

УДК 621.391.6

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163777

## Теоретическое исследование дисперсионных эффектов на соединениях оптических волокон

Н. А. Одегов, Д. Г. Багачук, О. М. Стащук, Л. И. Степанова, О. В. Зинченко

*Досліджуються процеси перерозподілу енергії оптичного сигналу між серцевиною і оболонкою оптичного волокна в місцях їх з'єднання. В аналітичній операторній моделі отримані замкнуті формули залежності тривалості сигналу на стороні приймача від кількості з'єднань і вірогідності переходу енергії із серцевини в оболонку оптичного волокна. Виконано аналіз перерозподілу енергії за рахунок геометричної нестиковки волокон в точках їх з'єднання.*

*Для синтезу аналітичних моделей використано апарат теорії вірогідності і теорії перетворення Фур'є. В якості міри тривалості сигналу на стороні приймача використовується ефективна тривалість імпульсу.*

*Чисельний аналіз дозволив зробити висновки, що досліджувані ефекти практично не залежать від початкової форми оптичного сигналу і від варіанту розподілу будівельних довжин вздовж лінії регенераційної ділянки.*

*Отримані оцінки дозволяють стверджувати, що можливі дисперсійні ефекти, які викликані перерозподілом енергії в точках з'єднання оптичних волокон. Дані ефекти обумовлені різницею групових швидкостей в різних середовищах оптичного волокна (в серцевині і в оболонці). По своєму впливу на форму сигналу вони можуть бути порівняні з добре вивченими ефектами за рахунок матеріальної, хвилевідної та інших видів дисперсії.*

*На основі виконаних досліджень висунута наукова гіпотеза про існування ефекту дисперсії, що викликана рознімними і нерознімними з'єднаннями оптичних волокон. Обґрунтовано схему лабораторної установки для виконання натурних досліджень передбачуваних ефектів. Особливість даної установки в тому, що точки з'єднання оптичних волокон можуть розташовуватись з практично довільним кроком. Це дозволяє виконати перевірку висунутих гіпотез в лабораторних умовах*

*Ключові слова: загасання в місці з'єднання, оптичний сигнал, групова швидкість, ефективна тривалість імпульса*

### 1. Введение

Известные инженерные методики [1, 2] расчета максимальной длины регенерационного участка (РУ) волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) учитывают эффекты затухания оптического сигнала. При этом учитывается затухание как на строительных длинах, так и на соединениях оптических волокон (ОВ). Также эти методики учитывают эффекты искажения (в том числе – удлинения) оптического импульса за счет дисперсии. Однако производственный опыт авторов в промышленности телекоммуникаций позволил в ряде случаев

зафиксировать интересный для научного анализа эффект. Суть этого эффекта заключается в противоречии:

- прямые измерения рефлектометром показывают, что затухание на линии находится в приемлемых границах;

- расчеты длины РУ по дисперсии также дают удовлетворительный результат;

- при этом волоконно-оптическая линия передачи не функционирует в нормальном режиме.

Очевидным является вывод, что существующие методики не учитывают всех возможных причин, приводящих к искажению оптического сигнала.

В ряде случаев к восстановлению связи приводило уменьшение соединений ОВ. Таким образом, авторы делают вывод: одной из возможных неучтенных причин срыва связи является влияние соединений на форму сигнала. С физической точки зрения это может означать, что в точках соединения происходит перераспределение энергии между сердцевиной и оболочкой ОВ. Теоретическому анализу данного явления и посвящается предлагаемая статья.

С учетом возрастающего трафика возникает необходимость в разработке принципиально новых волоконно-оптических систем передачи. К таким системам должны предъявляться повышенные требования по скорости передачи данных. При этом актуальной является проблема учета таких эффектов в линиях передачи, которые ранее могли считаться пренебрежимо малыми.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Дополнительную информацию о возможной длине РУ дает анализ различных компонентов дисперсионного расширения сигнала по мере его распространения вдоль ОВ [3, 4].

Исследованиям в области собственно затухания сигнала в точках соединения ОВ посвящено значительное количество научных работ. В частности, синтезированы модели распределения энергии сигнала на разъёмных [5] и неразъёмных [6, 7] соединениях ОВ. Однако в данных работах не рассмотрен эффект изменения формы сигнала в местах соединения волокон. При этом значительное внимание уделяется совершенствованию соединений ОВ с точки зрения уменьшения ошибок на стороне приема [8]. Имеются работы, посвященные метрологическим аспектам исследования затуханий в точках соединения ОВ [9, 10]. В этих работах также не учтено явление искажения формы сигнала, вызванное перераспределением мощности сигнала в месте соединения ОВ. В работах [5–10] имеется обширная библиография по отмеченным вопросам, но в них не рассмотрено влияние точек соединения волокон на длительность оптического сигнала и величину вносимой дисперсии.

Характеристики затухания на соединениях ОВ настолько хорошо исследованы, а технология соединений настолько хорошо развита, что основные параметры затухания и геометрические параметры соединений включаются в международные рекомендационные стандарты [11].

Вместе с тем, для перспективных ВОСП, где используются методы сигнального уплотнения [12], важно учитывать эффекты искажения тонкой струк-

туры сигнала, вызванные комплексом причин [13]. Представляется очевидным, что в точках соединения ОВ происходит перераспределение энергии сигнала между сердцевиной волокна и его внешними слоями [14]. Учтем тот факт, что скорость распространения сигнала в среде зависит от коэффициента преломления (точнее, от группового коэффициента преломления). Тогда нетрудно предположить, что точки соединения могут обуславливать эффекты искажения сигнала, аналогичные дисперсионным [15, 16].

В то же время, литературные источники [5–10] не дают информации о влиянии исследуемых процессов перераспределения мощности на форму, а, следовательно, и на длительность оптического сигнала.

Поэтому перспективными следует считать исследования, посвященные теоретическому анализу воздействия фактора перераспределения энергии в точках соединения ОВ на эволюцию формы оптического сигнала. В частности, речь может идти о ранее не исследованном виде дисперсии в ВОСП – дисперсии на соединениях ОВ.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью работы является исследование дисперсионных эффектов в точках соединения оптических волокон. Это даст возможность более точно рассчитывать увеличение длительности оптических импульсов в перспективных ВОСП. В инженерном плане данные исследования позволят уточнить методики расчета длин регенерационных участков.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- синтезировать соответствующие математические модели преобразований сигнала в точках соединения;
- синтезировать аналитические модели преобразования сигналов в группе точек соединения;
- получить приблизительные количественные оценки влияния дисперсионных эффектов на соединениях ОВ на изменение длительности сигнала на стороне приема;
- разработать схемы измерений для проверки выдвигаемых гипотез.

### **4. Факторы и модели дисперсии в точках соединения оптических волокон**

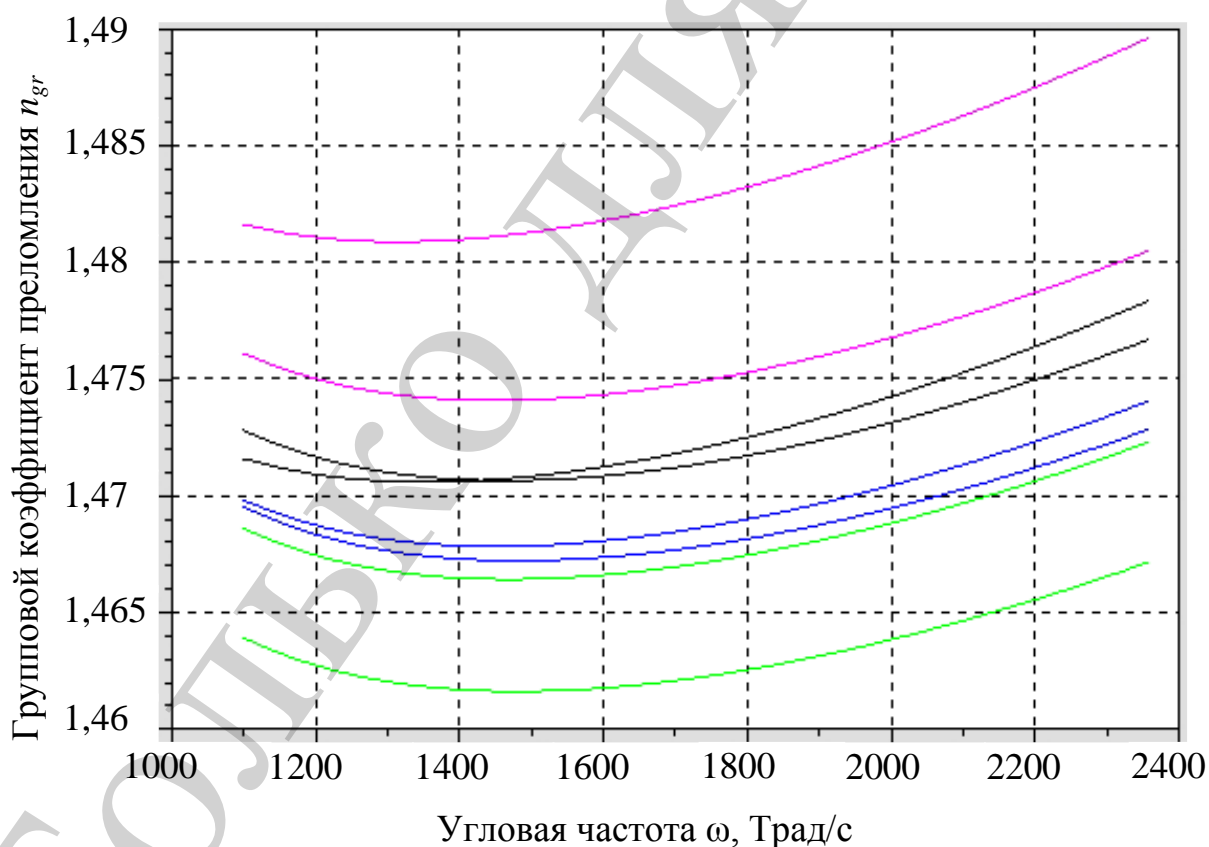
Исследуемые эффекты обуславливаются перераспределением энергии сигнала между сердцевиной и оболочкой ОВ в точках соединения. При этом оболочку и сердцевину можно в некотором приближении рассматривать как два независимых световода [17]. Дисперсионные эффекты обуславливаются при этом различием групповых коэффициентов преломления [18, 19] (следовательно, и различием групповых скоростей) в сердечнике и оболочке ОВ.

