

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ
НА КАЧЕСТВО КАНАЛОВ ВОСП СРК С ПРЯМОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

**ОЦІНКА ВПЛИВУ ФАЗОВОЇ САМОМОДУЛЯЦІЇ
НА ЯКІСТЬ КАНАЛІВ ВОСП СРК ІЗ ПРЯМОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ**

**THE ESTIMATION OF THE SELF-PHASE MODULATION INFLUENCE
ON THE SDC FOTS WITH DIRECT MODULATION CHANNELS QUALITY**

Аннотация. В статье поставлена задача оценки совместного воздействия фазовой само-модуляции и начальной частотной модуляции на качество волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов, для решения которой в среде MatLab построена имитационная модель, учитывающая основные параметры системы передачи и среды распространения. В результате показано, что за счет использования определенных параметров исходного сигнала в соответствии с длиной линейного тракта можно добиться существенного увеличения Q-фактора.

Анотація. У статті поставлена задача оцінки спільного впливу фазової самомодуляції й початкової частотної модуляції на якість волоконно-оптичної системи передачі зі спектральним поділом каналів, для рішення якої в середовищі MatLab побудована імітаційна модель, що враховує основні параметри системи передачі і середовища поширення. У результаті показано, що за рахунок використання певних параметрів вхідного сигналу відповідно до довжини лінійного тракту можна домогтися суттєвого збільшення Q-фактора.

The summary. The problem of self-phase modulation and initial frequency modulation influence on fiber-optical transmission system with spectral division channelling quality estimation for solution of which the imitating model is constructed in article within the MatLab environment considering the basic transmission system and media parameters. As a result it is shown, that due to the use of certain parameters of an initial signal according to line path length it is possible to achieve essential increase of the Q-factor.

В настоящее время происходит активное внедрение технологии спектрального разделения каналов (СРК) в сети связи. При проектировании данных систем существует проблема оптимизации параметров исходного сигнала с точки зрения учета ряда нелинейных искажений, возникающих в среде распространения и влияющих на качество передаваемого сигнала. Так, например, в [1; 2] производится оптимизация мощности передаваемого сигнала для уменьшения влияния эффектов четырехволнового смешения и фазовой самомодуляции (ФСМ), а в [3; 4] проблему влияния эффекта чирпирования стараются уменьшить с помощью чирп-компенсаторов. Прямая модуляция активно используется в системах, работающих во втором окне прозрачности (1310 нм), из-за экономической целесообразности, но вследствие невозможности использования оптического усилителя на основе легированного эрбием волокна EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) на данной длине волны передачу сигналов на большие расстояния организуют в третьем окне прозрачности (1550 нм), но при этом рекомендуется использовать более дорогую с точки зрения реализации внешнюю модуляцию, что объясняется возникновением интермодуляционных искажений второго порядка CSO (Composite Second Order), вызванных чирпированием из-за наличия хроматической дисперсии [4].

Однако в данных источниках не рассматривается возможность значительного повышения производительности системы передачи за счет использования совместного влияния начальной частотной модуляции (ЧМ) и нелинейных эффектов (например, ФСМ) на полезный сигнал.

Поэтому **целью** данной статьи является оценка совместного влияния ФСМ и чирпирования на полезный сигнал для возможности дальнейшего выбора оптимальных значений коэффициента прямой начальной ЧМ и мощности оптического сигнала на входе оптоволокна (ОВ).

Таким образом, для решения поставленной задачи в ходе численных экспериментов необходимо выполнить измерения при передаче на разные расстояния импульсов исходного сигнала трех возможных форм, передние и задние фронты которых можно описать гауссовским, супергауссовским законами и законом гиперболического секанса [4]. Для решения поставленной задачи в среде MATLAB построена имитационная модель линейного тракта одного оптического канала волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) СРК, функциональная схема которой изображена на рис. 1.

