

**ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА
 НА КАЧЕСТВО КАНАЛОВ ВОСП СРК**

**ВПЛИВ ФАЗОВОЇ САМОМОДУЛЯЦІЇ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ
 НА ЯКІСТЬ КАНАЛІВ ВОСП СРК**

**INFLUENCE OF OPTICAL SIGNAL SELF-PHASE MODULATION
 ON A CHANNELS QUALITY OF DWDM SYSTEM**

Аннотация. В статье решается задача оценки влияния фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество предоставляемых оптических каналов ВОСП со спектральным разделением каналов. В среде MatLab построена имитационная модель одного канала ВОСП СРК, учитывающая шум усиленного спонтанного излучения оптических усилителей, а также линейные и нелинейные искажения оптического волокна. Проводится сравнение полученных результатов с похожими исследованиями по данному направлению.

Анотація. В статті розв'язується задача оцінювання впливу фазової самомодуляції оптичного сигналу на якість оптичних каналів, які надаються ВОСП зі спектральним розподілом каналів. У середовищі MatLab побудована імітаційна модель одного каналу ВОСП СРК, яка враховує шум підсиленого спонтанного випромінювання оптичних підсилювачів, а також лінійні та нелінійні спотворення оптичного волокна. Здійснюється порівнювання здобутих результатів зі схожими дослідженнями за даним напрямом.

Summary. The problem of optical signal's self-phase modulation influence estimation on the optical channels quality in the system with a spectral channeling is considered in this article. The simulation model of one DWDM system channel is constructed in the MatLab environment taking into account the amplified spontaneous emission noise of optical amplifiers as well as linear and nonlinear distortions in optical fibre. Comparison of the received results with the similar researches in this domain of science is performed.

Применение систем со спектральным разделением каналов (СРК) позволяет повысить эффективность использования оптических волокон (ОВ) и уменьшить себестоимость услуг связи. Возможность полной компенсации дисперсионных искажений группового сигнала, а также усиление сигнала в оптической форме привело к тому, что качество оптических каналов такой системы определяется преимущественно усиленным спонтанным излучением оптического усилителя. Для увеличения защищенности сигнала на входе схемы принятия решения тракта приема необходимо повышать мощность сигнала на выходе передатчика. При этом также повышается мощность нелинейных помех, приводящих к искажению формы импульса, межсимвольной и межканальной интерференции. Поэтому при расчете параметров качества оптических каналов следует учитывать проблему возникновения нелинейных искажений в приемном сигнале оптического канала. В большинстве публикаций при расчете вероятности ошибки оптического канала учитывается только четырехволновое смешение [1] и спонтанный шум оптического усилителя [2]. Однако в расчетах необходимо также учитывать фазовую самомодуляцию, приводящую к искажению формы импульсов выходного сигнала и деградации параметров качества оптического канала.

Поэтому целью данной статьи является оценка влияния фазовой самомодуляции оптического сигнала на параметры качества оптического канала ВОСП СРК.

Для решения поставленной задачи в среде MatLab согласно функциональной схеме, показанной на рис. 1, построена имитационная модель одного канала ВОСП СРК. Модель включает передатчик и приемник оптического канала, а также $N_{\text{секц}}$ одинаковых оптических секций. Ниже детально рассматривается реализация каждого из этих блоков.