Расчеты по методике [20, 21] значений группового коэффициента преломления и групповой скорости в зависимости от материала и угловой частоты даны на рис. 1. Анализ этих графиков позволяет выполнить следующие приблизительные расчеты. Разница групповых скоростей  $\Delta V_{gr}$  на 1 % разницы концентрации  $\text{GeO}_2$  составляет примерно 200 км/с. Предположим, что материалу

сердцевины соответствует групповая скорость  $\Delta V_{0gr}$ , а концентрация  $\text{GeO}_2$  в материале оболочки на 1 % меньше, чем в материале сердцевины. Тогда получаем приблизительную оценку относительного опережения составляющей сигнала в оболочке на длине линии  $l$ :

$$\tau(l) = l \left( \frac{1}{V_{0gr}} - \frac{1}{V_{0gr} + \Delta V_{gr}} \right) \approx \frac{l \cdot \Delta V_{gr}}{V_{0gr}^2} \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 5 \text{ нс}. \quad (1)$$

Допустим, что в сердцевине и оболочке распространяется приблизительно равное количество энергии сигнала, а апертура фотоприемника захватывает как площадь сердцевины, так и площадь оболочки. Тогда оценка (1) даст в результате весьма скромную скорость передачи информации на расстоянии 100 км: менее 1 Мбит/с. Данное значение никак не согласуется с типичной линейной скоростью передачи, например, оборудования класса STM [2] – до 100 Гбит/с. Причина в том, что здесь были приняты закругленные оценки параметров. На самом деле, в оболочке распространяется относительно небольшая часть энергии сигнала. В то же время, пренебрегать исследуемыми эффектами для перспективных ВОСП не следует.



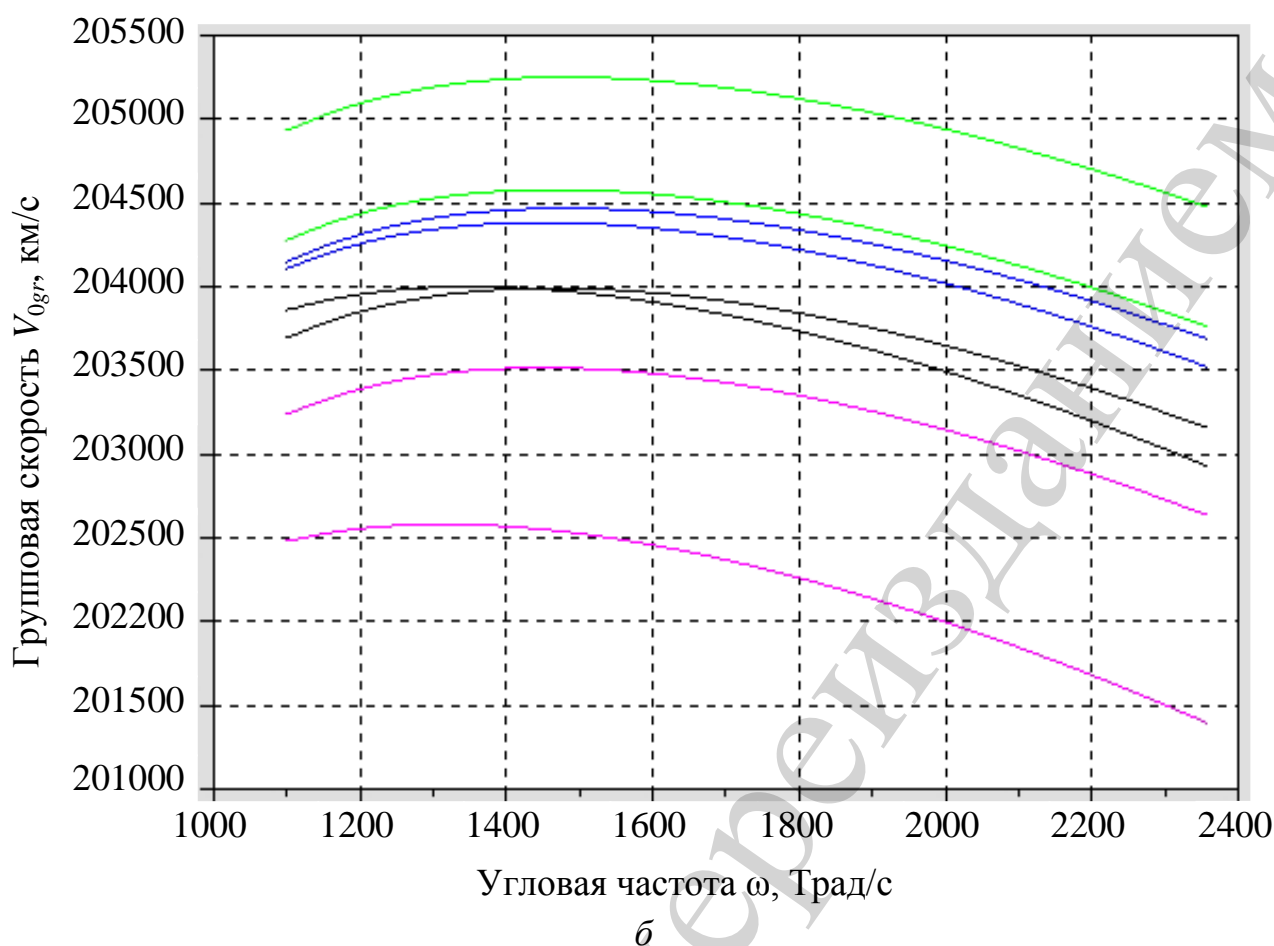


Рис. 1. Зависимости от угловой частоты и концентрации легирующих добавок двуокси германия  $\text{GeO}_2$ : *a* – группового коэффициента преломления; *б* – групповой скорости. Концентрация составляет 0 %, 3,1 %, 3,5 %, 4,1 %, 5,8 %, 7,0 %, 7,9 %, 13,5 %. Положение графиков зависит от концентрации  $\text{GeO}_2$ : *a* – чем выше кривая, тем больше концентрация  $\text{GeO}_2$ ; *б* – обратный порядок

Среди причин, вызывающих перераспределение энергии в точках соединений ОВ, выделим следующие группы: диффузионные эффекты, геометрические факторы, монтажные (конструктивные) факторы.

Диффузионные эффекты [5, 22] проявляются вследствие смешения материалов покрытия, оболочки и сердцевины ОВ. Далее ограничимся рассмотрением ОВ со ступенчатым профилем (рис. 2).

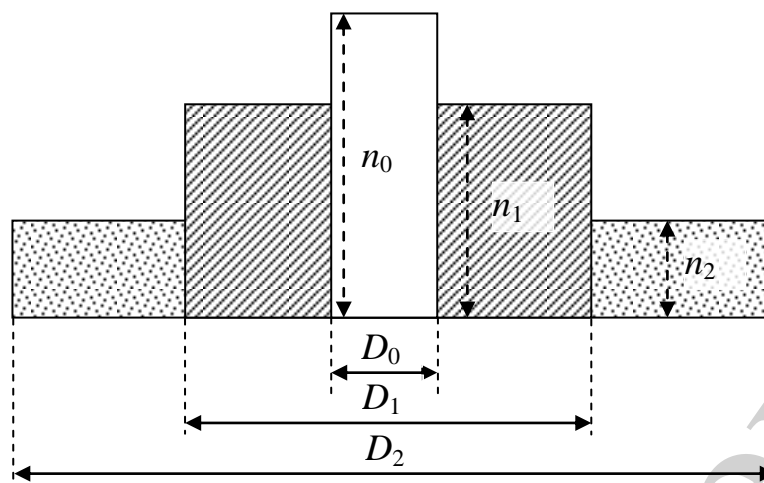


Рис. 2. Профиль коэффициента преломления ступенчатого волокна:  $D_0 < D_1 \ll D_2$  (диаметры сердцевины, оболочки и покрытия ОВ);  $n_0 > n_1 \gg n_2$  (коэффициенты преломления материала сердцевины, оболочки и покрытия соответственно)

Очевидно, диффузия создает точечный эффект, где на небольшой длине ОВ приобретает характер градиентного волокна (1), причем со случайным градиентом. Данная группа эффектов характерна для неразъемных сварных соединений ОВ.

Геометрические факторы [11] сводятся к рассогласованию направлений входящего и исходящего ОВ (тангенциальное и угловое смещение), а также к наличию зазора между этими ОВ. В первом случае имеется несовпадение модового пятна из входящего волокна с площадью сердцевины исходящего ОВ. Во втором случае причиной выхода энергии из сердцевины в оболочку является не абсолютная пространственная когерентность излучения. Данные факторы характерны как для разъемных, так и для неразъемных соединений ОВ.

Монтажные (конструктивные) факторы [23] создают дополнительные эффекты перераспределения энергии в случае соединения волокон разных типов (в том числе, с разными характерными диаметрами).

Абстрагируясь от причин, вызывающих перераспределение энергии, ограничимся рассмотрением модели в виде оператора (рис. 3).

В операторной схеме по рис. 3 полагается, что на входе  $k$ -ой точки соединения действует два независимых сигнала  $S_0(t)$  и  $S_1(t)$  – соответственно сигналы в сердцевине и оболочке волокна. Поскольку далее будут рассматриваться энергетические параметры, то на рис. 3 приняты соответствующие обозначения:  $S_0(t) = s^2(t)$  – функция распределения мощности во временной области (ФРМ) сигнала в сердцевине ОВ;  $S_{k-1,1}^*(t) = s_1^2(t)$  – ФРМ сигнала в оболочке ОВ.