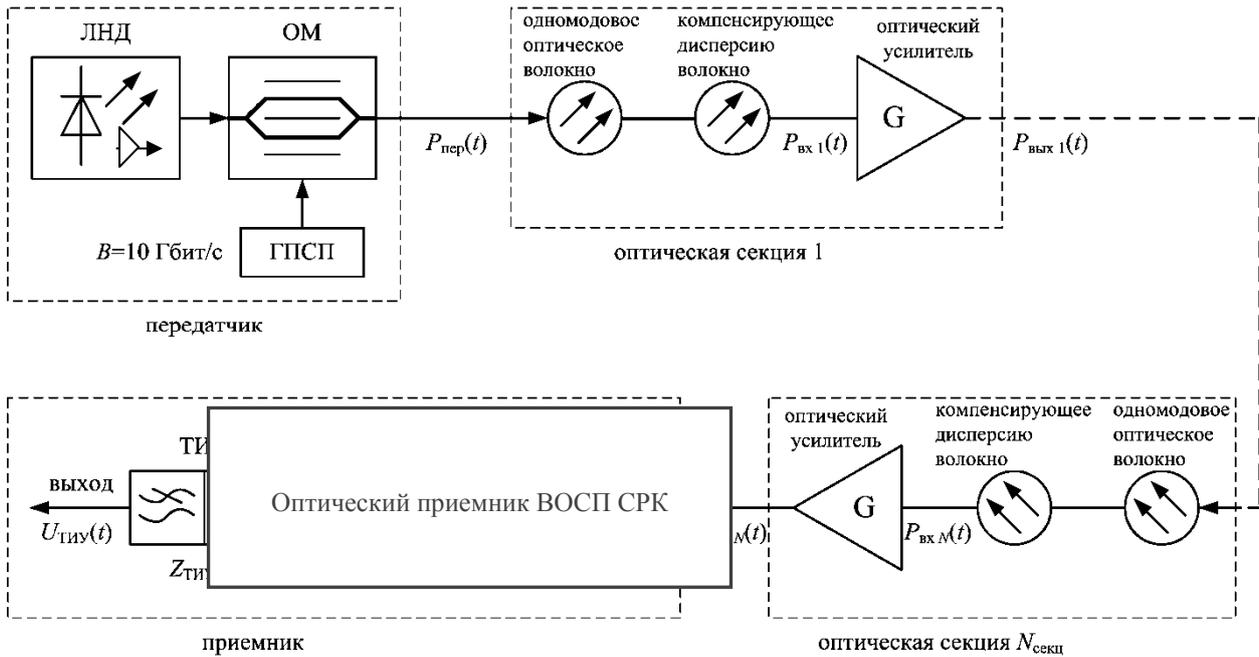


Рисунок 1 – Функциональная схема имитационной модели одного канала ВОСП СРК

Передатчик ВОСП состоит из лазера непосредственно действия (ЛНД), оптического модуля (ОМ) и генератора псевдослучайной последовательности (ГПСП). Более подробное описание основных блоков схемы приведено в статье автора [2], посвященной рассмотрению эффекта ФСМ. Таким образом, на входе ОМ сгенерирован сигнал, представляющий собой последовательность единиц и нулей, вероятность принятия которых равна 0,5. В соответствии с данной последовательностью на входе ОВ сформированы импульсы, передние и задние фронты которых можно описать законом Гаусса с половиной условной длительности импульса [5]

$$\sigma = \frac{t_{\text{фр}}}{\sqrt{2} \left(\left| \sqrt{\ln(A_1)} \right| - \sqrt{\ln(A_2)} \right)}, \quad (1)$$

где $t_{\text{фр}}$ – длительность фронта импульса выходного сигнала при изменении мощности от уровня A_1 до A_2 пикового значения $P_{\text{пик}}$.

На выходе ОМ формируется индивидуальный каналный сигнал (рис. 2 и 3), форму импульсов которого можно описать формулами, полученными в [2], для случаев гауссовского и супергауссовского импульсов с учетом начальной ЧМ [4] они принимают следующий вид:

$$P_{10}(t) = \begin{cases} P_1, & 0 \leq t \leq \Delta t; \\ (P_1 - P_0) e^{-\frac{(1+C)(t-\Delta t)^{2m}}{2\sigma^{2m}}} + P_0, & \Delta t \leq t \leq T_c; \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{01}(t) = \begin{cases} (P_1 - P_0) e^{-\frac{(1+C)(t-T_c+\Delta t)^{2m}}{2\sigma^{2m}}} + P_0, & 0 \leq t \leq \Delta t; \\ P_1, & (T_c - \Delta t) \leq t \leq T_c; \end{cases} \quad (3)$$

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

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

где P_1 и P_0 – соответственно мощность единичного ($P_1 = P_{\text{пик}}$) и нулевого символов на выходе ОМ; T_c – символьный интервал; C – коэффициент ЧМ, определяющий начальную модуляцию; m – параметр, определяющий степень крутизны импульса. Если $m = 1$, то рассматривается гауссовский импульс с ЧМ, если $m = 3$ – супергауссовский.

Для описания импульса, имеющего форму фронтов гиперболического секанса, формулы (2)...(5) принимают на основании [3] следующий вид:

$$P_{10}(t) = \begin{cases} P_1, & 0 \leq t \leq \Delta t; \\ (P_1 - P_0) \operatorname{sech} \left(\frac{t - \Delta t}{\sigma} \right) e^{-\frac{iC(t-\Delta t)}{2\sigma^2}} + P_0, & \Delta t \leq t \leq T_c; \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{01}(t) = \begin{cases} (P_1 - P_0) \operatorname{sech} \left(\frac{t - (T_c - \Delta t)}{\sigma} \right) e^{\frac{iC(t-(T_c-\Delta t))}{2\sigma^2}} + P_0, & 0 \leq t \leq \Delta t; \\ P_1, & (T_c - \Delta t) \leq t \leq T_c; \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{00}(t) = P_0, \quad 0 \leq t \leq T_c; \quad (8)$$

