

**ПОПУТНЫЙ ПОТОК В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ  
С СИСТЕМАТИЧЕСКИМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ**

**WAKE IN A FIBER-OPTIC TRANSMISSION LINE  
WITH SYSTEMATIC HETEROGENEITIES**

**Аннотация.** Получены выражения для определения попутного потока (ПП) в волоконно-оптической линии передачи, обусловленного отражениями от стыковых неоднородностей, с учетом уменьшения амплитуд мод за счет отражения, и произведен анализ ПП на длине эквивалентного кабельного участка в зависимости от числа неоднородностей.

**Summary.** The expressions for definition of a wake (DF) in fiber-optical transmission line, stipulated by reflectances from butt heterogeneities, with allowance for reduction of voltages of modes are obtained at the expense of reflectance, and the analysis (DF) on the length of the equivalent cable section is made depending on the number of heterogeneities.

Важной проблемой повышения эффективности волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) является увеличение длины участка регенерации (УР), которая зависит, в первую очередь, от параметров передачи оптического волокна (ОВ): потерь энергии и дисперсии сигнала [1, 2, 3].

К уменьшению длины УР в значительной степени могут привести различного рода неоднородности [4], имеющиеся как внутри строительных длин (СД) оптического кабеля (ОК), так и в местах их соединения.

Характерным типом, так называемых, внутренних неоднородностей являются микро- и макроизгибы, влияние которых на параметры передачи ОВ исследовалось, например, в [5] и другой литературе. Стыковые неоднородности приводят к образованию встречного потока (ВП) и попутного потока (ПП), в значительной степени влияющих на величину защищенности сигнала и длину УР.

Для уменьшения воздействия на передаваемый и принимаемый сигналы ВП и ПП в ВОЛП обычно применяют оптические изоляторы (ОИ).

Влияние ВП и ПП на системы рассматривалось в [6,7] и другой литературе. Было проведено исследование защищенности в зависимости от величины самих неоднородностей и длины УР. Показано, что ОИ вносят достаточно большое затухание в передаваемый сигнал [7]. Наличие двух ОВ может привести к сокращению длины УР на 10...15 км.

Однако, влияние стыковых неоднородностей на условия распространения оптических сигналов в ОВ исследовано недостаточно.

В работе [7], например, при исследовании защищенности от ПП принимаемого сигнала в аналоговых и цифровых волоконно-оптических системах передачи не учитывалось уменьшение амплитуды мод в процессе их распространения по ОВ за счет отражения части мощности от неоднородности, что может привести к существенным погрешностям в полученных результатах.

В этой связи исследование влияния на принимаемый сигнал с учетом потерь на стыковых неоднородностях представляет важную как с теоретической, так и практической точек зрения, задачу.

Целью данной работы являются получение более точных соотношений для расчета ПП и исследование его влияния на принимаемый сигнал с учетом потерь при стыках СД ОК на эквивалентном кабельном участке (ЭКУ) в зависимости от его длины.

Рассмотрим картину образования ПП на длине ЭКУ с  $m$  стыковыми неоднородностями (рис.1) и получим выражение, определяющее ПП, образованный волнами, отраженными от  $m$  неоднородностей на стыках строительных длин ОК, а также от неоднородностей в местах соединения «передатчик – ОВ» и «приемник – ОВ».

В общем случае ПП образуется в результате двух – четырех и более кратного (четного) числа отражений от неоднородностей распространяющейся волны.

Будем учитывать только волны ПП, образованные двукратным отражением от неоднородностей, а отражениями высших порядков будем пренебрегать, что является вполне оправданным. Как показатели результата анализа, при таком допущении погрешность расчетов составит менее 0,1%.