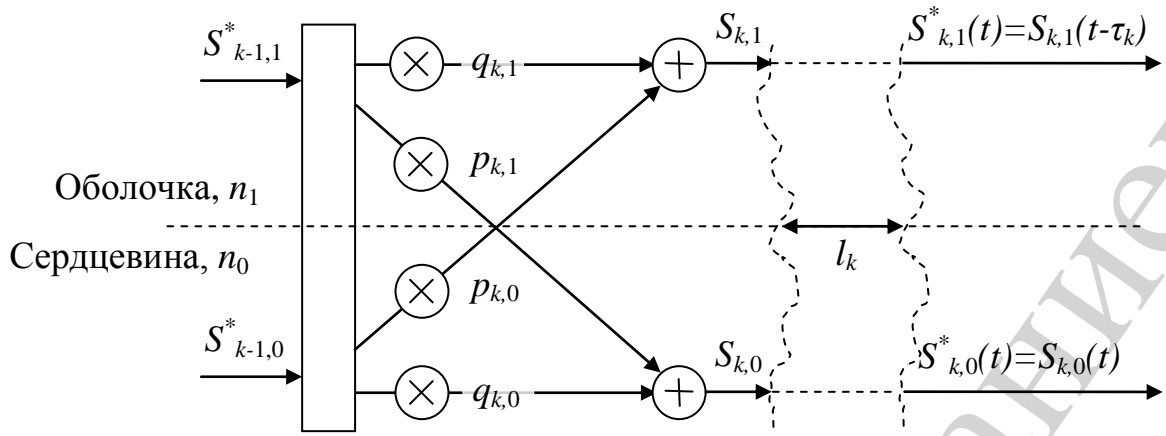


Рис. 3. Оператор преобразований на  $k$ -ой точке соединения ОБ

Для оценивания длительности сигнала произвольной формы на стороне приема будем пользоваться двумя характеристиками: эффективной длительностью импульса (ЭДИ)  $T_{eff}^2$  с квадратичной размерностью [24] и расчетной длительностью импульса (РДИ)  $T_s = 6\sqrt{T_{eff}^2}$  с линейной размерностью [12]. Первая из этих характеристик удобна для аналитических исследований, а вторая определяет часть длительности сигнала (возможно, теоретически бесконечного), в которой заключено не менее 90 % энергии сигнала. Определим ЭДИ:

$$T_{eff}^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} (t - \bar{t})^2 S(t) dt, \quad E = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) dt, \quad \bar{t} = \int_{-\infty}^{\infty} t S(t) dt, \quad (2)$$

где  $E$  – энергия сигнала, Вт;  $S(t)$  – ФРМ сигнала, Вт/с;  $\bar{t}$  – положение энергетического центра сигнала во временной области, с.

Учтем, что выражения ЭДИ (2) включают нормировку к энергии сигнала  $E$ . Тогда без ограничения общности можно полагать, что на входе  $k$ -ой точки соединения действует сигнал с единичной энергией:

$$E_{\Sigma, k-1} = E_{k-1,0} + E_{k-1,1} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{k-1,0}^*(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} S_{k-1,1}^*(t) dt = 1. \quad (3)$$

Также примем, что явления обратного рассеивания энергии в точке соединения и выход части энергии сигнала из оболочки в покрытие ОБ и т. п. также не влияют на характеристики модели. Они приводят к уменьшению амплитуды сигнала на стороне приема, но не влияют на длительность сигнала. Тогда доли  $p$  и  $q$  перераспределяемой энергии в точке соединения можно представить в виде вероятностной модели:

$$0 \leq q_{0,k} \leq 1, \quad p_{0,k} = 1 - q_{0,k}, \quad 0 \leq q_{1,k} \leq 1, \quad p_{1,k} = 1 - q_{1,k}, \quad (4)$$

а параметры  $p$  и  $q$  далее называть соответствующими вероятностями перехода энергии. Из выражений (3) и (4) очевидно следует «закон сохранения энергии»:  $E_{\Sigma,k} = E_{\Sigma,k-1}$ .

На выходе  $k$ -ой точки соединения получается преобразование ФРМ:

$$\begin{cases} S_{k,0} = q_{k,0} \cdot S_{k-1,0}^* + p_{k,1} \cdot S_{k-1,1}^*, \\ S_{k,1} = q_{k,1} \cdot S_{k-1,1}^* + p_{k,0} \cdot S_{k-1,0}^*, \end{cases} \quad (5)$$

а на выходе  $k$ -й строительной длины (т. е. на входе  $k+1$ -й точки соединения) выполняется дополнительное преобразование типа задержки-опережения:

$$\begin{cases} S_{k,0}^*(t) = S_k(t), \\ S_{k,1}^*(t) = S_{k,1}(t - \tau_k). \end{cases} \quad (6)$$

В последнем операторе принимаем, что сигнал в оболочке распространяется быстрее сигнала в сердцевине. То есть  $\tau_k > 0$ , где величина параметра опережения определяется по формуле (1) в зависимости от строительной длины  $l_k$  и разности групповых скоростей в оболочке и сердцевине ОВ.

Таким образом, операторные уравнения (5) и (6) задают итерационную модель перераспределения энергии сигнала между сердцевиной и оболочкой ОВ. Если полагать, что переходные вероятности в точках соединения  $k-1$  и  $k$  не зависят друг от друга, то модель переходов (5) задает случайный процесс в виде цепи Маркова [25]. С формально-математической точки зрения специфику решаемой задаче доставляет оператор задержки-опережения (6), а также необходимость получения конечного результата в соответствии с формулами (2). В общем случае такая задача, очевидно, не имеет аналитического решения. Рассмотрим ряд частных случаев.

## 5. Синтез простейшей дисперсионной модели

Для упрощения модели (2)–(6) примем следующие предположения. Будем считать, что энергия в точках соединения ОВ может переходить из сердцевины в оболочку, но не возвращается из оболочки в сердцевину. Это предположение с некоторой долей предположения оправдано тем, что диаметр оболочки (а, следовательно, и площадь исходящего модового пятна, существенно больше диаметра сердцевины). Также будем считать, что строительные длины на выбранном регенерационном участке имеют приблизительно одинаковую длину. Следовательно, на разных строительных длинах шаг относительного опережения составляющих сигнала  $\tau$  можно считать одинаковым. Также для разгона алгоритма положим, что на входе 1-го соединения действует сигнал, ФРМ которого полностью сосредоточена в сердцевине.

Тогда получаем для  $k$ -ой строительной длины систему операторных уравнений:



$$\begin{cases} S_{k,0} = q \cdot S_{k-1,0}^*, \\ S_{k,1} = q \cdot S_{k-1,1}^* + p \cdot S_{k-1,0}^*, \end{cases} \quad q + p = 1, \quad \begin{cases} S_{0,0} = S_0(t), \\ S_{0,1} = 0, \end{cases} \quad \begin{cases} S_{1,0}^* = qS_0(t), \\ S_{1,1}^* = pS_0(t - \tau). \end{cases} \quad (7)$$

Из выражений (7) следует, что на выходе 2-й строительной длины ФРМ суммарного сигнала будет:

$$S_{\Sigma,2}^* = S_{2,0}^* + S_{2,1}^* = q^2 S_0(t) + pqS_0(t - \tau) + pS_0(t - 2\tau). \quad (8)$$

Положим, что регенерационный участок состоит из  $N$  строительных длин. Тогда из выражений (7) и (8) по индукции доказывается, что сигнал на выходе  $N$ -ой строительной длины (т. е. на входе фотоприемника) будет иметь суммарную ФРМ:

$$\begin{aligned} S_{\Sigma,N}^*(t) &= q^N S_0(t) + p \sum_{k=1}^N q^{N-k} S_0(t - k\tau) = \\ &= q^N S_0(t) + p \sum_{k=0}^{N-1} q^k S_0[t - (N - k)\tau]. \end{aligned} \quad (9)$$

Для сигнала  $s_0(t)$  на входе в ОВ примем, что его энергия равна единице, энергетический центр находится в точке ноль, а в момент ввода сигнала в ОВ его начальная ЭДИ равна  $T_0^2$ :

$$\begin{aligned} E_0 &= \int_{-\infty}^{\infty} s_0^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} S_0(t) dt = 1, \\ \bar{t}_0 &= \int_{-\infty}^{\infty} t S_0(t) dt = 0, \quad T_0^2 = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 S_0(t) dt. \end{aligned} \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) следует формула для энергии сигнала на выходе  $N$ -ой строительной длины:

$$E_N = q^N \int_{-\infty}^{\infty} S_0(t) dt + p \sum_{k=0}^{N-1} q^k \int_{-\infty}^{\infty} S_0[t - (N - k)\tau] dt = q^N + p \sum_{k=0}^{N-1} q^k. \quad (11)$$

В последнем выражении под знаком суммы находятся члены геометрической прогрессии. Тогда:

$$E_N = q^N + p \frac{1 - q^N}{1 - q} = q^N + 1 - q^N = 1, \quad (12)$$

то есть «закон сохранения энергии» в данном случае выполнен. Для получения выражения ЭДИ на выходе  $N$ -ой строительной длины воспользуемся известной теоретико-вероятностной зависимостью [25] второго центрального момента:

$$T_N^2 = \overline{t_N^2} - (\overline{t_N})^2 = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 S_N(t) dt - \left[ \int_{-\infty}^{\infty} t S_N(t) dt \right]^2, \quad (13)$$

где  $\overline{t_N^2}$  – значение второго начального момента сигнала на выходе  $N$ -ой строительной длины, с;  $\overline{t_N}$  – смещение энергетического центра сигнала по отношению к нулевому начальному значению, с.