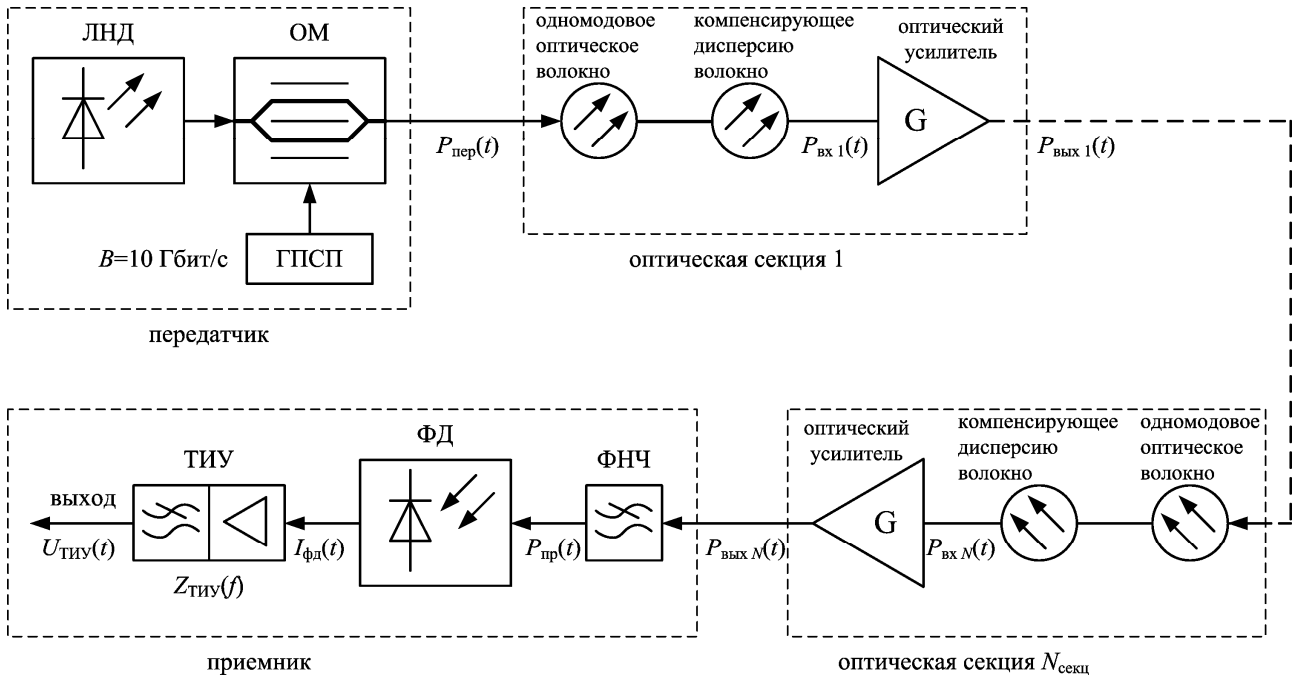


Рисунок 1 – Функциональная схема имитационной модели одного канала ВОСП СРК

Передатчик ВОСП состоит из лазера непрерывного действия (ЛНД), оптического модулятора (ОМ) и генератора псевдослучайной последовательности (ГПСП), формирующего $N_{\text{симв}}$ двоичных символов со скоростью $B = 10$ Гбит/с. Длительность фронта импульса выходного сигнала составляет $t_{\text{фр}}$ при изменении мощности от уровня K_1 до K_2 своего пикового значения $P_{\text{пик}}$. В работе [3] показано, что форму фронта оптического импульса можно описать гауссовой кривой с половиной условной длительности импульса:

$$\sigma = \frac{t_{\text{фр}}}{\sqrt{2}(\sqrt{\ln(K_1)} - \sqrt{\ln(K_2)})}. \quad (1)$$

На выходе ОМ формируется индивидуальный каналный сигнал со следующей формой импульсов [3]:

$$P_{10}(t) = \begin{cases} P_1, & 0 \leq t \leq \Delta t; \\ (P_1 - P_0) e^{-\frac{(t-\Delta t)^2}{2\sigma^2}} + P_0, & \Delta t \leq t \leq T_c; \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{01}(t) = \begin{cases} (P_1 - P_0) e^{-\frac{(t-T_c+\Delta t)^2}{2\sigma^2}} + P_0, & 0 \leq t \leq \Delta t; \\ P_1, & (T_c - \Delta t) \leq t \leq T_c; \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{00}(t) = P_0, \quad 0 \leq t \leq T_c; \quad (4)$$

$$P_{11}(t) = P_1, \quad 0 \leq t \leq T_c, \quad (5)$$

где P_1 и P_0 – соответственно мощность единичного ($P_1 = P_{\text{пик}}$) и нулевого символов на выходе ОМ; T_c – символьный интервал.

