

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСП  
С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ**

**МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСП  
З ОРТОГОНАЛЬНИМ ЧАСТОТНИМ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯМ**

**MODELING OF CHARACTERISTICS OF OPTICAL FIBER COMMUNICATION SYSTEMS  
WITH ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING**

**Аннотация.** В статье приведена имитационная модель когерентной ВОСП с ортогональным частотным мультиплексированием с учетом линейных и нелинейных искажений сигнала в оптическом волокне. В результате моделирования (с учетом характеристик волокна SMF-28e+) показано, что величина помех, порожденных линейными искажениями передаваемых сигналов значительно меньше помех, порожденных нелинейностью характеристик волокна, что позволяет при расчетах параметров рассматриваемых ВОСП пренебречь линейными искажениями.

**Анотація.** В статті наведена імітаційна модель когерентної ВОСП з ортогональним частотним мультиплексуванням з урахуванням лінійних та нелінійних спотворень сигналу в оптичному волокні. В результаті моделювання (з урахуванням характеристик волокна SMF-28e+) показано, що величина завад, що виникли внаслідок лінійних спотворень сигналів значно менше завад, що виникли внаслідок нелінійності характеристик волокна, що дозволяє при розрахунках параметрів ВОСП знехтувати лінійними спотвореннями.

**Summary.** Article contains a simulation model of coherent fiber-optic communication system with orthogonal frequency multiplexing. Linear and nonlinear distortions of a signal in optical fiber are considered. For the SMF-28e+ fiber is shown that value of the linear distortions it is less than value of the nonlinear distortions. It allows neglecting linear distortions as a result.

Технология спектрального разделения каналов (СРК) широко используется для решения проблемы увеличения пропускной способности оптических волокон (ОВ). Первое поколение волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) использовало передачу оптических сигналов с модуляцией по интенсивности. В последнее время начало применяться второе поколение аппаратуры – когерентные ВОСП с ортогональным частотным мультиплексированием OFDM (англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), поэтому данное направление исследования является актуальным. Исследование ВОСП OFDM затрудняется тем фактом, что ОВ вносит в передаваемый сигнал линейные и нелинейные искажения. Однако большинство имеющихся публикаций посвящено исследованию когерентных ВОСП с одной несущей частотой [1, 2]. В литературе по ВОСП OFDM [3], в основном, приводятся методы эффективного построения соответствующих приемных и передающих устройств, а исследованию искажений сигнала при передаче по линейному тракту не уделено должного внимания.

Поэтому **целью данной статьи** является исследование влияния линейных и нелинейных искажений оптических сигналов на качественные характеристики когерентных ВОСП OFDM.

Для решения поставленной задачи в среде MatLab построена имитационная модель согласно типовой функциональной схеме когерентной ВОСП OFDM (рис. 1).

На вход передающей части ВОСП от генератора псевдослучайной последовательности (ПСП) поступает последовательность комплексных многоуровневых символов  $a_i + jb_i$  с равномерным законом распределения вероятности амплитуд действительной и мнимой составляющих из вектора  $\{-A_{\min}, -A_{\min} + 2, \dots, A_{\max}\}$ . Минимальная  $A_{\min}$  и максимальная  $A_{\max}$  амплитуды символов рассчитываются согласно стандартному для КАМ модуляции выражению [2]:

$$|A_{\min}| = A_{\max} = \sqrt{M} - 1, \quad (1)$$

где  $M$  – количество точек сигнального созвездия КАМ.