Для вычислений по формуле (13) по схеме вывода формулы (12) воспользуемся двумя табличными суммами:

$$\sum_{k=0}^N kq^k = (1-q)^{-2} \cdot [q + (Nq - N - 1)q^{N+1}], \quad (14)$$

$$\sum_{k=0}^N k^2 q^k = (1-q)^{-3} \cdot \{q(1+q) - q^{N+1}[(N+1)^2 - (2N^2 + 2N - 1)q + N^2 q^2]\}. \quad (15)$$

С использованием формулы (9) определим значение параметра  $\overline{t_N}$  в формуле (13), сразу выполнив замену переменных. Тогда с учетом нулевого положения энергетического центра сигнала в начальный момент времени:

$$\overline{t_N} = p \sum_{k=0}^{N-1} q^k \int_{-\infty}^{\infty} (t + N\tau - k\tau) S_0(t) dt = p\tau N \sum_{k=0}^{N-1} q^k - p\tau \sum_{k=0}^{N-1} kq^k. \quad (16)$$

Выполняя аналогичные операции для начального момента  $\overline{t_N^2}$ , получим промежуточное выражение:

$$\overline{t_N^2} = q^N T_0^2 + pT_0^2 \sum_{k=0}^{N-1} q^k + p\tau^2 N^2 \sum_{k=0}^{N-1} q^k - 2p\tau^2 N \sum_{k=0}^{N-1} kq^k + p\tau^2 \sum_{k=0}^{N-1} k^2 q^k. \quad (17)$$

Применяя к выражениям (16) и (17) формулы суммирования (14) и (15) и пренебрегая членами порядка малости меньше 1, получим приближенные выражения:

$$\overline{t_N} \approx \tau N(1 - q^N), \quad \overline{t_N^2} \approx T_0^2 + \tau^2 N^2(1 - q^N),$$

откуда с учетом формулы (13) получим окончательно:

$$T_N^2 = T_0^2 + \tau^2 N^2 q^N (1 - q^N). \quad (18)$$

В результате получена достаточно простая и удобная для анализа зависимость, в которую входят все параметры моделируемого регенерационного участка. В двух крайних случаях, когда энергия сигнала полностью остается в сердцевине ( $q=1$ ) или полностью переходит в оболочку ( $p=1, q=0$ ), конечная длительность сигнала будет равна его начальной длительности:  $T_N^2 = T_0^2$ . Это вполне соответствует модели гонок групповых скоростей в сердцевине и оболочке ОВ.

Для оценки влияния дисперсионных эффектов на соединениях ОВ рассмотрим условный пример. Положим, что длина регенерационного участка приблизительно 200 км, а точки соединений размещены с равным шагом 2 км. Количество таких точек  $N=100$ . Примем, что вероятность выхода энергии в оболочку мала и составляет  $p \approx 10^{-6}$ , то есть  $q \approx 0,999999$ . В формуле (1) положим разность групповых скоростей  $\Delta V_{gr} \approx 4$  км/с. Для получения значения РДИ будем пренебрегать в формуле (18) начальной эффективной длительностью сигнала. Тогда приращение его длительности будет приблизительно:

$$\Delta T_p = 6 \cdot \tau \cdot N \cdot \sqrt{q^N (1 - q^N)}. \quad (19)$$

Расчеты по формуле (19) дают приблизительно  $\Delta T_p \approx 1,2$  нс. Сравним полученную величину с типичными паспортными значениями удельного коэффициента дисперсии [1]. Для разных частот и для разных типов ОВ они имеют порядок 3...20 пс/(нм·км). Для расчетов примем некоторое среднее значение 10 пс/(нм·км). На расстоянии 200 км для типичного узкополосного канала передачи с шириной порядка 100 ГГц (на несущей частоте 200 ТГц эта полоса соответствует примерно 1 нм) [2] получим приращение начальной длительности сигнала около 2 нс.

Как видим, расчеты по формуле (19) и оценка с использованием паспортных данных оптического кабеля, дают значения одного порядка. Конечно, в этой простейшей модели не учтены такие явления, как возвращение энергии из оболочки в сердцевину на расстояниях строительных длин, различие коэффициентов затухания в средах сердцевины и оболочки и т. п. Вместе с тем, даже из этой простейшей модели видно, что явлением дисперсии на соединениях, вообще говоря, пренебрегать не следует.

## **6. Получение оценок вероятностей перераспределения энергии на соединениях**

Реальную оценку вероятностей перехода энергии дают различные схемы прямых измерений [5, 9, 22]. Для задач, рассматриваемых в настоящей работе достаточно ограничиться приближенными оценками. В самом простом случае будем исходить из типичного значения затухания сигнала в точке сварки ОВ [11] порядка 0,1 Дб. Иначе говоря, в данной точке рассеивается порядка 1 % входящей энергии.

Рассмотрим модель перехода энергии из сердцевины в оболочку за счет геометрических факторов: тангенциального или углового (рис. 4) смещения входящего и исходящего ОВ.

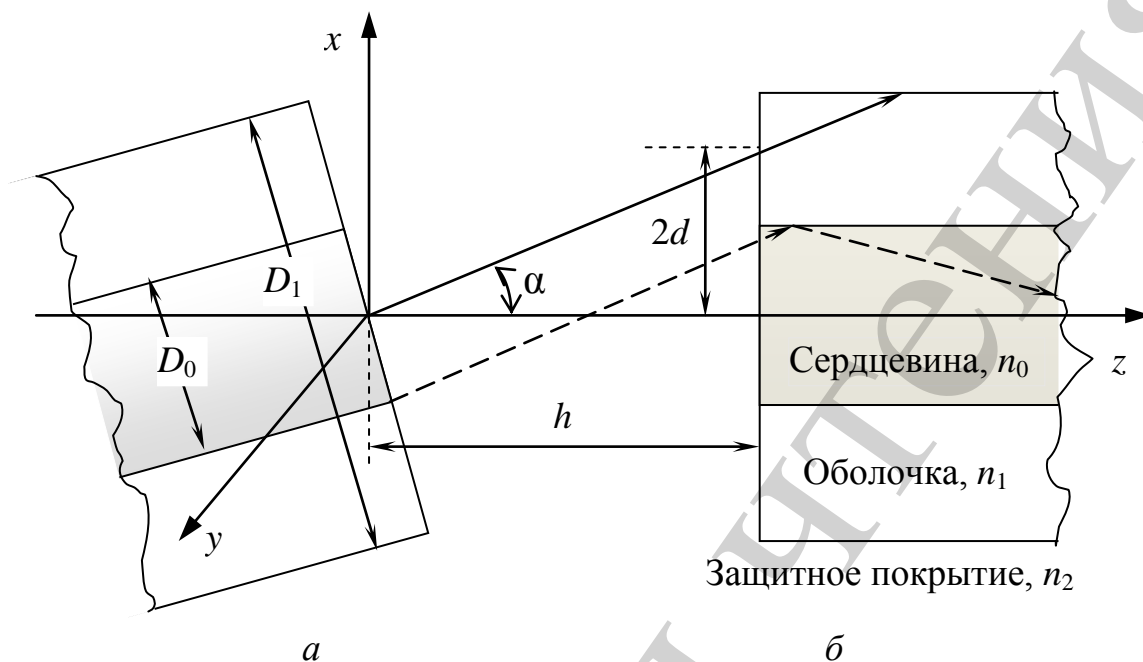


Рис. 4. Угловое смещение ОВ в точке соединения:  
*a* – входящее волокно; *б* – исходящее волокно

Если предположить, что небольшая доля этих потерь (порядка  $10^{-4}$ ) является составляющей энергии, распространяющейся далее в оболочке, то оценки приращения РДИ, данные в предыдущем пункте, будут более-менее адекватными.

Положим, что сигнал, исходящий из торца входящего волокна имеет абсолютную пространственную когерентность; диаметр модового пятна (параметр  $D_M$  на рис. 5) равен диаметру сердцевины  $D_0$ , а энергия сигнала в площади модового пятна распределена равномерно.

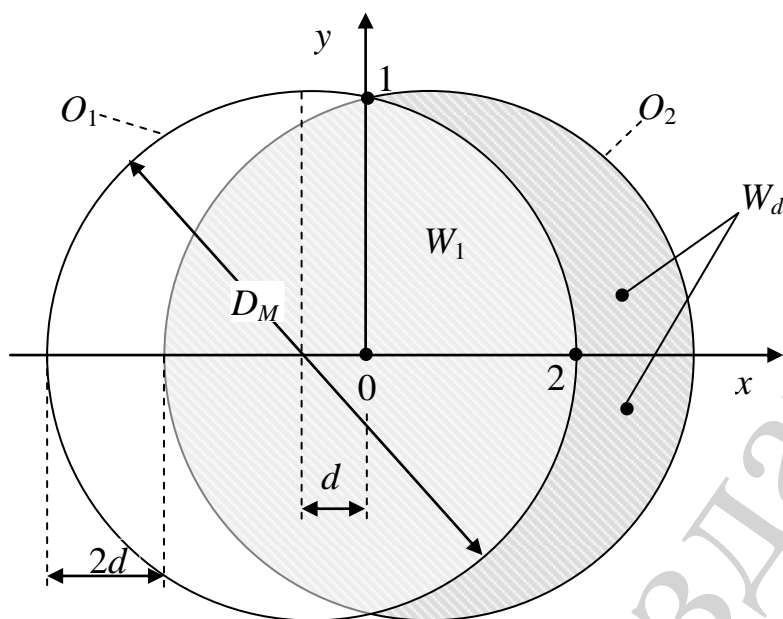


Рис. 5. Несовпадение модового пятна  $O_1$  и площади сердцевины исходящего волокна  $O_2$

В модели несовпадения площадей (рис. 5) доля энергии, переходящей из сердцевины в оболочку будет пропорциональна площади несовпадения  $W_d$ . Эту площадь в виде «полумесяца» можно вычислить как разность площадей:  $W_d = W_0 - 4W_1$ , где  $W_0$  – площадь сердцевины ОВ (с диаметром  $D_0 = D_M$ ), а  $W_1$  – площадь криволинейной трапеции с характерными точками 0, 1 и 2 на рис. 5. В обозначениях рис. 4 и рис. 5 уравнение окружности  $O_1$  будет:  $y^2 + (x+d)^2 = r^2$ , где радиус  $r = D_0/2$ . Из последнего выражения следует уравнение дуги 1–2, ограничивающей площадь  $W_1$ :  $y = \sqrt{r^2 - (x+d)^2}$ . Тогда выражение для искомой площади будет:

$$W_d = \pi r^2 - 4 \int_0^{r-d} \sqrt{r^2 - (x+d)^2} dx. \quad (20)$$

С использованием табличного интеграла из выражения (20) получим:

$$W_d = \pi r^2 - 2 \cdot \left[ (d+x) \sqrt{-d^2 - 2dx + r^2 - x^2} + r^2 \arctan \left( \frac{d+x}{\sqrt{r^2 - (x+d)^2}} \right) \right] \Bigg|_0^{r-d}. \quad (21)$$