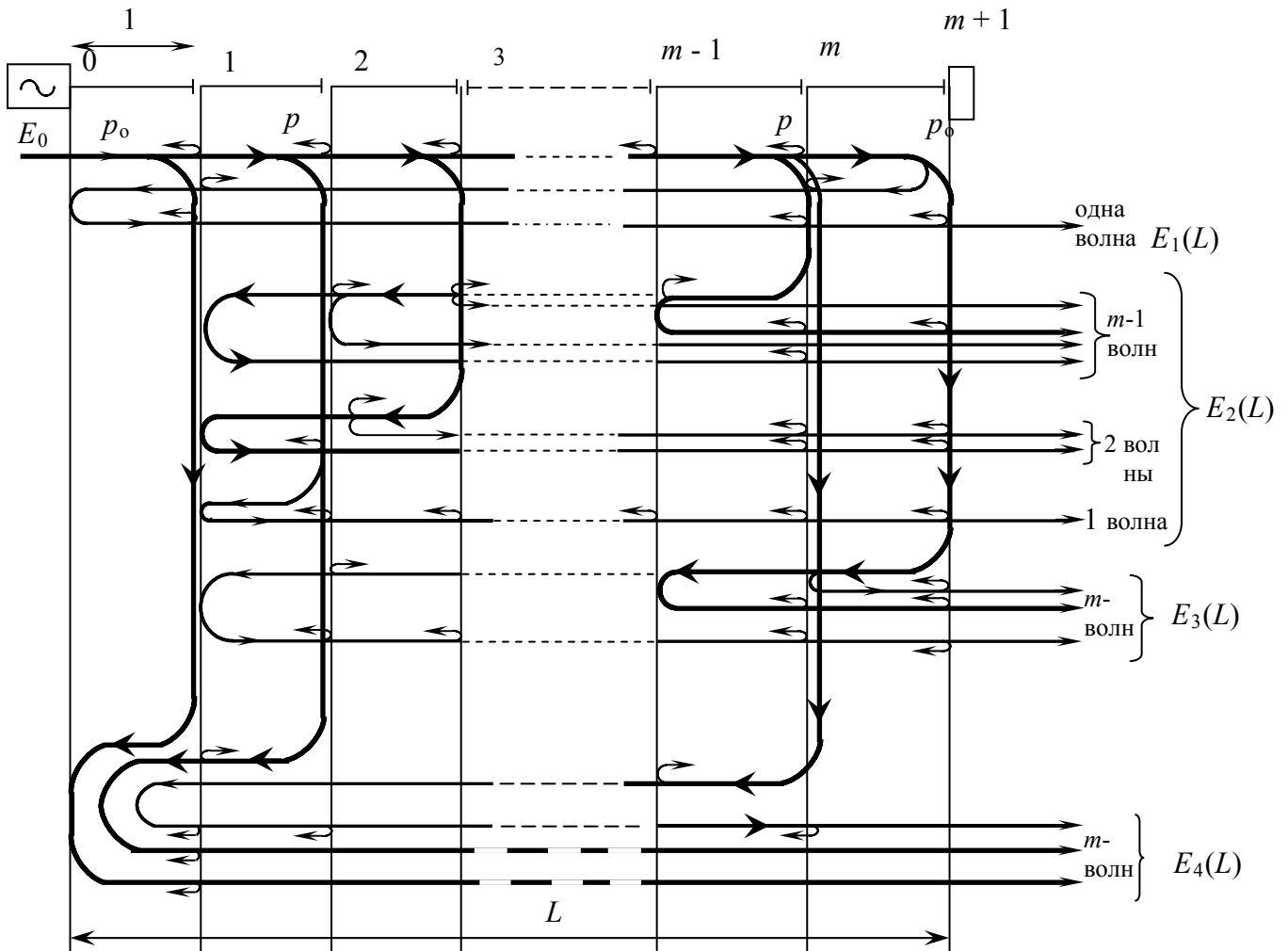


Рисунок 1 – Схема образования ПП

Не теряя общности рассуждений, предположим, что все строительные длины ОК есть равными: с длиной  $l$ , а также равными коэффициенты отражения  $p$  от всех  $m$  неоднородностей. Кроме того, коэффициенты отражения «передатчик – ОВ» и «ОВ – приемник» также одинаковы и равны  $p_0$ .

Итак, на приемный конец ЭКУ длиной  $L$ , содержащего  $m$  строительных длин, поступят четыре группы ПП, каждая из которых состоит из различного числа парциальных волн (от одной ... до  $m$ ) с нормированной амплитудой  $E(L)$ :

– первая, с нормированной амплитудой  $E_1(L)$ , представляющая одну волну, первично отраженную от неоднородности «ОВ – приемник» и вторично- от «передатчик – ОВ»;

– вторая группа парциальных волн с суммарной амплитудой ПП  $E_2(L)$  образованная парциальными волнами, в результате первичного отражения от  $i$ -х стыковых неоднородностей, (от  $m$ -й до 2-й) и вторичного отражения от «К-х», предстоящих  $i$ -й (от  $m - 1$  до 1-й);

– третья группа парциальных волн с суммарной амплитудой ПП  $E_3(L)$  образованная в результате первичного отражения волн от конца ЭКУ («ОВ – преемник») и вторичного – от  $m$  стыков, начиная с  $m$ - го до 1-го;

– четвертая группа парциальных волн, образующих ПП с суммарной амплитудой  $E_4(L)$  образована в результате первичного отражения от  $m$  стыков (с 1-го по  $m$ -й) и вторичного – от начала ЭКУ («передатчик – ОВ»).