Первый символ нижнего индекса в выражениях (2)...(5) равен биту предыдущего тактового интервала, второй символ – биту текущего тактового интервала.

Смещение Δt гауссового импульса по длительности оптического импульса рассчитывалось по выражению [3]:

$$\Delta t = \frac{T_c}{2} - \sigma \sqrt{2 \ln(2)}. \quad (6)$$

Известно, что стандартный оптический модулятор (электроабсорбционный или Маха-Зендера) позволяет формировать сигнал с коэффициентом гашения $ER = P_1 / P_0 \approx 10$. В этом случае паспортные данные модулятора K_1 и K_2 перед подстановкой в (1) следует пересчитать в промежуточные значения K'_1 и K'_2 . Рисунок 2 позволяет установить взаимосвязь между ними:

$$K'_1 = \frac{P_1(K_1 - P_0/P_1)}{P_1 - P_0} \quad \text{и} \quad K'_2 = \frac{P_1(K_2 - P_0/P_1)}{P_1 - P_0}. \quad (7)$$

Оптическая секция (см. рис. 1) состоит из последовательно включенных одномодового ОВ типа SMF (Single Mode Fiber) длиной L_{SMF} , компенсирующего дисперсию ОВ типа DCF (Dispersion Compensation Fiber) длиной L_{DCF} , и оптического усилителя на основе легированного эрбием волокна EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). В основу моделей двух вышеуказанных типов волокон положено известное нелинейное уравнение Шредингера [4]

$$j \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{j\alpha}{2} A + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \gamma |A|^2 A, \quad (8)$$

где $A(z, t)$ – напряженность электрического поля оптического сигнала на расстоянии z от передатчика в момент времени t ; α и β_2 – соответственно коэффициент затухания и вторая производная коэффициента распространения $\beta(\omega)$ волокна на длине волны излучения; γ – коэффициент нелинейности ОВ.