$$P_{11}(t) = P_1, \quad 0 \leq t \leq T_c, \quad (9)$$

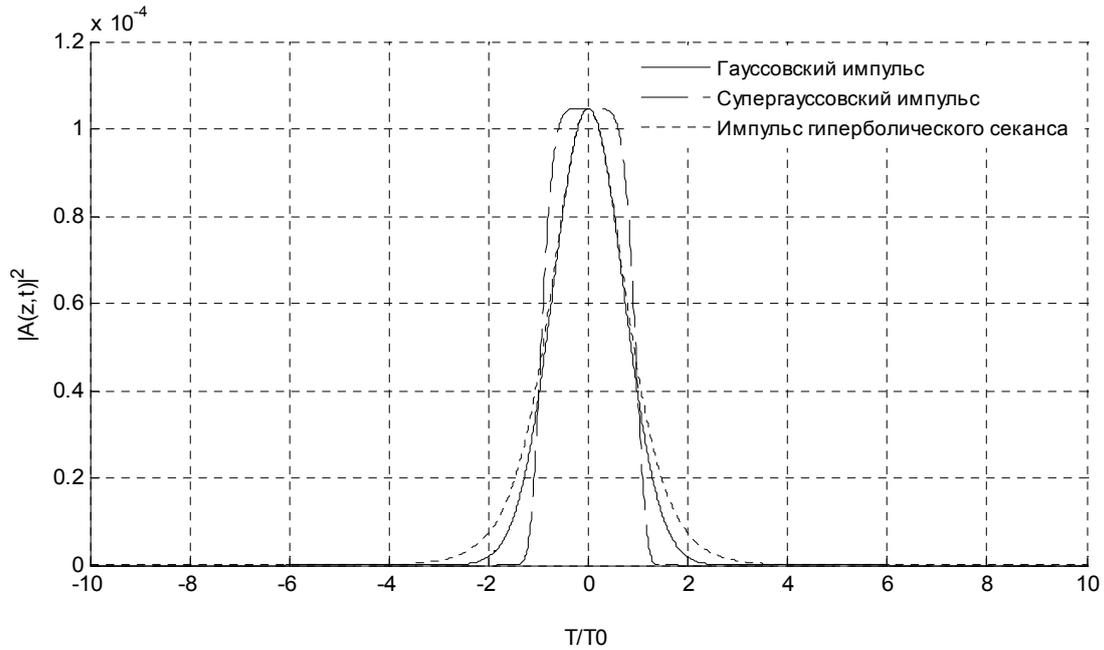


Рисунок 2 – Изображение импульсов трех видов на входе ОВ без начальной ЧМ

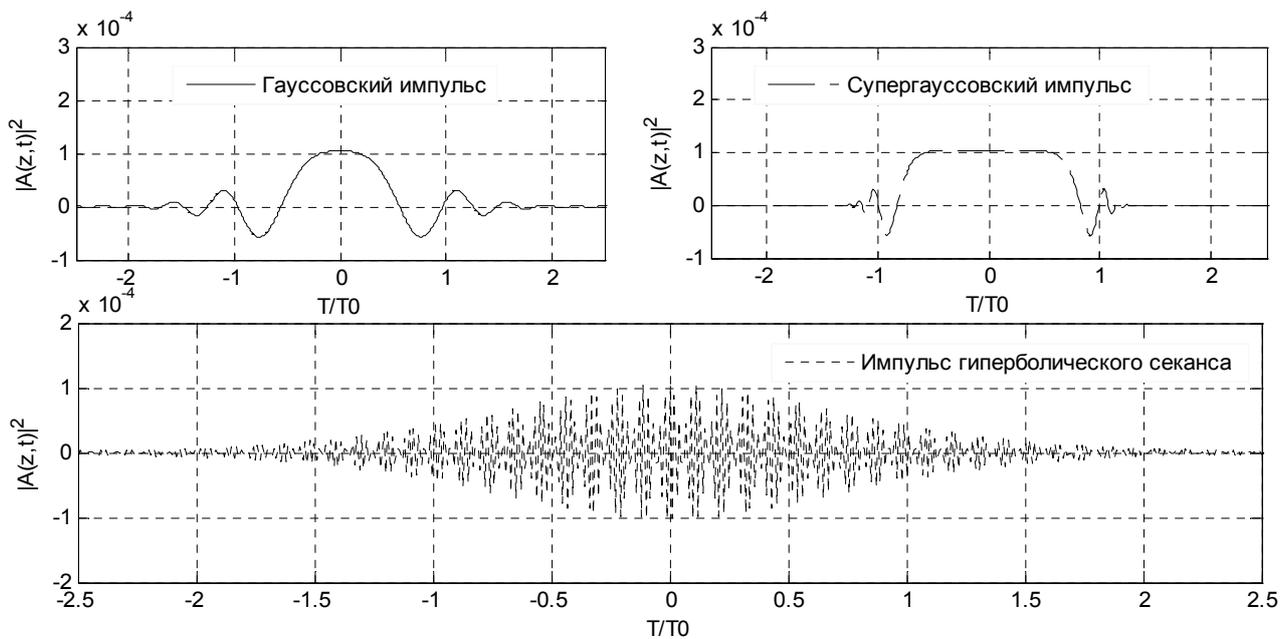


Рисунок 3 – Изображение импульсов трех видов на входе ОВ с начальной ЧМ при $C = 5$

Первый символ нижнего индекса в выражениях (2)...(9) соответствует значению бита предыдущего тактового интервала, второй символ – значению бита текущего тактового интервала.