Если обозначить нормированную амплитуду напряженности электрического поля оптической волны в начале ЭКУ  $E_0$ , то ПП, образованный волной первого типа  $E_1(L)$ , определяется соотношением:

$$E_1(L) = p_0^2 E_0 e^{-3\alpha L} (1-p)^{3m}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания ОВ.

Напряженность поля ПП, образованного второй группой парциальных волн  $E_2(L)$ , которая состоит из  $(m - 1)$  подгрупп, определится из выражения:

$$E_2(L) = p^2 E_0 e^{-\alpha L} (1 - p)^m \left[ \sum_{i=m}^2 \sum_{k=(i-1)}^1 e^{-4\alpha(i-k)\ell} (1 - p)^{4\alpha(i-k-1)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

При этом первая подгруппа второй группы образованна  $m$  парциальными волнами, вторая подгруппа содержит  $(m - 1)$  парциальную волну и, наконец  $(m - 1)$ -я представляет одну волну ПП, образованную в результате отражения от 2-й и 1-й неоднородностей соответственно.

Третья группа содержит  $m$  парциальных волн, суммарная амплитуда которых  $E_3(L)$  определяется из выражения:

$$E_3(L) = p \cdot p_0 \cdot E_0 e^{-\alpha L} (1 - p)^m \left[ \sum_{i=m}^1 e^{-4\alpha\ell(m-i)} (1 - p)^{4(m-i)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Четвертая группа, образована также  $m$  парциальными волнами, суммарная напряженность  $E_4(L)$  которой определится выражением:

$$E_4(L) = p \cdot p_0 \cdot E_0 e^{-\alpha L} (1 - p)^m \left[ \sum_{i=m}^1 e^{-4\alpha\ell(-i+1)} (1 - p)^{4(m-i)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Из анализа соотношений (3, 4) нетрудно видеть, что  $E_3(L) = E_4(L)$ .

Сумма напряженностей всех четырех групп, образующих ПП определится тогда соотношением:

$$E_{\Sigma}(L) = [E_1^2(L) + E_2^2(L) + 2E_3^2(L)]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

После подстановки в (5) соотношений (1...4) и несложных преобразований получили:

$$E_{\Sigma}(L) = E_0 e^{-\alpha L} (1 - p)^m \times \left[ p_0^4 \cdot e^{-4\alpha L} (1 - p)^{4m} + e^{-4\alpha L} p^4 \sum_{i=2}^m \frac{1 - e^{-4(i-1)\alpha\ell} (1 - p)^{4(i-1)}}{1 - e^{-4\alpha\ell} (1 - p)^4} + 2p_0^2 p^2 e^{-4\alpha L} \cdot \frac{1 - e^{-4\alpha m\ell} (1 - p)^{4m}}{1 - e^{-4\alpha\ell} (1 - p)^4} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Для случая, когда  $p = p_0$  выражения (6) упростится и примет вид:

$$E_{\Sigma}(L) = E_0 e^{\alpha L} p^2 (1 - p)^m e^{-2\alpha L} \left[ e^{-4\alpha\ell m} (1 - p)^{6m} + \sum_{i=1}^{m+1} \frac{1 - e^{-4i\alpha\ell} (1 - p)^{4m}}{1 - e^{-4\alpha\ell} (1 - p)^4} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Величина ПП ( $Q$ ), равная  $\frac{E_{\Sigma}(L)}{E_0 e^{-\alpha L} (1 - p)^m}$ , определится из выражения (6) соотношением:

$$Q = \left[ p_0^4 e^{-4\alpha L} (1 - p)^{6m} + p^4 e^{-4\alpha L} \sum_{i=2}^m \frac{1 - e^{-4(i-1)\alpha\ell} (1 - p)^{4(i-1)}}{1 - e^{-4\alpha\ell} (1 - p)^4} + 2p_0^2 p^2 e^{-4\alpha L} \cdot \frac{1 - e^{-4\alpha m\ell} (1 - p)^{4m}}{1 - e^{-4\alpha\ell} (1 - p)^4} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Таким образом, величина ПП оказывается пропорциональной четвертой степени коэффициентов отражения и представляет сумму ПП образованных за счет отражения от передатчика и приемника. Первое слагаемое в выражении (8) учитывает первую волну, отраженную от «Пер» – «Пр» и волны, отраженные от неоднородностей «ОВ» – «ОВ» – второе слагаемое и «Пер» – «ОВ», «ОВ» – «Пр» – третье слагаемое.

При этом, как правило, первое слагаемое в (8) существенно меньше второго.