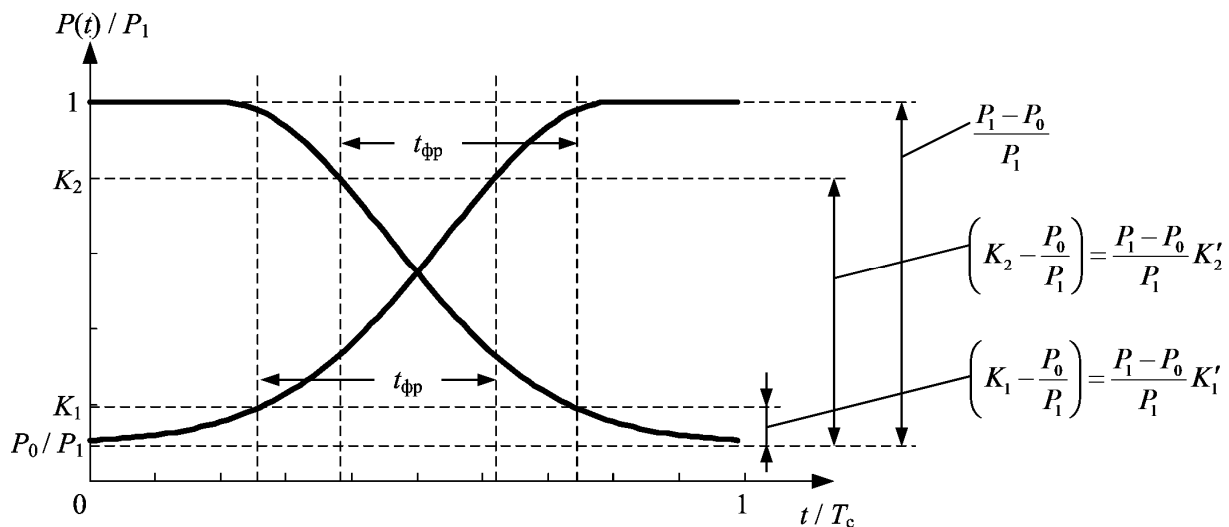


Рисунок 2 – Параметры сигнала на выходе оптического передатчика

Простым и достаточно производительным методом решения уравнения Шредингера является известный Фурье-метод расщепления по физическим факторам [4]. Его суть заключается в разбиении оптического волокна с длиной $L_{ОВ}$ на $n_{отр}$ условных отрезков одинаковой длины. Внутри каждого из них моделирование дисперсионных и нелинейных эффектов на оптический сигнал проводится в три этапа (рис. 3). Воздействие линейных (на первом и третьем этапе), а также нелинейных искажений (на втором) описывается следующими выражениями [5]:

$$A\left(z + \frac{1}{2} \Delta z, t\right) = \text{iffi} \left[\text{fft} \left(A(z, t) e^{-\alpha \Delta z / 2} e^{j\beta_2 \omega^2 \Delta z / 4} \right) \right]; \quad (9)$$

$$A\left(z + \frac{1}{2} \Delta z_+, t\right) = A\left(z + \frac{1}{2} \Delta z, t\right) e^{-j\gamma \left| A\left(z + \frac{1}{2} \Delta z, t\right) \right|^2 \Delta z}; \quad (10)$$

$$A(z + \Delta z, t) = \text{iffi} \left[\text{fft} \left(A\left(z + \frac{1}{2} \Delta z_+, t\right) \right) e^{-\alpha \Delta z / 2} e^{j\beta_2 \omega^2 \Delta z / 4} \right], \quad (11)$$

где $A(z, t)$ и $A(z + \Delta z, t)$ – напряженность электрического поля оптического сигнала на входе и выходе условного отрезка волокна; $fft()$ и $ifft()$ – соответственно операторы прямого и обратного преобразования Фурье.

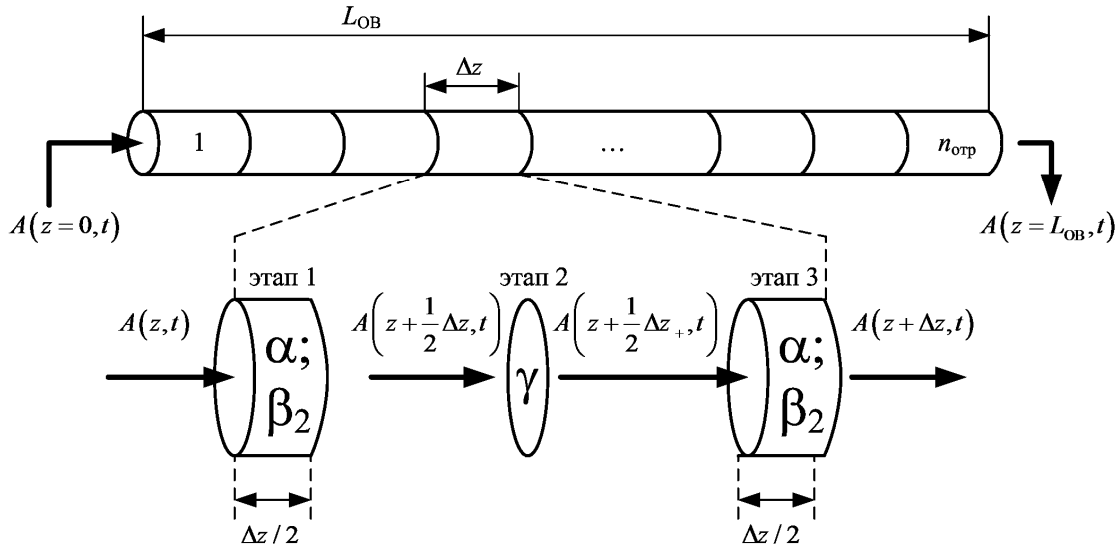


Рисунок 3 – Графическое представление Фурье-метода расщепления по физическим факторам

Моделирование показало, что увеличение количества условных отрезков свыше 100 не приводит к существенному повышению точности результатов моделирования, поэтому в дальнейших расчетах использовалось $n_{отр} = 100$. Параметры волокон, которые использовались при моделировании, приведены в табл. 1 [6, 7].