Смещение Δt гауссовского импульса и импульса гиперболического секанса по длительности оптического импульса рассчитывалось по выражениям, для вывода которых использовались известный закон Гаусса [4], а также формулы (2) и (6) соответственно:

$$\Delta t = \frac{T_c}{2} - 2\sigma\sqrt{2\ln(2)}; \tag{10}$$

$$\Delta t = \frac{T_c}{2} - 2\sigma \ln(1 + \sqrt{2}) \frac{\sqrt{12}}{\pi}. \tag{11}$$

Оптическая секция (рис. 1) состоит из последовательно включенных стандартного ОВ типа SMF (Single Mode Fiber) длиной $L_{smf} = 50$ км (соответствует строительной длине кабеля), компенсирующего дисперсию ОВ типа DCF (Dispersion Compensation Fiber) длиной $L_{dcf} = 7,08$ км и оптического усилителя EDFA. Основа моделей ОВ описывается нелинейным уравнением Шредингера [6]

$$j \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{j\alpha}{2} A + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \gamma |A|^2 A, \tag{12}$$

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.

Одним из наиболее широко используемых методов решения задачи распространения вследствие относительно большой скорости счета (благодаря использованию алгоритма быстрого преобразования Фурье) является Фурье-метод расщепления по физическим факторам (SSFM). Главным критерием качества оптических каналов системы СРК является Q -фактор, методика расчета которого рассмотрена в [2].

Для рассмотрения всех возможных режимов распространения оптического импульса в нелинейной среде рассмотрены различные значения параметров входного сигнала (m и C) при различных длинах среды распространения (количество оптических секций $n_{сек}$). Результаты измерений приведены в табл. 1, 2, 3 и отображены на графиках зависимости Q -фактора (рис. 4, 5, 6). Таким образом, из приведенных на рис. 4 графиков зависимости Q от уровня передачи и количества секций $n_{сек}$ видим, что существует оптимальное значение уровня мощности передаваемого сигнала на входе ОВ, ячейки с соответствующими им значениями Q -фактора отмечены в табл. 1, 2 и 3 серым цветом:

Таблица 1 – Зависимость Q -фактора от количества секций и уровня передачи $p_{пер}$ при передаче гауссовского импульса без использования начальной ЧМ

$n_{сек}$ \ $p_{пер}$, дБМ	$p_{пер}$, дБМ											
	-6,00	-3,00	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	13,00	15,00	18,00	21,00	24,00
1	17,85	21,63	24,74	28,09	32,57	44,43	80,91	116,69	59,45	22,36	11,02	4,89
2	13,85	18,10	22,07	28,07	36,77	67,29	49,25	34,63	18,71	9,74	5,59	2,12
3	11,49	15,59	19,67	26,07	41,72	57,85	25,56	20,55	11,67	7,02	4,02	0,06
4	10,23	14,19	18,97	27,43	40,23	37,82	17,85	13,72	9,15	5,59	3,35	0,03
5	9,16	12,91	16,86	25,78	36,50	28,30	13,55	10,74	7,17	4,69	-0,01	0,05
6	8,35	11,67	16,49	23,87	31,83	22,96	11,01	8,79	6,38	3,99	0,01	0,05
7	7,83	11,16	15,82	22,30	28,85	18,80	9,60	7,69	5,85	3,46	0,03	0,02
8	7,11	10,27	14,37	21,51	25,81	16,30	7,95	7,27	5,53	3,03	-0,02	0,00
9	6,58	10,09	13,52	20,28	22,33	13,73	7,39	6,66	5,13	2,92	0,00	0,08
10	6,57	8,96	13,40	18,42	20,38	12,58	6,61	6,01	4,61	2,68	0,02	0,44

Таблица 2 – Зависимость Q -фактора от количества секций и уровня передачи $p_{пер}$ при передаче супергауссовского импульса без использования начальной ЧМ

$n_{сек}$ \ $p_{пер}$, дБм	-6,00	-3,00	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	13,00	15,00	18,00	21,00	24,00
1	16,42	22,29	32,71	41,30	57,72	63,35	53,12	32,30	17,42	12,55	7,44	3,95
2	11,01	16,67	22,61	31,02	41,70	42,48	29,74	17,59	12,60	7,68	3,96	1,09
3	8,88	13,07	17,94	24,53	32,50	32,65	20,48	12,83	10,71	5,10	3,14	0,99
4	7,43	11,24	15,65	22,14	28,60	25,28	16,08	13,14	7,88	4,50	2,23	0,56
5	6,91	10,36	13,96	19,81	24,52	21,30	13,83	12,13	5,86	4,09	1,25	0,03
6	6,26	9,13	12,33	17,51	21,80	18,46	12,51	10,76	4,99	3,71	1,23	0,56
7	5,71	8,34	11,79	16,82	19,45	15,75	12,27	9,13	4,67	3,05	1,27	0,01
8	5,39	7,74	10,76	15,17	18,13	14,57	12,37	7,75	4,69	2,60	1,05	0,04
9	5,11	7,29	10,60	14,16	16,85	13,11	12,19	6,58	4,18	2,07	1,05	0,37
10	4,63	6,83	9,94	13,74	15,70	12,65	11,68	5,78	4,19	1,74	0,04	0,07

