излучения (УСИ) являлась незначительной ($P_{\text{уси}} = -35,9$ дБм для $B = 10,7$ Гбит/с и $P_{\text{уси}} = -29,8$ дБм для $B = 43,01$ Гбит/с) и не оказывала значительного влияния на Q -фактор.

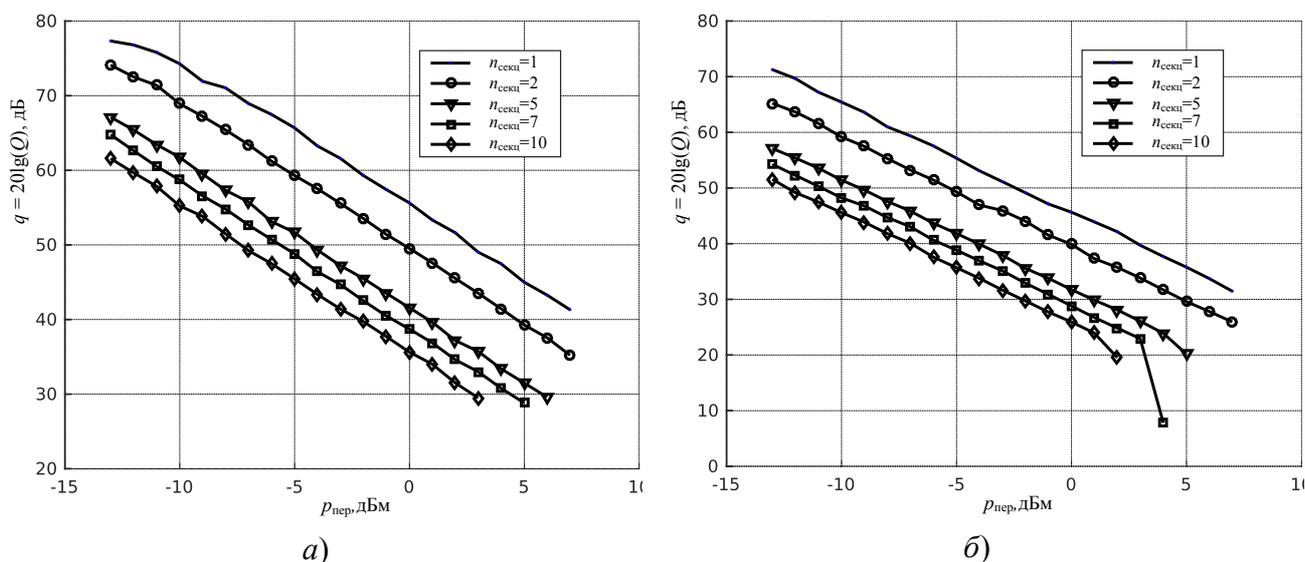


Рисунок 4 – Показатели качества канала ВОСП ($\alpha = 0,2$ дБ/км; $D = 16,75$ пс/(нм·км); $\gamma = 1,31$ 1/(Вт·км); $L_{\text{секц}} = 100$ км; $nf = 4$ дБ) со скоростью:
 а) 10,7 Гбит/с (OTU2); б) 43,01 Гбит/с (OTU3)

В заключение можно сделать вывод о том, что поставленная в статье задача оценки влияния нелинейных искажений оптического волокна на качественные характеристики когерентной ВОСП с КАМ выполнена успешно. Полученная зависимость качества оптических каналов показала, что зависимость Q -фактора от мощности сигнала на входе ОВ носит линейный характер. Полученные кривые для скоростей 10,7 и 43,01 Гбит/с показали, что увеличение мощности сигнала передатчика от -13 до +7 дБм приводит к снижению Q -фактора примерно на 30 дБ. Увеличение количества оптических секций трассы ВОСП от 1 до 10 приводит к снижению Q -фактора на 15...20 дБ. Предложенную модель можно использовать для оценки качественных показателей ВОСП на этапе их проектирования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics / Agrawal G.P. – London: Academic Press, 2007. – 534 p.
2. Seimetz M. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission / Seimetz M. – Berlin: Springer, 2009. – 252 p.
3. Hoffman D. Integrated optics eight-port 90 degrees hybrid on LiNbO3 / D. Hoffman; H. Heidrich; G. Wenke; R. Langenhorst; E. Dietrich // Journal of Lightwave Technology. – 1989. – Vol. 7, No 5. – P. 794-798.

REFERENCES:

1. Agrawal, G. P. Nonlinear Fiber Optics. 4th ed. Amsterdam: Elsevier / Academic, 2007. Print.
2. Seimetz, M. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission. Berlin: Springer, 2007. Print.
3. D. Hoffman, H. Heidrich, G. Wenke, R. Langenhorst and E. Dietrich. "Integrated optics eight-port 90 degrees hybrid on LiNbO3." Journal of Lightwave Technology 7(5) (1989): 794-798. Web.