Таблица 1 – Параметры моделей оптических волокон

Тип волокна	α , дБ/км	Длина, км	β_2 , $c^2/\text{км}$	γ , 1/(Вт·км)
Одномодовое (SMF)	0,2	50	$-21,68 \cdot 10^{-24}$	1,20
Компенсирующее дисперсию (DCF)	0,43	7,08	$153,05 \cdot 10^{-24}$	5,47

Выбранная длина волокна DCF в 7,08 км позволила полностью скомпенсировать дисперсионные искажения на выходе оптической секции.

Оптический усилитель моделировался согласно выражению [2]:

$$P_{\text{вых } n}(t) = P_{\text{вх } n}(t)G + P_{\text{ASE}}(t), \quad (12)$$

где $P_{\text{вх } n}(t)$ и $P_{\text{вых } n}(t)$ – соответственно мощности входного и выходного сигнала оптического усилителя секции n ; G – коэффициент усиления; $P_{\text{ASE}}(t)$ – шум усиленного спонтанного излучения ASE (Amplified Spontaneous Emission).

Значение коэффициента усиления G выбиралось исходя из полной компенсации затухания отрезков одномодового A_{SMF} и компенсирующего дисперсию A_{DCF} волокон:

$$G = 10^{0,1(A_{\text{SMF}} + A_{\text{DCF}})}. \quad (13)$$

Модель шума представляла комплексный случайный процесс с нормальным законом распределения и значением средней мощности [8]:

$$P_{\text{ASE}} = 2n_{\text{sp}}(G-1)hf(2\Delta f_o), \quad (14)$$

где n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии ($n_{\text{sp}} \approx 2$ для шум-фактора в 6 дБ); h – постоянная Планка ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); f – частота оптического излучения (соответствовала длине волны $\lambda = 1552$ нм); Δf_o – полоса пропускания модели оптического ФНЧ.

В вышеприведенной формуле учитывалась удвоенная полоса пропускания оптического ФНЧ, поскольку полосовой фильтр пассивного демультиплексора ВОСП СРК имеет полосу частот в два раза большую Δf_0 .

Для упрощения программной реализации функциональных блоков ВОСП СРК модуляция оптической несущей частоты лазера не выполнялась. Поэтому на входе модели приемника ВОСП (см. рис. 1) вместо полосового оптического фильтра установлен ФНЧ. Его модель в MatLab представлена КИХ фильтром посредством функции *fir2* пакета Signal Processing Toolbox. Расчет этого фильтра проводился по участку характеристики затухания полосового фильтра демультиплексора ВОСП СРК в области положительных частот (рис. 4, а) [9]. Фотодетектор представлял *p-i-n* фотодиод с токовой чувствительностью $R = 0,8$ А/Вт и следующей формой тока на выходе:

$$I_{\text{фд}}(t) = |P_{\text{пр}}(t)|R, \quad (15)$$

где $P_{\text{пр}}(t)$ – оптический сигнал на входе фотодиода.

Основу функциональной модели трансимпедансного усилителя (ТИУ) составила интегральная схема AD2820 фирмы Analog Devices. Функциональный блок модели реализован в виде КИХ фильтра, аналогично вышеуказанному ФНЧ, по характеристике трансимпеданса согласно рис. 4, б [10]. Внутренние шумы ТИУ и фотодиода не учитывались вследствие наличия предварительного оптического усилителя в составе предшествующей оптической секции.

Главным критерием качества оптических каналов ВОСП СРК является вероятность ошибки $p_{\text{ош}}$, которая связана с Q -фактором следующим выражением:

$$p_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right), \quad (16)$$

где *erfc* – функция ошибок.