Таблица 3 – Зависимость Q -фактора от количества секций и уровня передачи $p_{пер}$ при передаче импульса гиперболического секанса без использования начальной ЧМ

$n_{сек}$ \ $p_{пер}$, дБм	-6,00	-3,00	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	13,00	15,00	18,00	21,00	24,00
1	11,21	14,04	16,59	18,72	20,85	23,74	27,59	25,50	18,90	13,51	9,58	3,88
2	9,18	11,35	14,36	17,20	20,12	24,24	24,80	18,45	12,99	8,63	5,31	1,06
3	7,04	9,74	11,79	16,02	18,71	22,38	19,57	14,07	10,32	6,86	2,80	0,05
4	6,61	8,63	11,61	15,03	17,87	20,08	17,14	12,15	8,36	5,26	1,48	0,07
5	5,77	8,05	10,18	14,09	17,03	19,13	15,23	10,58	7,05	4,12	1,17	0,05
6	5,34	7,63	10,11	13,11	15,67	17,55	13,46	9,24	6,42	3,01	0,03	0,63
7	5,09	7,18	9,31	11,82	15,77	16,10	12,26	8,69	6,10	2,36	0,99	0,59
8	4,57	6,40	8,67	11,46	14,51	14,87	11,35	7,77	5,49	1,72	0,63	0,57
9	4,42	5,91	8,53	11,33	14,35	14,56	10,50	7,31	4,92	1,21	0,05	0,00
10	4,11	6,04	7,96	10,75	13,34	13,43	10,11	6,95	4,32	1,20	0,77	0,06

Для всех трех типов сигналов без начальной ЧМ в зависимости от количества секций оптимальный уровень передачи варьируется в пределах от 6 до 13 дБм, при которых значения Q -фактора удовлетворяют требуемые нормы качества систем передачи DWDM (допустимой вероятности ошибки величиной 10^{-12} соответствует $Q = 7$). Характер зависимости Q -фактора от уровня передачи для рассматриваемых типов сигналов приведен на рис. 5 при различных длинах линейного тракта (1, 5 и 10 секций).

Уменьшение Q -фактора при малых значениях $p_{пер}$ объясняется малой защищенностью сигнала от шумов спонтанного излучения усилителей, а при больших значениях $p_{пер}$ – межсимвольной интерференцией сигнала $P_{пр}(t)$ на входе фотодиода из-за расширения спектра линейного сигнала и последующего его ограничения в канальном фильтре демультимплексора. Для дальнейшей оптимизации передачи сигнала в имитационной модели используется прямая начальная частотная модуляция при использовании оптимальных значений $p_{пер}$ для 1, 5 и 10 секций. Значения коэффициента ЧМ варьируются от -10 до 10.