При вычислении значения функции  $\arctan(\varphi)$  по верхнему пределу в формуле (21) получаем неопределенность типа деления на ноль. Выполняя пре-

дельный переход для первого квадранта, получаем  $\arctan(\varphi \rightarrow \infty) \rightarrow \pi/2$ . Тогда после приведения подобных получим:

$$W_d = 2 \cdot \left[ d\sqrt{r^2 - d^2} + r^2 \arctan\left(\frac{d}{\sqrt{r^2 - d^2}}\right) \right]. \quad (22)$$

Положим в формуле (22), что  $r \gg d$ , тогда в подкоренных выражениях параметром  $d$  можно пренебречь. Также учтем, что в пределе  $\arctan(\varphi \rightarrow 0) \rightarrow \varphi$ . Тогда  $W_d \approx 4dr$ , а в относительных величинах вероятность перехода энергии из сердцевины в оболочку будет:

$$p = W_d / W_0 = \frac{4d}{\pi r}. \quad (23)$$

Оценку параметра сдвига  $d$  дадим исходя из значений типичных угловых смещений [12] порядка  $\alpha^\circ \approx 1^\circ$  (или  $\alpha \approx \pi/180$  в радианной мере). Поскольку при малых углах  $\sin(\alpha) \approx \alpha$ , то упрощенное выражение для вероятности перехода получается в виде:  $p \approx 2\pi h \alpha^\circ / 180\pi r$ , где  $h$  – расстояние между торцами входящего и исходящего ОВ (рис. 4). Полагая, что расстояние  $h$  приблизительно равно радиусу  $r$  сердцевины ОВ и  $\alpha^\circ \approx 1^\circ$ , получим оценку значения вероятности  $p \approx 0,01$ .

Полученная оценка значительно превышает ранее сделанное предположение, что доля рассеиваемой энергии, переходящая из сердцевины ОВ в его оболочку имеет порядок  $10^{-4}$ . При выводе формулы (23) предполагалось, что распределение энергии в модовом пятне имеет приблизительно равномерный характер. Известные модели аппроксимации распределения энергии [5, 22] дают Гауссову функцию распределения (двумерное нормальное распределение). Тогда в площади  $W_d$  будет сосредоточена некоторая доля величины, данной формулой (23). В зависимости от коэффициента эксцесса [26] («островершинности») распределения эту долю можно оценить порядком от 1 % до 0,1 %. Тогда значение вероятности  $p = 10^{-4} \div 10^5$ , что вполне соответствует данным выше оценкам.

## 7. Численный эксперимент: моделирование эффекта дисперсии на соединениях

В формуле (18) для приращения ЭДИ фигурирует коэффициент  $\vartheta = q^N(1-q^N)$ , зависящий от количества соединений  $N$  и вероятности перераспределения энергии в точке соединения  $q = 1-p$ . Рассмотрим графики зависимости функции  $\vartheta$  от количества соединений  $N$  (рис. 6).

Анализ этих графиков показывает, что при любом значении  $N$  имеются ярко выраженные максимумы, соответствующие «наихудшему» варианту перераспределения энергии между сердцевиной и оболочкой ОВ. При  $N=1000$  пиковое значение соответствует вероятности  $p=10^{-3,16}$ . При  $N=100$  получен максимум для значения  $p=10^{-2,16}$ , а для значения  $N=10$ , соответственно,  $p=10^{-1,17}$ .

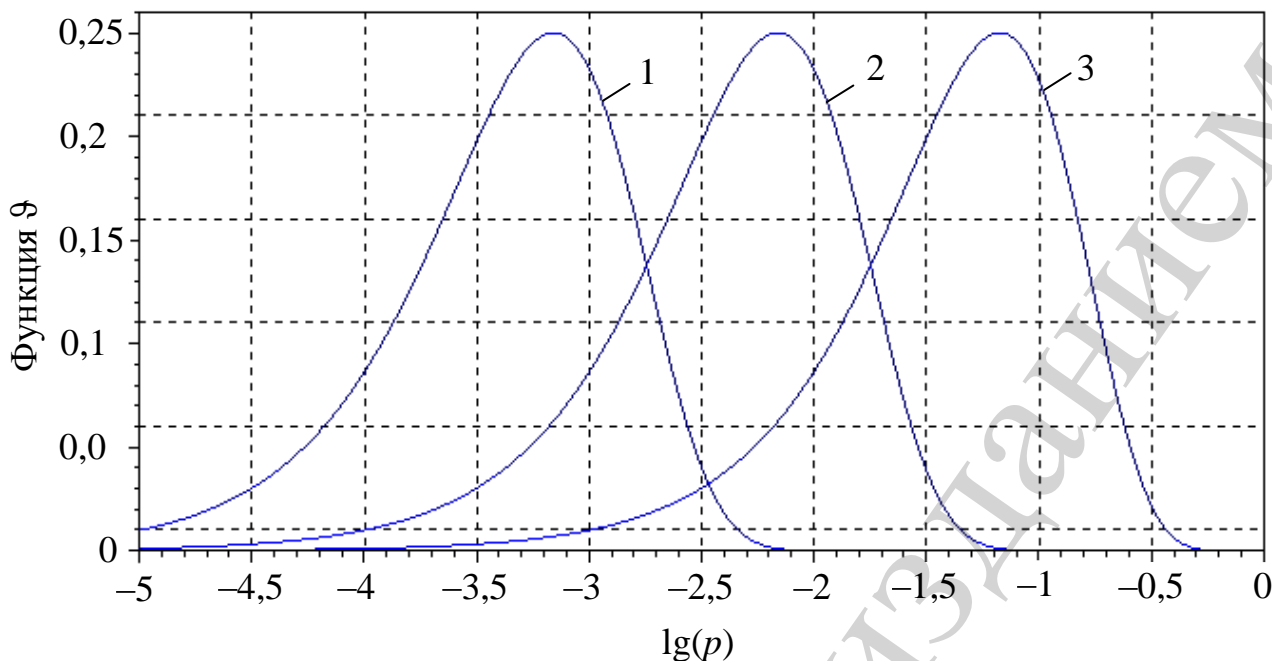


Рис. 6. Графики функции  $\Phi=q^N(1-q^N)$  для различных значений количества соединений  $N$ : 1 – при  $N=1000$ ; 2 – при  $N=100$ ; 3 – при  $N=10$

Формулы для эффективной длительностью импульса (18) и приращения РДИ (19) получены при некоторых упрощениях. Прямое численное моделирование оператора (7) требует задания в явном виде начальной формы оптических сигналов и параметров модели.

Для визуализации эффектов дисперсии на соединениях ОВ примем, что относительное опережение сигнала в оболочке по отношению к сердцевине имеет порядок  $\tau=10$  пс/км. В соответствии с формулой (1) в данном случае получается весьма заниженная разность групповых скоростей в сердцевине и оболочке ОВ – порядка  $\Delta V_{gr} \approx 0,4$  км/с. Но в данном случае ставим задачу качественного анализа явления. Положим, что линия на регенерационном участке имеет длину 200 км, а точки соединения оптических волокон размещены равномерно по этой длине с шагом 2 км. С целью визуализации эффекта дисперсии на соединениях вероятность перехода энергии из сердцевины в оболочку ОВ также будем существенно завышать.

В качестве тестового сигнала выбираем прямоугольный импульс с шириной 200 пс. При этом расчетная длительность импульса составит приблизительно 346,4 пс (рис. 7). Параметр РДИ не совпадает с длительностью финитного сигнала. Вместе с тем, данный параметр позволяет сравнивать различные по форме сигналы, в том числе имеющие теоретически бесконечные «хвосты».

Для визуализации эффекта дисперсии на соединениях оптических волокон в расчетах по рис. 7 положена значительная величина вероятности перехода энергии  $p=0,1$ .

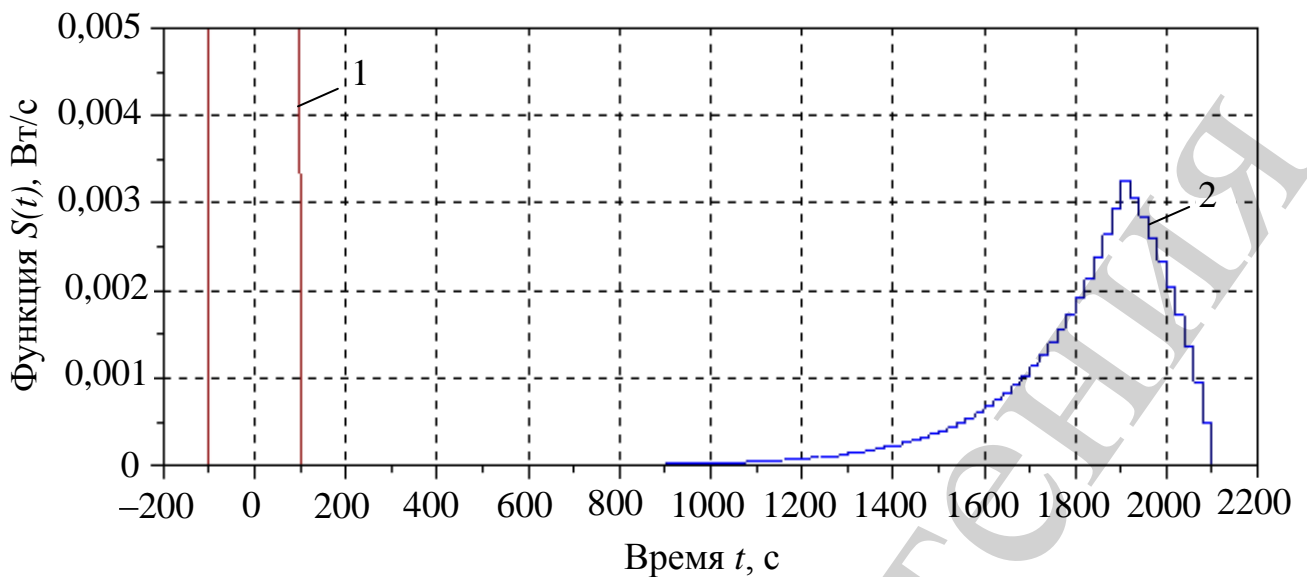


Рис. 7. Эффект дисперсии на соединениях ОВ для прямоугольного импульса:  
 1 – начальная форма ФРМ сигнала;  
 2 – форма ФРМ сигнала на расстоянии 200 км

Как видно из графиков рис. 7, энергетический центр сигнала на выходе ОВ значительно смещается в сторону опережения центра начального сигнала в сердцевине ОВ. При этом энергетический центр сигнала (16) смещается в точку  $\bar{t}_N \approx 1819,5$  пс, а РДИ (19) составляет 1189,7 пс. Иначе говоря, длительность сигнала в конечной фазе увеличивается приблизительно втрое по сравнению с его начальной длительностью.