Машинное вычисление по данному выражению при высоких значениях Q является затруднительным, поэтому в статье в качестве показателя качества используется сам Q -фактор. Последний рассчитывался согласно стандартному выражению

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (17)$$

по следующим параметрам выходного сигнала $U_{\text{ТИУ}}(t)$:

- математическому ожиданию μ_1 и μ_0 отсчетов, соответствующих символам 1 и 0;
- среднеквадратическому отклонению σ_1 и σ_0 вышеуказанных отсчетов.

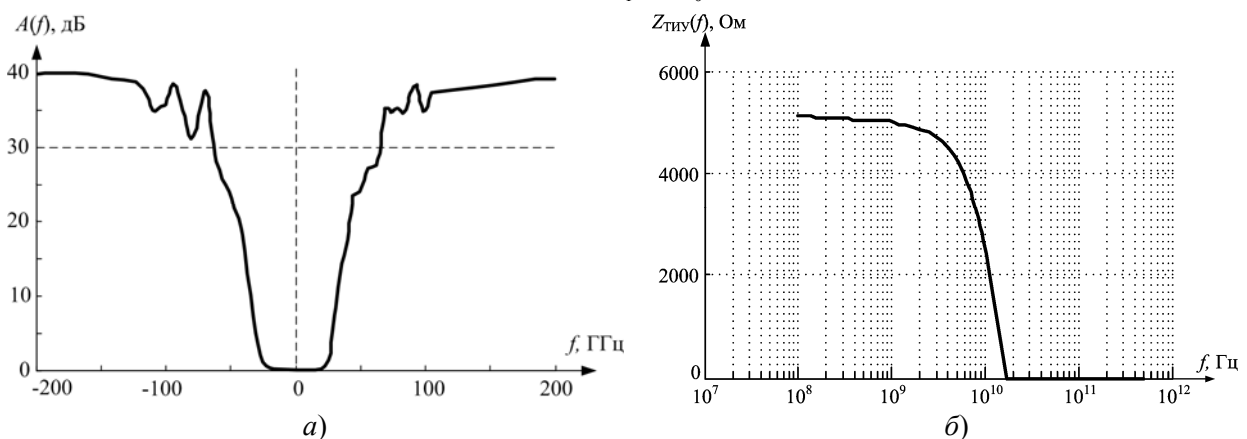


Рисунок 4 – Частотные характеристики:

а – полосового фильтра демультиплексора ВОСП СРК для межканального интервала 100 ГГц; б – трансимпедансного усилителя

Выражение (10), которое учитывает нелинейность ОВ, показывает влияние мощности вводимого в него оптического сигнала на фазу выходного сигнала. График на рис. 5, на котором наблюдается зависимость Q -фактора от пиковой мощности сигнала передатчика $P_{\text{пик}}$, подтверждает данное предположение. Он позволяет сделать вывод о существовании оптимального значения входной мощности, которое максимизирует Q . При малой мощности сигнала передатчика отношение

сигнал/шум на входе фотодетектора невелико. Это объясняется малой защищенностью сигнала от шумов спонтанного излучения усилителей. Существенного изменения фазы принимаемого сигнала в этом случае не происходит. При повышении уровня входного сигнала защищенность от шумов усилителей повышается, однако одновременно увеличивается и фазовый сдвиг в выражении (10). В результате расширения спектра линейного сигнала и последующего его ограничения в канальном фильтре демультиплексора возникает межсимвольная интерференция сигнала $P_{пр}(t)$ на входе фотодиода. Это и приводит к уменьшению Q -фактора для входных сигналов с большой мощностью. Увеличение количества оптических секций приводит к накоплению фазового сдвига принимаемого сигнала и уменьшению Q . Приведенные графики показывают целесообразность использования уровней входного сигнала порядка 3...6 дБ для оптических трасс длиной 50...500 км. Это обеспечивает намного меньшую вероятность ошибки по сравнению с допустимыми для ВОСП значениями $10^{-12} \dots 10^{-15}$.