Произведем расчет ПП ( $Q$ ) и защищенности сигнала  $A_3$  от ПП для различных длин ЭКУ (от 40 до 100) км. При этом строительная длина ОК ( $\ell$ ) равна 5 км. Коэффициент затухания ОВ  $\alpha$  равен 0,2 дБ/км, что составляет 0,023 Нп/км. Коэффициенты отражения  $p$  и  $p_0$  приняты равными 0,034 (0,023), 0,0032 (0,056) соответственно. Результаты расчета приведены в табл. 1 и для наглядности представлены на графиках (рис. 2). Кривая 2 соответствует коэффициентам отражения  $p$  и  $p_0$  равным 0,023 и 0,056, а кривая 4 – коэффициентам отражения  $p, p_0$ , равным, соответственно, 0,034 и 0,0032.

Таблиця 1

$A_3$	$Q$	$\frac{L_{км}}{P/P_0}$	40	50	60	70	100
Q	$P = 0,034$		3,01	3,58	4,07	4,5	5,6
A (дБ)	$P_0 = 0,0032$		5,05	49,0	47,8	47,0	45
Q	$P = 0,023$		2,61	2,77	2,92	3,06	3,44
A (дБ)	$P_0 = 0,056$		51,7	51,2	50,7	50,3	49,3

Для сравнения на графиках рис. 2 приведены зависимости  $A_3(L)$  для тех же значений  $p$  и  $p_0$ , рассчитанные без учета уменьшения напряженности поля волн, за счет отражений от неоднородностей (кривые 1,3)