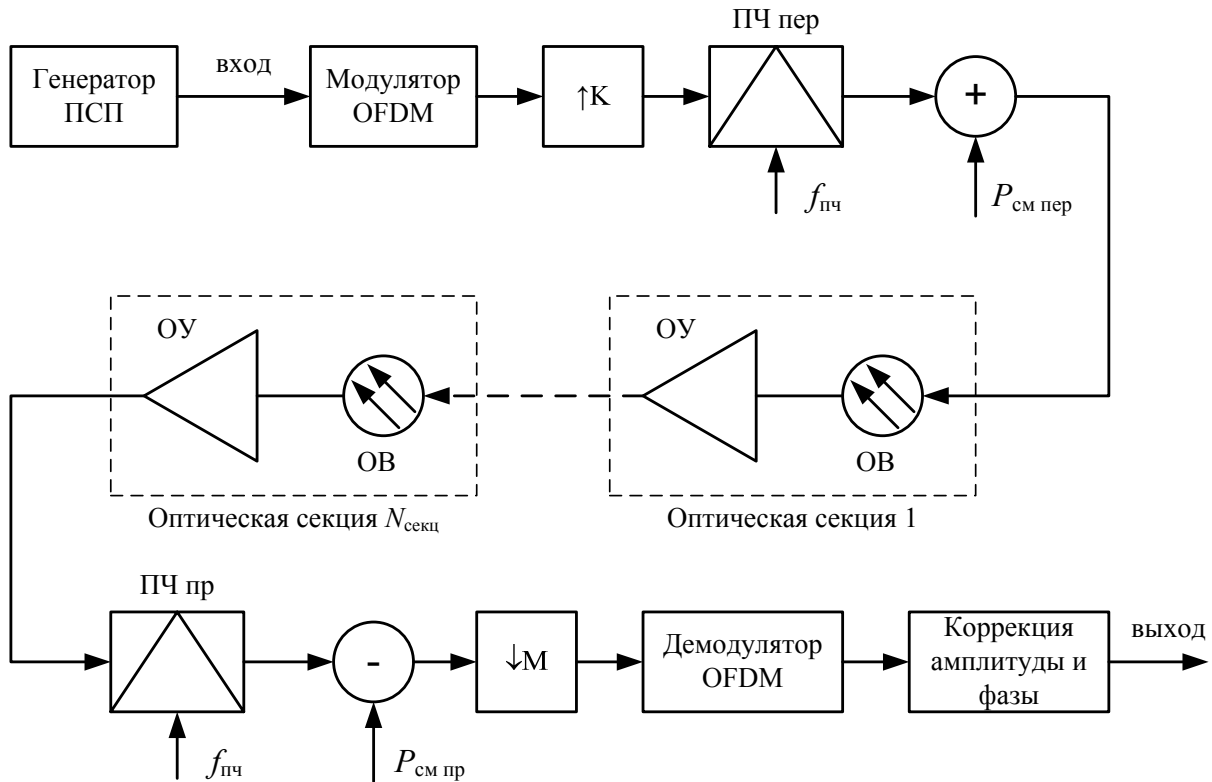


Рисунок 1 – Функциональная схема имитационной модели ВОСП O-OFDM

Сформированная ПСП поступает на модулятор OFDM, реализующий операцию стандартного дискретного обратного преобразования Фурье [4]:

$$x(k) = \frac{1}{N_{\text{ДПФ}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{ДПФ}}} \dot{X}(n) e^{j \frac{2\pi}{N_{\text{ДПФ}}} (k-1)(n-1)}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{ДПФ}}$  – размерность ОДПФ;  $x(k)$  – сформированная последовательность отсчетов во временной области ( $1 \leq k \leq N_{\text{ДПФ}}$ );  $\dot{X}(n)$  – комплексная амплитуда символа канала  $n$ .

Спектр сформированного сигнала содержит  $N_{\text{ДПФ}}$  дискретных составляющих, равномерно расположенных в интервале  $[0; (N_{\text{ДПФ}} - 1)F_d / N_{\text{ДПФ}}]$ , где  $F_d$  – частота дискретизации. Для борьбы с потенциальными межсимвольными искажениями каждый сформированный символ OFDM дополнялся циклическим префиксом из  $N_{\text{цп}}$  отсчетов. В последующем функциональном блоке выполняется передискретизация (интерполяция) сигнала с коэффициентом  $K$  для уменьшения ширины сформированного сигнала передатчика. Далее сигнал подвергается операции однополосного преобразования частоты в соответствующем преобразователе (ПЧ пер) с использованием несущей частоты  $f_{\text{пч}}$ . Для более полного подавления остатка нижней боковой полосы частот полосовым фильтром преобразователя частоты (ПЧ), в модуляторе OFDM использовались  $N_{\text{нес}}$  несущих, начиная с номера  $N_{\text{нач}}$ . Сформированный в диапазоне частот  $[f_{\text{пром}}; f_{\text{пром}} + (N_{\text{ДПФ}} - 1)F_d / (K N_{\text{ДПФ}})]$  сигнал является двухполярным и содержит отрицательные значения амплитуды. Последние невозможно передать по ОБ, поскольку интенсивность (мощность) оптического сигнала не может быть меньше нуля. Для получения возможности передачи сигнала, к нему добавляется постоянная составляющая с мощностью