В качестве альтернативного варианта рассмотрим эволюцию сигнала с функцией распределения мощности в форме гауссова импульса с той же единичной энергией и с тем же начальным значением РДИ (рис. 8). При этом  $\bar{t}_N \approx 1709,8$  пс, а расчетная длительность импульса в конечной фазе составляет 1189,4 пс. Промежуточный вывод заключается в том, что РДИ прямоугольного импульса и РДИ гауссова импульса на выходе оптического волокна в данном случае приблизительно равны.



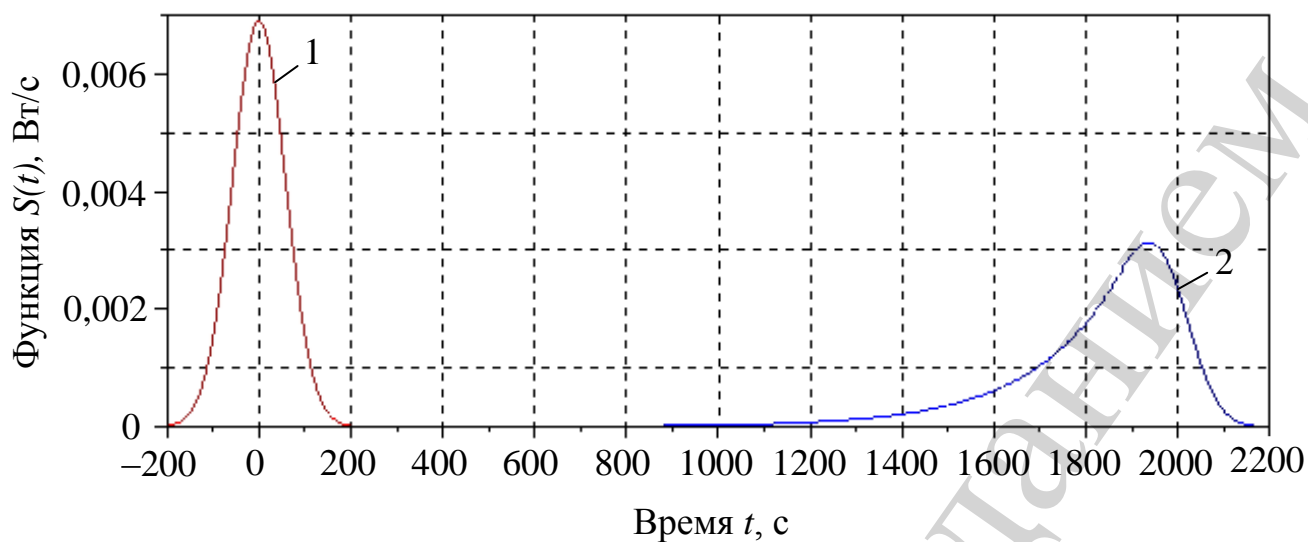
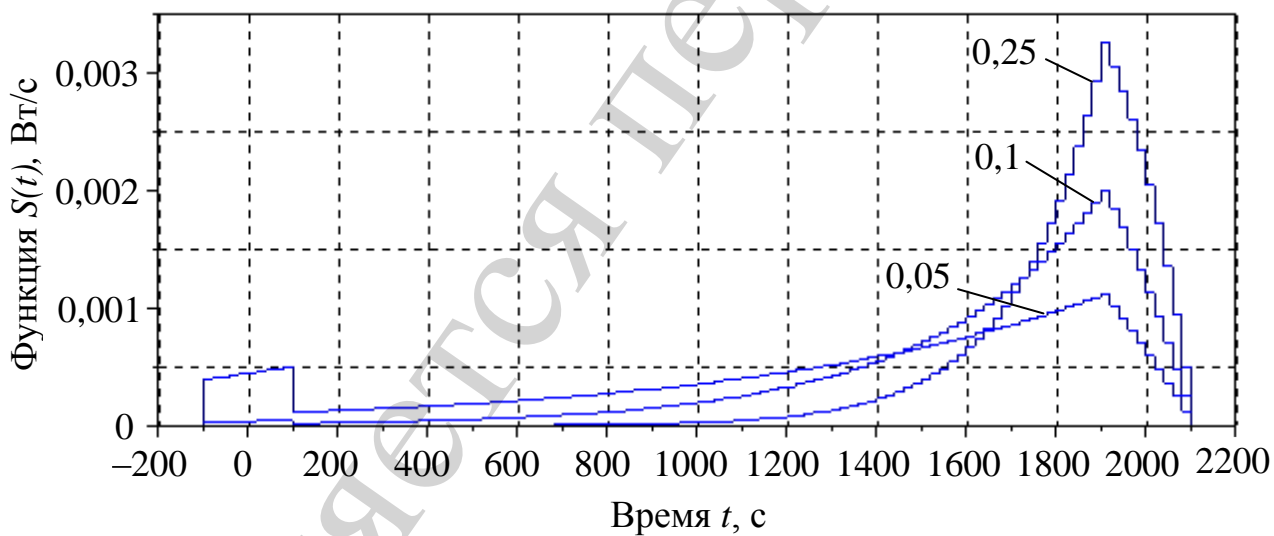


Рис. 8. Эффект дисперсии на соединениях ОВ для гауссова импульса:  
 1 – начальная форма ФРМ сигнала;  
 2 – форма ФРМ сигнала на расстоянии 200 км

Аналогичные результаты получаются для ряда значений вероятности  $p$  (рис. 9).



*a*

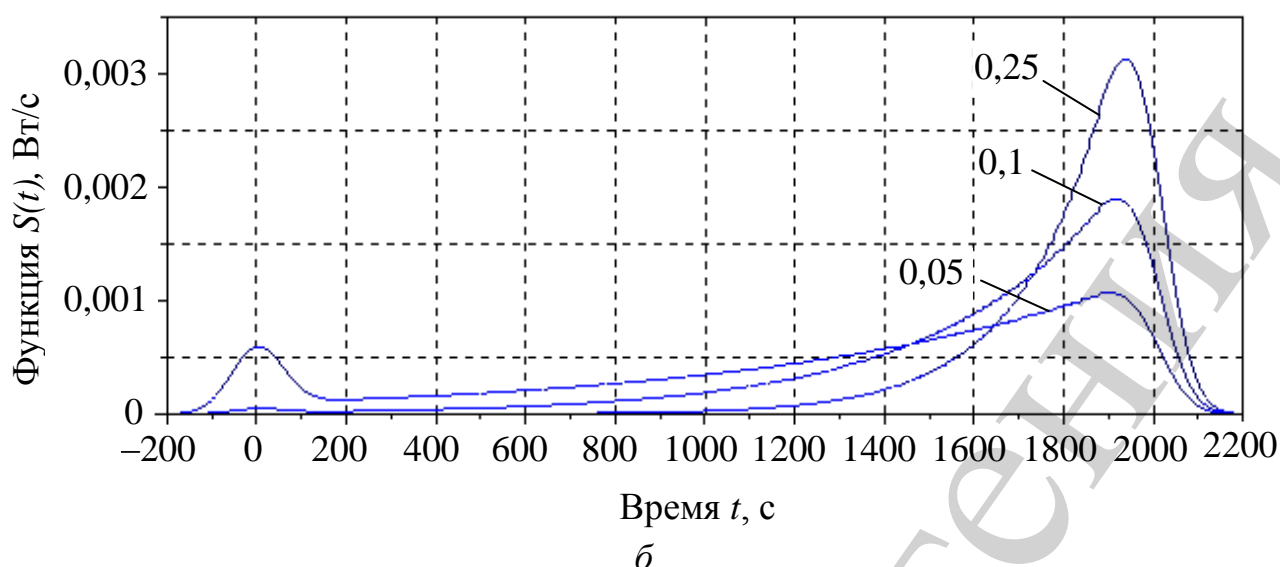


Рис. 9. Зависимость ФРМ в конечной фазе распространения сигнала для значений параметра  $p=0,1; 0,05; 0,25$ :  $a$  – для прямоугольного импульса;  $b$  – для гауссова импульса

Дополнительные расчеты дают оценки смещения энергетического центра сигнала и его конечного значения его РДИ для случаев, представленных на рис. 9 и в табл. 1.

Данные табл. 1 подтверждают закономерность наличия выраженного максимума функции по рис. 6. При значении вероятности  $p=10^{-2}$  имеет место максимум значения РДИ. В расчетах по рис. 6 при  $N=100$  получен близкий максимум для значения  $p=10^{-2,16}$ , что подтверждает корректность приближений по формулам (18) и (19).