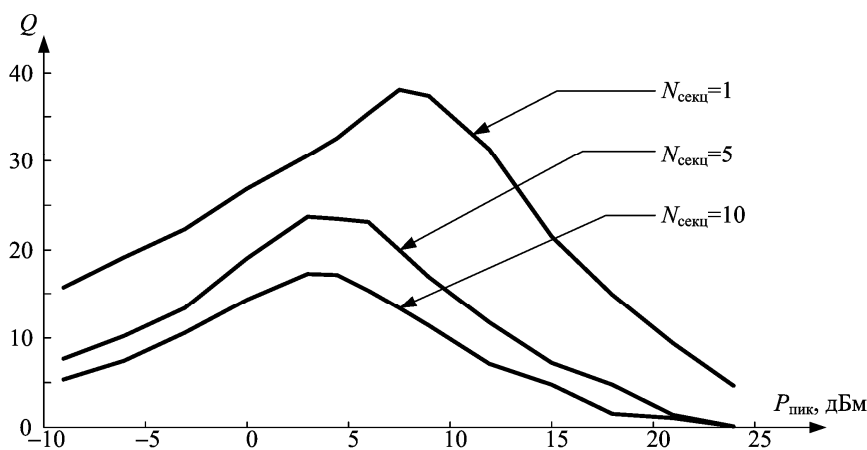


Рисунок 5 – Зависимость Q -фактора от мощности сигнала передатчика ($er = 10$ дБ; $K_1 = 0,2$; $K_2 = 0,2$; $t_{фр} = 35$ пс; $N_{симв} = 1000$)

В заключение, следует отметить, что поставленная в статье задача оценки влияния фазовой самомодуляции оптического сигнала на параметры качества оптического канала ВОСП СРК выполнена. Имитационное моделирование показало, что зависимость Q -фактора от мощности вводимого в оптическое волокно сигнала имеет экстремум в виде максимума. Для оптической трассы длиной 50...500 км оптимальным является уровень входного сигнала порядка 3...6 дБм. Построенная в

среде MatLab имитационная модель учитывает линейные и нелинейные искажения оптического волокна, а также шумы спонтанного излучения оптического усилителя. Ее можно использовать для оценки параметров ВОСП СРК на этапе их проектирования.

В дальнейших исследованиях следует оценить совместное влияние фазовой самомодуляции и четырехволнового смешения на параметры оптических каналов ВОСП СРК.

Литература

1. Tkach R.W. Four-photon mixing and high-speed WDM systems / R.W. Tkach, Chraplyvy A.R., F. Forghieri, A.H. Gnauck, R.M. Derosier // Journal of Lightwave Technology. – 1995. – Vol. 13, № 5. – P. 841 – 849.
2. Убайдуллаев Р.П. Протяженные ВОЛС на основе EDFA / Р.П. Убайдуллаев // LIGHTWAVE russian edition. – 2003. – № 1. – С. 22–29.
3. Педяш В.В. Использование имитационного моделирования для определения длины участка регенерации ВОСП по дисперсии / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – № 2. – С. 73–78.
4. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г.; пер. с англ. С.В. Черникова, И.Ю. Хрущева, Д.В. Коробкина. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
5. Shaw J.K. Mathematical Principles of Optical Fiber Communication / J.K. Shaw. - Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. – 103 p. – (CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics).
6. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.icsconsult.ru/consult/storage/299/G.652-200506.pdf>. Заголовок з екрана.
7. Ramachandran S. Fiber Based Dispersion Compensation / Ramachandran S.. – New York: Springer, 2007. – 558 p.
8. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems / Agrawal G.P. - New York: Wiley-Interscience, 2002. – 580 p.
9. 100G/50G/25G DWDM Fiber Grating [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.otland.com/SensorProducts/FiberGrating_wdm.htm. Заголовок з екрана.
10. 10.7 Gbps, 3.3 V, Low Noise, TIA with Average Power Monitor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADN2820.pdf. Заголовок з екрана.