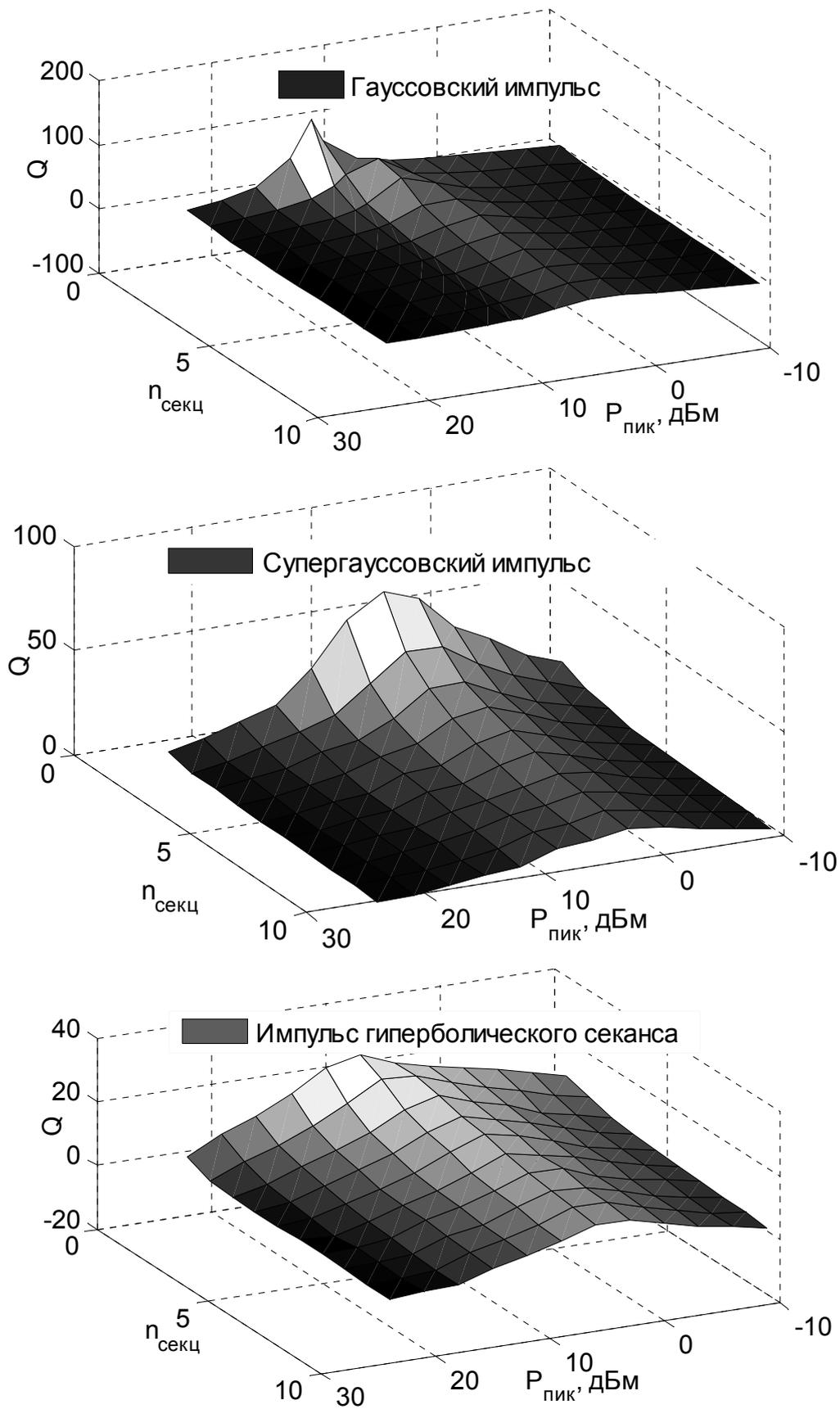
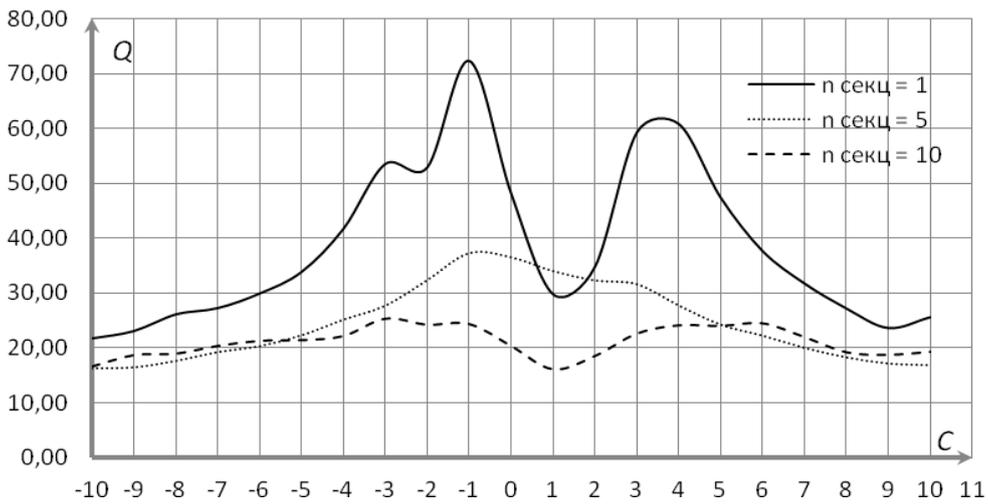
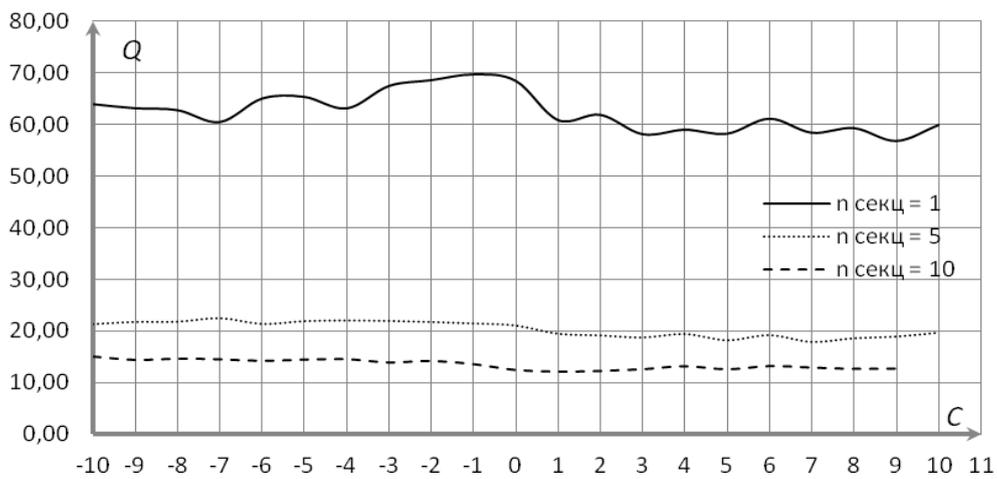