$$P_{\text{см пер}} = 1,1 P_{\text{пч пик}}, \quad (3)$$

где 1,1 – коэффициент запаса в 10% по мощности;  $P_{\text{пч пик}}$  – пиковая мощность сигнала на выходе ПЧ, задаваемая при моделировании.

Линейный тракт модели состоит из  $N_{\text{секц}}$  оптических секций, каждая из которых содержит последовательно включенные оптическое волокно и усилитель. Модель линейного оптического усилителя выполняла полную компенсацию затухания одной секции оптического волокна. Для правильного решения поставленной в статье цели, шум усиленного спонтанного излучения отсутствовал.

Известно, что исследование процесса прохождения сигнала по ОВ можно выполнять разностными или псевдоспектральными методами [5]. Ввиду меньшей вычислительной сложности, в данной статье предпочтение отдано использованию метода псевдоспектрального Фурье-метода расщепления по физическим факторам. Суть Фурье-метода с расщеплением по физическим факторам заключается в разбиении ОВ длиной  $L_{\text{ов}}$  на конечное число условных отрезков длиной  $\Delta l$  каждый. Прохождение сигнала по каждому из них моделируется в три этапа следующими выражениями [6]:

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

$$A\left(l + \frac{1}{2}\Delta l_+, t\right) = A\left(l + \frac{1}{2}\Delta l, t\right) e^{j\gamma\left|A\left(l + \frac{1}{2}\Delta l, t\right)\right|^2\Delta l}; \quad (5)$$

$$A(l + \Delta l, t) = \text{ifft}\left[\text{fft}\left(A\left(l + \frac{1}{2}\Delta l_+, t\right)\right)e^{-\alpha\Delta l/2} e^{j\beta_2\omega^2\Delta l/4}\right], \quad (6)$$

где  $A(l, t)$  и  $A(l + \Delta l, t)$  – напряженность электрического поля оптического сигнала на входе и выходе условного отрезка волокна;  $A(l + \Delta l_+/2, t)$  – напряженность электрического поля оптического сигнала с введенными нелинейными искажениями;  $\text{fft}()$  и  $\text{ifft}()$  – соответственно операторы прямого и обратного преобразования Фурье;  $\alpha$  и  $\beta_2$  – соответственно коэффициент затухания и вторая производная коэффициента распространения  $\beta(\omega)$  волокна на длине волны излучения;  $\gamma$  – коэффициент нелинейности ОВ.

Последующие результаты моделирования получены на примере использования параметров стандартного ОВ типа SMF-28e+ (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры волокна SMF-28e+ (рек. ITU G.652)

Затухание $\alpha$ , дБ/км	$A_{\text{эфф}}$ , мкм <sup>2</sup>	Дисперсия $D$ , с/(нм·км)	$\beta_2$ , пс <sup>2</sup> /км	$\gamma$ , 1/(Вт·км)
0,20	83	18,0	-22,942	1,3

Расчет коэффициентов  $\beta_2$  и  $\gamma$  проводился согласно выражениям [7]:

$$\beta_2 = -\frac{D\lambda^2}{2\pi c} \quad (7)$$

и

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{эфф}}}, \quad (8)$$

где  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $n_2$  – нелинейный коэффициент ( $n_2 \approx 2,68 \cdot 10^{-20}$  м<sup>2</sup>/Вт);  $A_{\text{эфф}}$  – эффективная площадь ОВ;  $D$  – дисперсия ОВ.