Таблица 1

Значения параметров деформации оптических сигналов на расстоянии 200 км от точки ввода

$p$	Прямоугольный импульс		Гауссов импульс		$\delta$ РДИ, %
	$\bar{t}_N$ , пс	РДИ, пс	$\bar{t}_N$ , пс	РДИ, пс	
$10^{-1}$	1819,5	1189,7	1790,7	1189,4	0,03
$10^{-1,5}$	1411,7	3236,9	1189,9	3219,4	0,54
$10^{-2}$	744,2	4345,8	733,3	4327,6	0,42
$10^{-2,5}$	280,0	3376,6	284,1	3350,0	0,79
$10^{-3}$	97,2	2128,5	96,3	2114,9	0,64
$10^{-3,5}$	31,1	1260,0	31,1	1261,6	0,07
$10^{-4}$	9,6	776,1	9,9	771,3	0,62
$10^{-4,5}$	2,7	523,0	3,1	520,2	0,54
$10^{-5}$	0,5	410,7	1,0	408,9	0,44

Наиболее важное заключение по данным табл. 1 состоит в том, что относительная разница РДИ (правая колонка таблицы) импульсов существенно разной формы, но имеющих приблизительно одинаковую начальную длительность оказывается почти одинаковой на стороне приема. В самом деле, относительная разница ни в одном случае не превышает 1 %. Дополнительные расчеты для импульсов других форм подтверждают этот вывод.

Приведенные выше результаты численного моделирования в среде Scilab [27] выполнены для весьма условного с практической точки зрения случая, когда строительные длины предполагаются равными по всей трассе прокладки кабеля. На самом деле, в крупных населенных пунктах строительные длины обычно меньше, чем строительные длины за пределами населенных пунктов. Такая ситуация обусловлена как сложностью прокладки кабеля в кабельной канализации, так и коммерческими задачами операторов. Действительно, промежуточные разветвительные муфты устанавливаются точками пассивной коммутации для обеспечения передачи трафика к промежуточным узлам, корпоративным клиентам и т. п.

Численное моделирование позволяет установить зависимость между планами распределения строительных длин и РДИ оптических сигналов на стороне приема. Рассмотрим два альтернативных (также модельных) случая планирования распределения строительных длин на участке регенерации (рис. 10). В первом случае полагается, что первая строительная длина равна 500 м, вторая примерно  $500+30,3$  м, третья  $500+60,6$  м и т. д. с приращением очередной длины примерно 30,3 м. Последняя строительная длина равна приблизительно 3,5 км. Во втором случае план распределения строительных длин строится в обратном порядке: первая строительная длина равна примерно 3,5 км, а далее строительные длины уменьшаются с шагом около 30,3 м. В обоих случаях общее количество строительных длин равно 100, а общая длина линии регенерационного участка, как и в расчетах выше равна 200 км.

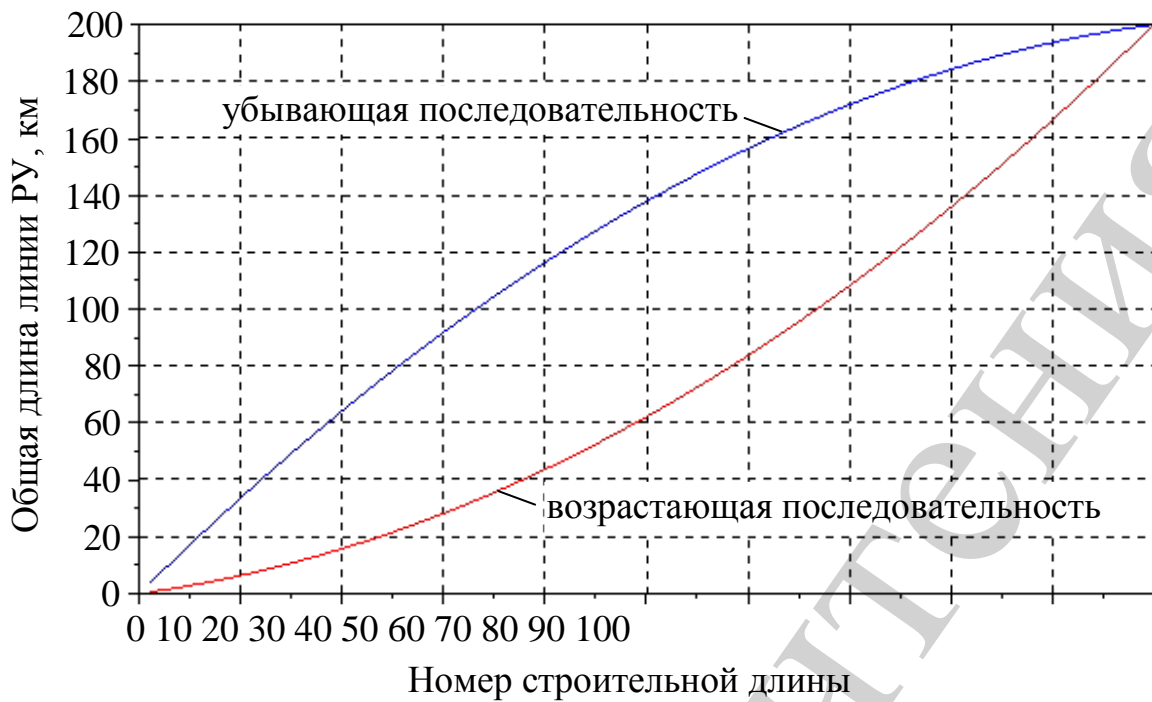


Рис. 10. Планы распределения строительных длин линии РУ

Результаты моделирования оператора (7) для гауссова импульса с ранее обозначенными параметрами и вероятностью  $p=10^{-2}$  для двух планов распределения строительных длин по рис. 10 даны на рис. 11. Как видим, два полученных графика оказались практически неразличимыми визуально. Расчетные значения РДИ в данном случае получились такими: для первого плана 4343,1 пс, для второго плана 4354,7 пс. Данные значения отличаются незначительно и приблизительно соответствуют значению РДИ 4327,6 пс для равномерного распределения строительных длин (табл. 1).

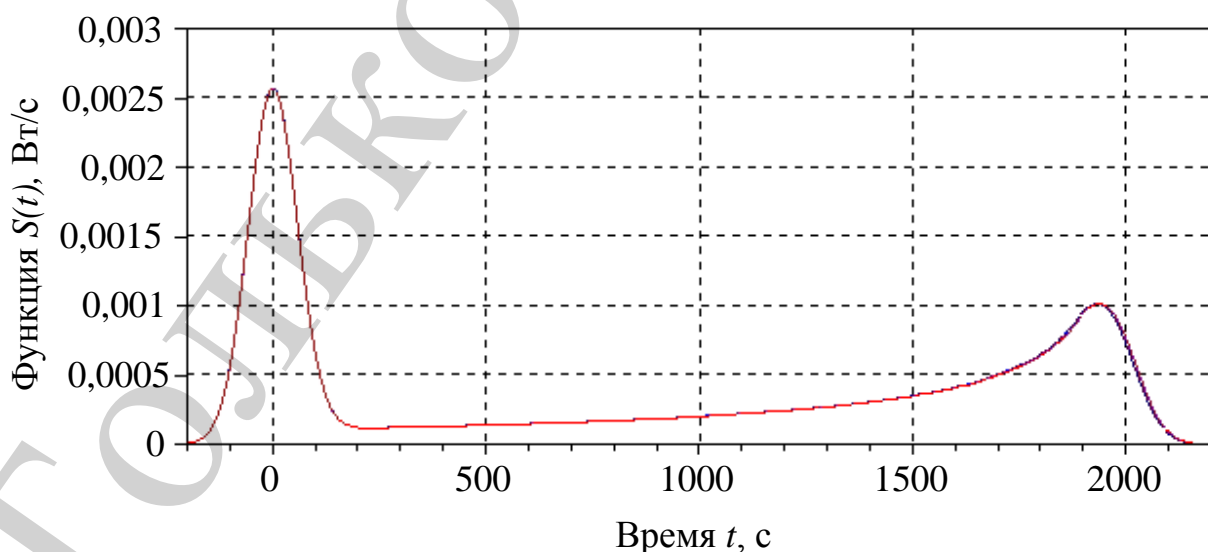


Рис. 11. Эволюция гауссова импульса на расстоянии 200 км при  $p=10^{-2}$  для планов распределения строительных длин по рис. 10

Данный результат, а также многочисленные дополнительные расчеты позволяют сделать несколько неожиданный, но весьма полезный вывод: эффект дисперсии на соединениях ОВ слабо зависит от распределения строительных длин вдоль линии регенерационного участка.

## 8. Метрологическая схема проверки результатов теоретических исследований

Сделанные выводы о независимости исследуемого эффекта от начальной формы оптического сигнала и плана распределения строительных длин позволяют предложить метрологическую схему для проведения натуральных экспериментов в лабораторных условиях (рис. 12).

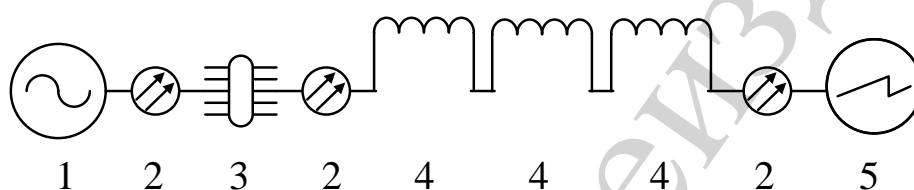


Рис. 12. Схема измерений для исследования эффекта дисперсии на соединениях оптических волокон: 1 – генератор (источник) оптического сигнала; 2 – оптические патчкорды; 3 – набор моделей «строительных длин»; 4 – фирменные катушки с оптическим волокном; 5 – измеритель дисперсии

Для фиксации слабо выраженных эффектов дисперсии на соединениях компоненты лабораторной установки по рис. 12 должны удовлетворять определенным требованиям. Генератор 1 должен формировать оптический сигнал на несущей частоте, соответствующей близкой к точке нулевой дисперсии для выбранного типа ОВ. Ширина полосы излучения должна быть при этом незначительной – порядка 100 ГГц (или около 0,5–1 нм в разных частотных диапазонах). Данные значения параметров позволяют минимизировать влияние на результаты экспериментов других составляющих дисперсии (материальной, волноводной, поляризационной). Патчкорды 2 отбираются из партии по критерию минимума затухания. При этом минимизируются геометрические эффекты, вносящие дополнительную составляющую дисперсии.