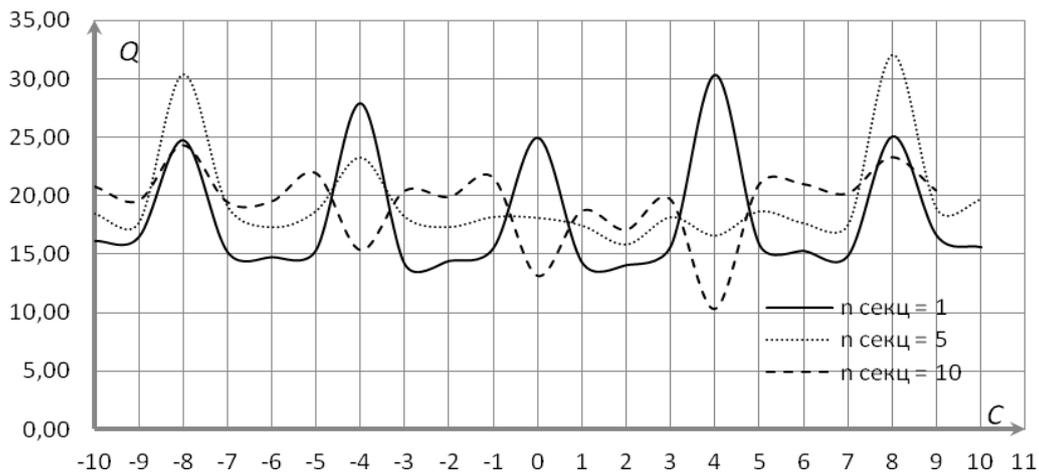
Рисунок 4 – График зависимости Q -фактора от уровня передачи при различных длинах линейного тракта для гауссовского, супергауссовского импульсов и импульса гиперболического секанса при $C = 0$ ($er = 10$ дБ; $A_1 = 0,2$; $A_2 = 0,8$; $t_{фр} = 21,4$ пс; $N_{симв} = 1000$)



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Зависимость Q -фактора от коэффициента ЧМ для случаев
 а) гауссовского; б) супергауссовского импульса;
 в) импульса гиперболического секанса для вариантов 1, 5 и 10 секций ОВ

Использование прямой начальной ЧМ в данной имитационной модели наглядно подтверждает теорию о том, что в случае правильно выбранных β_2 и C (а именно $\beta_2 C < 0$) импульс сначала сжимается, но с увеличением длины распространения длительность его увеличивается после определенной длины ОВ, вследствие преобладания ЧМ, вносимой дисперсией, над начальной ЧМ [4]. Учитывая вышесказанное, можно подобрать оптимальные значения коэффициентов β_2 и C , с учетом использования в имитационной модели оптических секций из двух типов ОВ и легированного эрбием волокна EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier).

Графически получены следующие результаты зависимости Q -фактора от $n_{\text{секц}}$ при различных значениях коэффициента C (рис. 6):