На входе приемной части ВОСП выполняется удаление постоянной составляющей путем вычитания сигнала с мощностью

$$P_{\text{см пр}} = P_{\text{см пер}} / 10^{0,1\alpha L_{\text{ов}}}. \quad (9)$$

После переноса сигнала в исходную полосу частот посредством преобразователя частоты приема (ПЧ пр.) проводится его последующая передискретизация (децимация) с коэффициентом  $M = K$ . После удаления циклического префикса проводится демодуляция сигнала посредством дискретного преобразования Фурье согласно выражению [4]

$$\hat{X}(n) = \sum_{k=1}^{N_{\text{дпф}}} x(k) e^{-\frac{2\pi j}{N_{\text{дпф}}}(k-1)(n-1)}, \quad (10)$$

где  $n$  – номер отсчета во временной области ( $1 \leq n \leq N_{\text{ДПФ}}$ ).

Для компенсации амплитудно-фазовых искажений принятого сигнала проводилась его последующая коррекция, для чего выполнялся расчет соответствующих корректирующих комплексных коэффициентов по принятой  $\hat{a}_i + j\hat{b}_i$  и переданной  $a_i + jb_i$  последовательностях символов. Параметры функциональных блоков, использованные при моделировании, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Параметры функциональных блоков имитационной модели

Параметр	Количество символов OFDM	$K$	$M$	$F_d$ , ГГц	$f_{\text{пч}}$ , ГГц	$M$	$N_{\text{ДПФ}}$	$N_{\text{нач}}$	$N_{\text{нес}}$	$N_{\text{шп}}$
Значение	100	20	20	100	10	16	1024	256	512	10

Оценка влияния искажений ОБ на качество работы ВОСП OFDM осуществлялась путем измерения потери защищенности принятого сигнала  $\Delta A_3$  по последовательности принятых символов  $\hat{a}_k + j\hat{b}_k$  (отдельно для синфазного и квадратурного каналов) согласно выражению [2]:

$$\Delta A_{3\text{синф}} = \max \left\{ 10 \lg \frac{\text{ОГ}_{n,\text{макс}}}{\text{ОГ}_n} \right\} \text{ дБ}, \quad (11)$$

где  $\Delta A_{3\text{синф}}$  – потеря защищенности в синфазном канале;  $\text{ОГ}_{n,\text{макс}}$  и  $\text{ОГ}_n$  – открытие глаз-диаграммы синфазного канала при отсутствии и наличии искажений соответственно.

Расчет потери защищенности для квадратурного канала  $\Delta A_{3\text{кв}}$  проводился аналогично.

Результирующая потеря защищенности равна минимальной из них:

$$\Delta A_3 = \min \left\{ \Delta A_{3\text{синф}}; \Delta A_{3\text{кв}} \right\}. \quad (12)$$

Вышеприведенные выражения показывают, что на качество сигнала оказывают влияние количество оптических секций и мощность сигнала на входе волокна. Рассмотрим вначале форму сигнального созвездия при различной комбинации линейных и нелинейных искажений (рис. 2) при  $P_{\text{пч пик}} = 10$  мВт и  $N_{\text{секц}} = 7$ . Форма созвездия показывает, что отсутствие дисперсионных искажений приводит к некоторому увеличению потери защищенности  $\Delta A_3$ .