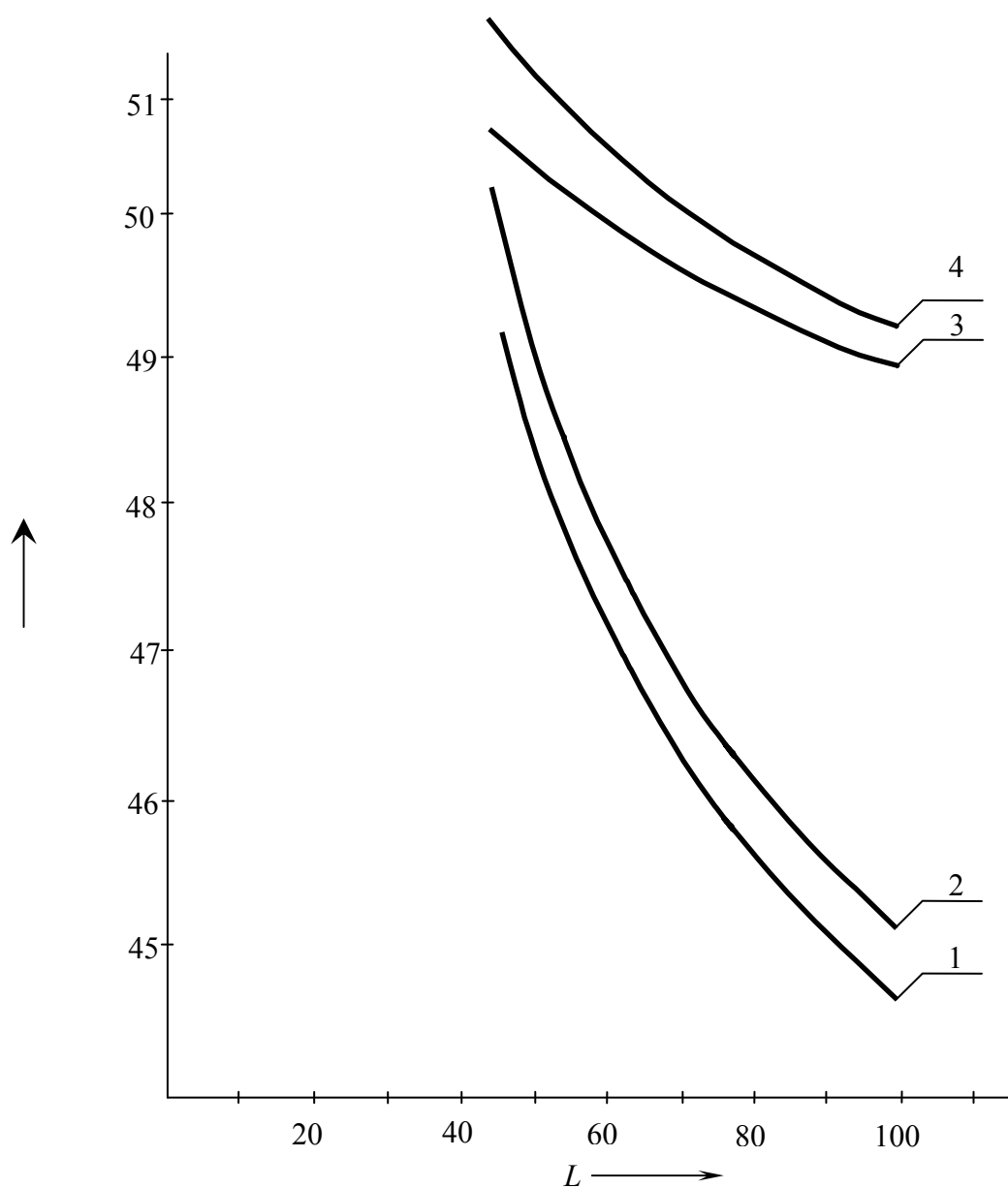


Рисунок 2 – Зависимость защищенности от длины ЭКУ

Из графиков (рис. 2), следует, что разница между защищенностями сигнала от ПП (с учетом потерь на стыках) и без учета таковых лежит в пределах от 0,8 дБ (при  $L = 40$  км) до 0,5 дБ (при  $L = 100$  км), что составляет погрешности 1,5%, 1% соответственно (для второго и первого варианта).

Таким образом, если не учитывать потери, обусловленные отражениями от стыков, результаты расчета защищенности сигнала от ПП будут занижены по сравнению с реальными на 1...2%. Причем, погрешность расчета возрастает с уменьшением длины ЭКУ.

Кроме того, защищенность от ПП, полученная на основе результатов данной работы оказывается выше, чем в работе [7] на величину от 15% до 30% при  $L$ , равных соответственно 40 км и 100 км. В данном случае зависимость  $A_3$  от длины ЭКУ выражена в меньшей степени, чем приведенная в работе [7]. Такое весьма существенное расхождение результатов расчета защищенностей объясняется тем, что в [7] суммарная напряженность поля ПП определялась как результат арифметического суммирования напряженностей парциальных волн, что является не совсем корректным, а в данной работе такое суммирование произведено по квадратичному закону.

Полученные здесь выражения для расчета ПП и защищенности  $A_3$  и проведенные ее исследования позволяют использовать результаты анализа при проектировании ВОСП и определения целесообразности использования оптических изоляторов (вентилей) и их числа, а также они могут быть использованы в учебном процессе при выполнении дипломных и курсовых проектов.

На основании проведенного анализа зависимости величины ПП и защищенности от длины ЭКУ, а также величины неоднородностей можно наряду с выводами, содержащимися в [2], сделать следующие:

- влияние ПП на принимаемый сигнал проявляется в меньшей степени, чем влияние ВП на передаваемый сигнал;
- при расчетах ПП целесообразно учитывать потери, обусловленные отражениями от неоднородностей;
- в проведенных в последующем исследованиях будет показано, что размещение вентиля в конце ЭКУ может привести к весьма заметному уменьшению защищенности от ПП. Однако этот вопрос требует отдельного самостоятельного изучения.

Предметом дальнейших исследований будет анализ защищенности от ПП при цифровой передаче сигнала, а также ПП, обусловленных преобразованием волн в анизотропных ВОСП.

### **Литература**

1. *Иванов А.Б.* Волоконная оптика. – М. SYRUS SYSTEMS, 1999. – 671 с.
2. *Потери на неоднородностях оптических кабелей / Н.Н. Одинцов, Д.В. Иоргачев, О.В. Бондаренко, А.П. Заяц // Фотоэлектроника. – 2002. – Вып. 11. – С. 61-64.*
3. *Питерских С.Э.* Влияние технологических процессов производства на свойства ОВ, определяющие потери в сварных соединениях // *Электросвязь – 2003. – № 2. – С. 27-30.*
4. *Требования к оптическим соединителям / Л.Л. Плошай, В.И. Смирнов, В.П. Филимонов, В.Г. Чертов // Электросвязь. – 1980. – № 12. – С. 38-39.*
5. *Каток В.Б., Руденко І. Е.* Аналіз втрат, що виникають у процесі монтажу оптичних кабелів зв'язку // *Зв'язок. – 1996. – № 2. – С. 35-38.*
6. *Одинцов Н.Н., Заяц А.П., Карлусь С.А.* Встречный поток в волоконно-оптической линии связи с неоднородностями // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2000. – № 2. – С. 54-57.*
7. *Чернов В.О.* Защищенность от попутного потока в волоконно-оптических системах передачи // *Электросвязь. – 2003. – № 2. – С. 30-32.*