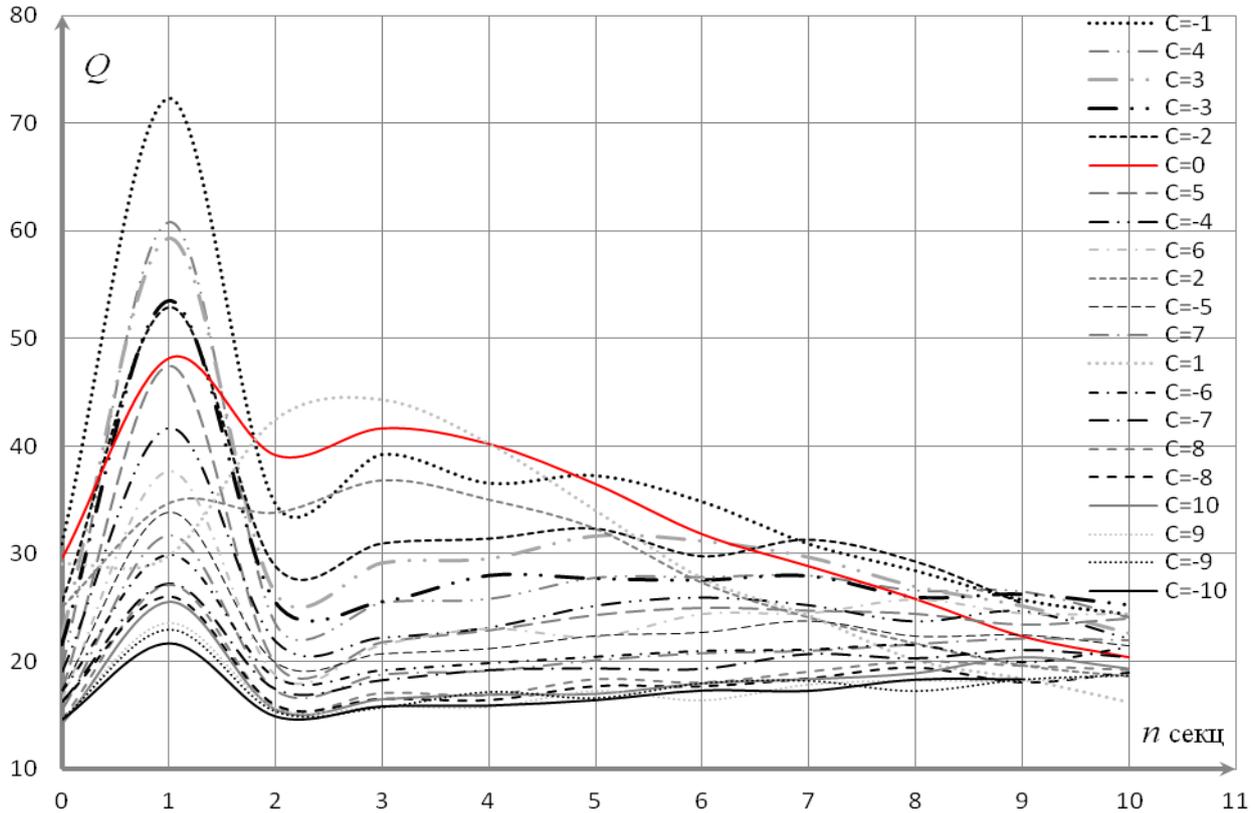


Рисунок 6 – Зависимость Q -фактора от количества секций при передаче гауссовского импульса с использованием начальной ЧМ при значениях коэффициента C от -10 до 10 ($p_{\text{пер}} = 6$ дБм)

Таким образом, наглядно видно, что с увеличением расстояния происходит уменьшение Q -фактора вследствие влияния дисперсии, которое оказывается более существенным для сигналов без начальной ЧМ, но при некоторых величинах C после определенной длины L их использование становится наиболее оптимальным, формулу для определения значения которой можно вывести используя соотношение длительности импульсов после прохождения ОВ определенной длины [4]

$$\frac{T_1}{T_2} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 L}{T_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2 L}{T_0^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

В случае использования сигналов с различными коэффициентами C при одинаковом соотношении длительностей импульсов получаем соответственно одинаковые значения Q -фактора. Приравнявая данные выражения для разных сигналов, получим значение длины ОВ, определяющее вариант оптимального сигнала на входе ОВ

$$L = -\frac{1}{2C\beta_2 B^2}$$

Для ОВ DCF и SMF, используемых в имитационной модели, были получены следующие длины, после которых оптимальным будет использование сигнала без начальной ЧМ (табл. 4):

Таблица 4 – Расчетные длины DCF и SMF ОВ

SMF ($\beta_2 = 21,682 \cdot 10^{-24} \text{ с}^2 \cdot \text{км}^{-1}$, $\alpha = 0,2 \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1}$, $\gamma = 1,28 \text{ (Вт} \cdot \text{км)}^{-1}$) AT&T 5D		DCF ($\beta_2 = 96,93406 \cdot 10^{-24} \text{ с}^2 \cdot \text{км}^{-1}$, $\alpha = 0,43 \text{ дБ} \cdot \text{км}^{-1}$, $\gamma = 5,472 \text{ (Вт} \cdot \text{км)}^{-1}$) AT&T JRFDC1074C1DC [7]	
C	L, км	C	L, км
1	230,606	-1	51,581
2	115,303	-2	25,791
3	76,869	-3	17,194
4	57,652	-4	12,895
5	46,121	-5	10,316
6	38,434	-6	8,597
7	32,944	-7	7,369
8	28,826	-8	6,448
9	25,623	-9	5,731
10	23,061	-10	5,158

В заключение следует отметить, что поставленная задача оценки совместного влияния эффектов начальной частотной модуляции и фазовой самомодуляции оптического сигнала на параметры качества оптического канала системы передачи с СРК выполнена. В результате использования данной имитационной модели можно подобрать оптимальные параметры сигнала на входе ОВ в зависимости от типа используемого сигнала и длины линейного тракта, что дает возможность существенного увеличения Q -фактора оптического сигнала.

В дальнейших исследованиях по данному направлению необходимо учесть дисперсию высшего порядка и рассмотреть модель с применением рамановских усилителей.

Литература

1. *Педяш В.В.* Оптимизация мощности группового сигнала системы DWDM [Текст] / О.С. Решетникова, В.В. Педяш // Цифрові технології. – 2009. – № 5. – С. 27 – 33.
2. *Педяш В. В.* Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП DWDM [Текст] / В. В. Педяш, О. С. Решетникова // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 1. – С. 109-114.
3. *Agrawal G. P.* Fiber-Optic Communication Systems [Text] / G.P. Agrawal. – [3-rd edition]. – New York: Wiley-Interscience, 2002. – 567 p. – (Wiley Series in Microwave and Optical Engineering / Series Editor Kai Chang, ISBN 0-471-22114-7).
4. *Agrawal G. P.* Nonlinear Fiber Optics [Text] / G. P. Agrawal. – [3-rd edition]. – New York [et al.] : Academic Press, A Harcourt Science and Technology Company, 2001. – 481 p. – (OPTICS AND PHOTONICS / Series Editor P. L. KELLEY [et al.], ISBN 0-12-045143-3).
5. *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.
6. *Murphy T.E.* Soliton Pulse Propagation in Optical Fiber [Text] / T.E. Murphy.
7. *Chang C.-C.* Broadband fiber dispersion compensation for sub-100-fs pulses with a compression ratio of 300 / C.-C. Chang and A. M. Weiner, A. M. Vengsarkar, D. W. Peckham // OPTICS LETTERS. – Vol. 21. – № 15. – August 1, 1996. – P. 1141 – 1143.