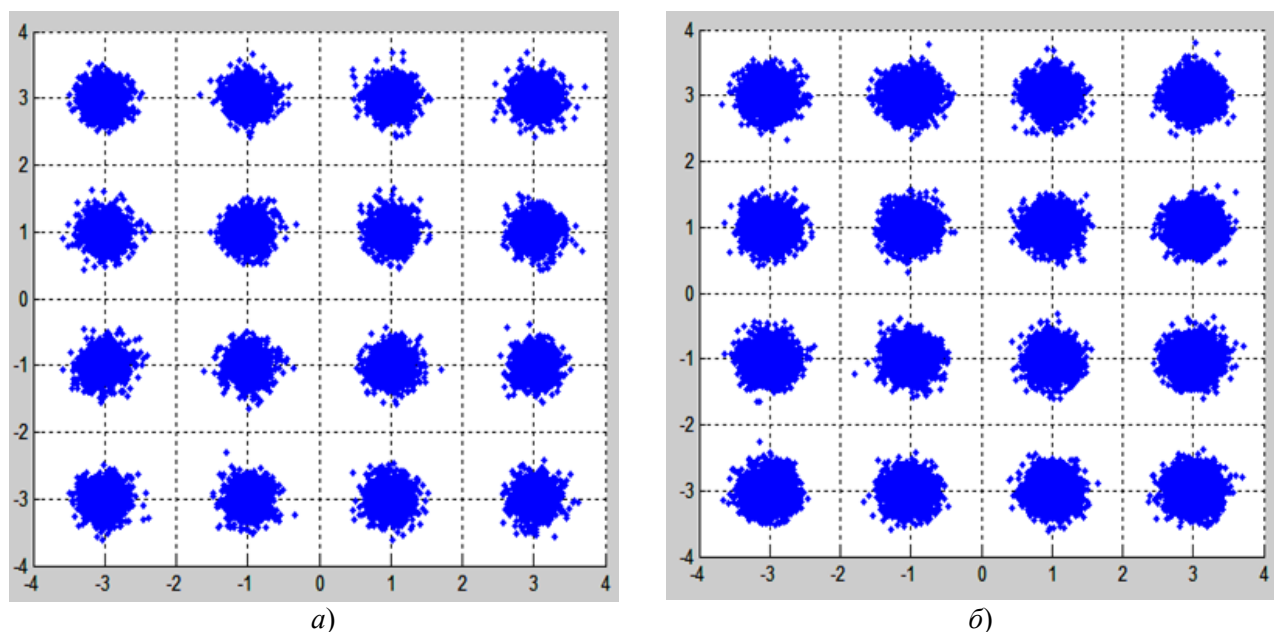


Рисунок 2 – Форма сигнального созвездия КАМ при:

а) совместном воздействии линейных и нелинейных искажений ( $\beta_2 \neq 0, \gamma \neq 0$ );

б) воздействии нелинейных искажений ( $\beta_2 = 0, \gamma \neq 0$ )

Рассмотрим теперь влияние числа секций ВОСП на потерю защищенности сигнала (рис. 3,а). Аналогично предыдущему рисунку, наибольшее влияние на потерю защищенности  $\Delta A_3$  вызывают нелинейные искажения при отсутствии линейных ( $\beta_2 = 0, \gamma \neq 0$ ). Форма полученных кривых позволяет сделать выводы о возможности пренебрежения дисперсионными искажениями ОВ при оценке параметров качества ВОСП OFDM практически для любого количества секций. Согласно выражению (5), величина нелинейного фазового сдвига зависит от напряженности электромагнитного поля (мощности) сигнала. Влияние последнего на величину  $\Delta A_3$  продемонстрировано на рис. 3,б. По оси абсцисс отложена суммарная мощность  $P_{\text{сумм}} = P_{\text{пч пик}} + P_{\text{см пер}}$  сигнала, подаваемого на вход волокна. Аналогично предыдущему случаю, потеря защищенности при нелинейных искажениях ( $\beta_2 = 0, \gamma \neq 0$ ) несколько больше совместного воздействия помех ( $\beta_2 \neq 0, \gamma \neq 0$ ). Форма полученных кривых также позволяет сделать вывод о возможности пренебрежения линейными (дисперсионными) искажениями с целью упрощения оценки величины  $\Delta A_3$ . Рис. 3 четко демонстрирует, что возникающее при этом завышение потери защищенности (запас) не превышает 2,5 дБ.