Принципиальным является узел 3 – модели «строительных» длин. Данный узел представляет собой набор отрезков ОВ с точками сварки. При этом первая линия – это просто отрезок ОВ длиной порядка 10 м. Вторая линия – два равных отрезка ОВ длиной 10 м каждый с одним сварным соединением между ними и т.д. Последняя линия представляет собой, таким образом,  $N+1$  соединенных отрезков ОВ длиной 10 м каждый с  $N$  точками сварки между ними. Каждая из этих линий завершается пигтейлами с разъемами, согласованными с разъемами патчкордов 2. При этом длина этих линий варьируется от 10 м (первая линия) до приблизительно 1 км (последняя линия, если положить  $N=100$ ).

Для моделирования общей длины линии регенерационного участка (порядка 100–300 км) используются стандартные катушки 4 с оптическим волокном. Например, стандартные катушки фирмы Corning содержат 63 км ОВ типа SMF-28e+ [28]. Таким образом, для выполнения исследований достаточно соединить 2–5 катушек.

Измеритель дисперсии 5 должен иметь возможность реализации метода прямого измерения, т. е. измерения дисперсии путем сравнения длительности входного и выходного оптического сигнала.

## **9. Обсуждение результатов моделирования эффекта дисперсии на соединениях**

Выполненные аналитические и численные исследования позволяют сделать главный вывод: разъемные и неразъемные соединения ОВ вносят дополнительный вклад в увеличение длительности оптического сигнала на стороне приема. Данный эффект обусловлен перераспределением энергии между сердцевиной и оболочкой ОВ в точках соединения и различием групповых скоростей в этих средах.

Данный эффект при большом количестве соединений может быть сравним по своему вкладу с изученными эффектами материальной, поляризационной и пр. составляющими дисперсии.

Предложенная схема лабораторной установки позволяет выполнять натурные исследования предполагаемых эффектов в лабораторных условиях вследствие своей компактности.

Выполненные расчеты и неформальный анализ позволяют дать достаточно простые и частью очевидные рекомендации по уменьшению эффекта дисперсии на соединениях при проектировании и монтаже оптических линий. Естественно, количество соединений надо по возможности минимизировать. Сварочные аппараты должны обеспечивать тепловой режим, исключая диффузию материалов сердцевины и оболочки ОВ. При этом собственно сварке подвергаются только поверхностные слои (покрытие с частичным захватом материала оболочки). Для уменьшения геометрических эффектов должны предъявляться повышенные требования к скалывателям волокна, а разъемы оптических патчкордов и пигтейлов должны снабжаться собирающими линзами.

Определенным недостатком данной работы является отсутствие результатов прямого эксперимента для проверки выдвинутой научной гипотезы. В случае ее метрологического подтверждения целесообразно внести соответствующие коррективы в методики расчета длины регенерационного участка.

## **10. Выводы**

1. Синтезированные математические модели в форме вероятностной схемы позволили выполнить анализ явления перераспределения энергии сигнала между сердцевиной и оболочкой ОВ.

2. Анализ синтезированных моделей преобразований в группе точек соединения позволил сделать важный вывод об отсутствии существенного влияния плана распределения строительных длин на длительность сигнала на сто-

роне приема. Этот вывод позволил предложить метрологическую схему для проверки выдвигаемых гипотез в лабораторных условиях.

3. Полученные на основе анализа аналитических моделей и численного эксперимента количественные оценки позволяют предположить, что в ряде случаев дисперсионные эффекты на соединениях ОВ могут быть сравнимыми по порядку с хроматической дисперсией.

### Литература

1. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация: монография / Иоргачев Д. В., Бондаренко О. В., Дашенко А. Ф., Усов А. В. Одесса, 2000. 536 с.
2. Макаров Т. В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи: учеб. Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2009. 220 с.
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
4. Гауэр Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.
5. Ratuszek M., Ratuszek M. J., Hejna J. The study of thermal connecting of telecommunication optical fibers (SiO<sub>2</sub>: GeO<sub>2</sub>) and EDF (SiO<sub>2</sub>: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Er) fibers // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013. Vol. 61, Issue 1. P. 279–286. doi: <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0026>
6. Tomita S. Development and Future of Optical Fiber Related Technologies // *IEICE Transactions on Communications*. 2017. Vol. E100.B, Issue 9. P. 1688–1695. doi: <https://doi.org/10.1587/transcom.2016pfi0003>
7. Single-mode fiber refractive index sensor with large lateral offset fusion splicing between two abrupt tapers / Zhang Q., Zhou J., Chen J., Tan X. // *Optical Engineering*. 2012. Vol. 51, Issue 9. P. 090502-1–090502-3. doi: <https://doi.org/10.1117/1.oe.51.9.090502>
8. Hu Q., Li C. The New Tapered Fiber Connector and the Test of Its Error Rate and Coupling Characteristics // *International Journal of Optics*. 2017. Vol. 2017. P. 1–7. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/2742709>
9. Simultaneous Strain and Temperature Sensor Based on a Fiber Mach-Zehnder Interferometer Coated with Pt by Iron Sputtering Technology / Dong X., Du H., Sun X., Duan J. // *Materials*. 2018. Vol. 11, Issue 9. P. 1535. doi: <https://doi.org/10.3390/ma11091535>
10. Simultaneous measurement of one dimensional bending and temperature based on Mach-Zehnder interferometer / Yu Y., Zhang Y., Ou Z., Chen X., Huang Q., Ruan S. // *Photonic Sensors*. 2015. Vol. 5, Issue 4. P. 376–384. doi: <https://doi.org/10.1007/s13320-015-0264-x>
11. ITU-T Recommendation L. 12. Optical fibre splices. ITU-T Study Group 6, 2008. 15 p.
12. Одегов Н. А. Основы теории аппроксимации оптических сигналов гауссовыми импульсами // *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. № 5. С. 42–72.

13. Yasser H. A., Shnan N. S. Pulse Propagation in Presence of Polarization Mode Dispersion and Chromatic Dispersion in Single Mode Fibers // *International Journal of Optics*. 2013. P. 1–7. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/345154>
14. Magnetic Field Sensing Based on Magnetic-Fluid-Clad Multimode-Singlemode-Multimode Fiber Structures / Tang J., Pu S., Dong S., Luo L. // *Sensors*. 2014. Vol. 14, Issue 10. P. 19086–19094. doi: <https://doi.org/10.3390/s141019086>
15. A Core-Offset Mach Zehnder Interferometer Based on A Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber and Its Torsion Sensing Application / Huerta-Mascotte E., Sierra-Hernandez J., Mata-Chavez R., Jauregui-Vazquez D., Castillo-Guzman A., Estudillo-Ayala J. et. al. // *Sensors*. 2016. Vol. 16, Issue 6. P. 856. doi: <https://doi.org/10.3390/s16060856>
16. Refractive index and temperature-sensing characteristics of a cladding-etched thin core fiber interferometer / Wang W., Dong X., Chu D., Hu Y., Sun X., Duan J.-A. // *AIP Advances*. 2018. Vol. 8, Issue 5. P. 055104. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5021409>
17. Addanki S., Amiri I. S., Yupapin P. Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers // *Results in Physics*. 2018. Vol. 10. P. 743–750. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.07.028>
18. Dispersion Compensating Fibers with Improved Splicing Performance / Cao B., Yu H., Wu Y., Zhang L. // *Physics Procedia*. 2013. Vol. 48. P. 96–101. doi: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.07.016>
19. Hooda B., Rastogi V. Segmented-core single mode optical fiber with ultra-large-effective-area, low dispersion slope and flattened dispersion for DWDM optical communication systems // *Progress In Electromagnetics Research B*. 2013. Vol. 51. P. 157–175. doi: <https://doi.org/10.2528/pierb13032206>
20. Методика синтеза моделей зависимостей дисперсионных характеристик от частоты и состава оптического волокна / Одегов Н. А., Грушенко А. А., Костюк В. В., Резник Р. С. // *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*. 2018. № 1. С. 68–76. doi: <https://doi.org/10.33243/2518-7139-2018-1-1-68-76>
21. Odegov N. A., Staren'kyu I. V., Kostjuk V. V. Formation the picosecond optical pulses of the assigned structure using precision lines of delay // *Proceedings of the O. S. Popov ONAT*. 2018. Issue 1. P. 34–43. doi: <https://doi.org/10.33243/2518-7139-2018-1-1-34-43>
22. Ratuszek M., Zakrzewski Z., Majewski J. Reflectometric measurements of thermally expanded core area // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2010. Vol. 58, Issue 4. P. 513–517. doi: <https://doi.org/10.2478/v10175-010-0051-1>
23. Duke D., Mansperger D. Understanding how the appearance of optical fiber splices relates to splice quality // *2017 BICSI Fall Conference & Exhibition*. 2017. URL: [https://www.bicsi.org/docs/default-source/conference-presentations/2017-fall/understanding-how-the-appearance.pdf?sfvrsn=db47da1f\\_2](https://www.bicsi.org/docs/default-source/conference-presentations/2017-fall/understanding-how-the-appearance.pdf?sfvrsn=db47da1f_2)
24. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. М.: Советское радио, 1970. 376 с.
25. Ширяев А. Н. Вероятность. М.: Наука, 1980. 576 с.



26. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. М.: Высшая школа, 1999. 575 с.

27. Scilab. Open source software for numerical computation. URL: <https://www.scilab.org/>

28. Оптическое волокно Corning SMF-28e+. Описание изделия. URL: [https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1463\\_7-14rus.pdf](https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1463_7-14rus.pdf)

Не является переизданием