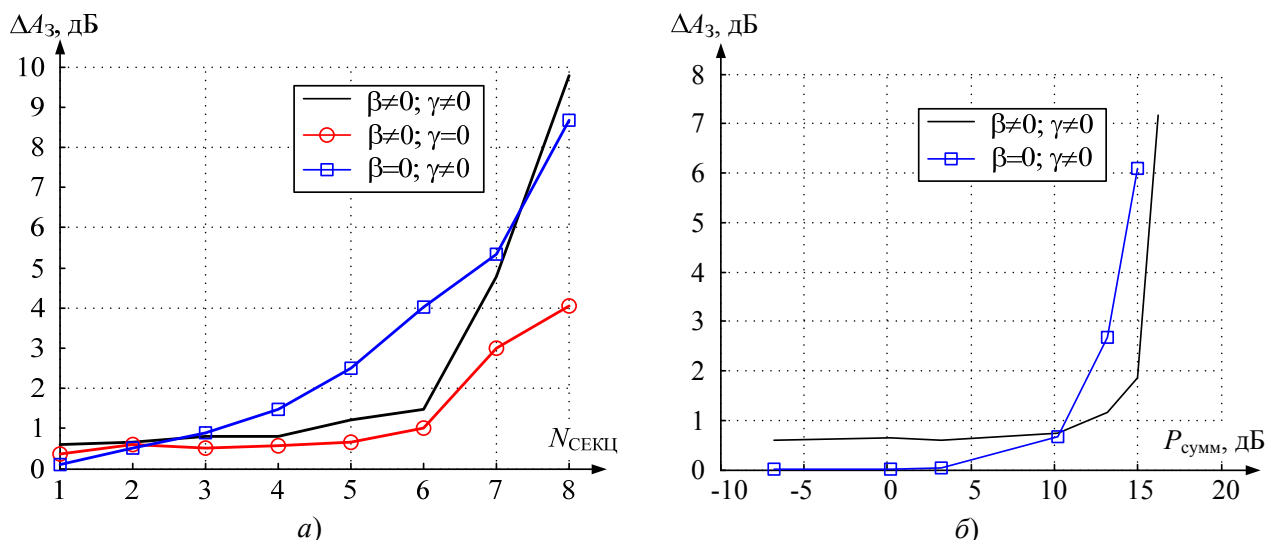


Рисунок 3 – Зависимость потери защищенности сигнала ВОСП OFDM от:  
 а) количества секций ВОСП для  $P_{\text{сумм}} = 13$  дБм; б) выходной мощности при 5  
 оптических секциях

В заключение необходимо отметить, что задача оценки влияния линейных и нелинейных искажений ОВ на качественные характеристики ВОСП OFDM выполнена. В качестве критерия качества работы ВОСП использовалась потеря защищенности принятого сигнала  $\Delta A_3$ . Путем построения соответствующей имитационной модели в среде MatLab получена величина  $\Delta A_3$  при различных комбинациях искажений ОВ типа SMF-28e+ (рек. МСЭ-Т G.652). Моделирование показало, что при количестве оптических секций до трех, линейные и нелинейные искажения принятого сигнала минимальны и потеря защищенности  $\Delta A_3$  не превышает 1 дБ. Дальнейший рост числа секций линейного тракта приводит к стремительному увеличению искажений сигнала. Отличие значений потери защищенности  $\Delta A_3$ , соответствующих воздействию нелинейных и линейных искажений на передаваемый сигнал в этом случае не превышает 2,5 дБ.

Предложенную модель и методику ее использования необходимо применять для последующих исследований других типов волокон (G.655) с нормальной и аномальной дисперсиями. Полученные результаты имитационного моделирования позволят в дальнейшем получить выражения для расчета качественных параметров ВОСП OFDM.

**Литература**

1. *Ho K.P.* Phase-modulated optical communication systems / Ho K.P. – New York: Springer, 2005. – 439 p.
2. *Seimetz M.* High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission / Seimetz M. – Berlin: Springer, 2009. – 265 p.
3. *Djordjevic I.* OFDM for Optical Communications / Shieh W., Djordjevic I. – London: Academic Press, 2010. – 457 p.
4. Fast Fourier transform [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>. Заголовок з екрана.
5. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г.; пер. с англ. С.В. Черникова, И.Ю. Хрущева, Д.В. Коробкина. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
6. *Педяш В.В.* Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2010. – № 1. – С. 109-114.
7. *Agrawal G.P.* Nonlinear fiber optics / Agrawal G.P. – London: Academic Press, 2007. – 534 p.