

**ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА НА ДЛИНУ  
РЕГЕНЕРАЦИОННОЙ СЕКЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ**

**INFLUENCE OF DISPERSING SIGNAL ALTERATIONS ON LENGTH  
OF RECLAIMING SECTION OF FIBER-OPTICAL SYSTEMS OF TRANSMISSION**

**Аннотация.** Анализируется влияние величины дисперсионных искажений волоконно – оптического кабеля на шумовые характеристики волоконно-оптических систем передачи, которое учитывается при расчёте длины регенерационной секции.

**Summary.** It is analyzed influence of the value of dispersing distortions fiber – an optical cable on noise characteristics fiber – optical systems of transmission which is considered at calculation of length re-generation sections.

**Проблема** повышения эффективности функционирования транспортных участков телекоммуникационной сети решается сегодня многими операторами за счёт использования волоконно-оптических линий передачи, причём упор делается на технологию многоканальных ВОСП – WDM [1].

Для «старых» операторов, таких как Укртелеком, имеющих уже сложившуюся, разветвленную сеть, внедрение WDM логично осуществлять путём замены существующих одноканальных ВОСП – SDH, работающих на волоконно-оптическом кабеле (ВОК) типа SF (рекомендация G.652), путем перехода со 2-го в 3-е окно прозрачности оптического волокна (ОВ). При этом затрудняется задача высокоскоростной передачи цифровых сигналов по оптическим каналам вводимой ВОСП – WDM, так как в этом (3-м) окне прозрачности увеличивается значение дисперсии  $\sigma$  и при изменении уровня сигнала появляются нелинейные искажения.

Нелинейные искажения ограничивают допустимое количество оптических каналов, дисперсия  $\sigma$  ограничивает скорость передачи цифровых потоков по этим оптическим каналам, а их совместное действие – длину участка регенерации  $l_p$ , которая является важнейшей характеристикой цифровых систем передачи.

В [2, 3] и других многочисленных работах рассматриваются причины возникновения дисперсии оптического сигнала и влияние этой дисперсии на расширение длительности принимаемого импульсного сигнала, но не приводятся численные оценки этого расширения на помехоустойчивость.

Влияние дисперсионных искажений в ВОСП, аналогично влиянию неравномерности частотных характеристик тракта передачи на импульсный сигнал ЦСП. При определении длины участка регенерации  $l_p$  ЦСП металлического кабеля [4] линейные искажения сигнала не учитываются, так как в регенераторах этих ЦСП они компенсируются соответствующими корректирующими устройствами.

Коррекция дисперсионных искажений, вносимых ОВ волоконно-оптического кабеля, аппаратными средствами (т.е. устройствами схем усилителей и корректоров) в настоящее время практически не используется и поэтому при расчёте длины  $l_p$  ВОСП влияние этих искажений должно быть учтено.

В цифровых ВОСП расчет регенерационной секции  $l_p$  осуществляется по двум независимым критериям:

– шумовым характеристикам с учётом потерь сигнала в ОВ (соответствующую длину участка регенерации будем обозначать  $-l_{p,\alpha}$ );

– дисперсионным искажениям принимаемого сигнала (соответствующая длина участка регенерации  $-l_{p,\sigma}$ ).

В результате выбирается худший (меньший по длине) вариант расчёта.

Однако не рассматривается возможность увеличения  $l_{p,\sigma}$  за счет увеличения, в допустимых пределах, межсимвольных искажений вызванных дисперсией.

**Целью статьи** является анализ влияния величины дисперсионных искажений волоконно-оптического кабеля на шумовые характеристики волоконно-оптических систем передачи, позволяющий определить возможность и условия увеличения расчётной длины участка регенерации по дисперсии  $l_{p,\sigma}$ .

Известно [4], что длина участка регенерации цифровой системы передачи определяется по шумовым характеристикам тракта из уравнения защищённости ожидаемой  $A_{зож}(l)$  и допустимой  $A_{здоп}(l)$ . Ожидаемая защищённость определяется потерями сигнала и зависит поэтому от длины  $l$ , а допустимая защищённость определяется допустимой вероятностью ошибки. Решение этого уравнения применительно к регенерационной секции ВОСП даёт следующее выражение длины этой секции [3, 5]:

$$l_{pa} = \frac{\text{ЭП} - 2A_{pc} - A_{БЗ}}{\alpha + \frac{A_{nc}}{l_{стр}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания кабеля;  $l_{стр}$  – строительная длина кабеля;  $A_{pc}$  и  $A_{nc}$  – соответственно затухания вносимые разъёмным и неразъёмными соединениями;  $A_{БЗ}$  – бюджет защищённости.

При обычных расчётах по потерям  $A_{БЗ} = A_{ЭЗ}$ , где  $A_{ЭЗ}$  – эксплуатационный запас на изменения затуханий вносимых средой (оптическим волокном – ОВ), передающим (ПОМ) и приёмным (ПРОМ) модулями ( $A_{ЭЗ} \approx 5 - 6$  дБ); ЭП – энергетический потенциал, который определяется разностью оптических уровней передачи и чувствительности ПРОМ.

Длительность импульсов принимаемого сигнала с увеличением длины секции  $l_p$  увеличивается. Расширение длительности принимаемых импульсов за счёт дисперсии света принято оценивать временной дисперсией  $\sigma$ , которую определяют как [3, 5, 6]:

$$\sigma = \sqrt{T_{вых}^2 - T_{вх}^2}, \quad (2)$$

где  $T_{вх}$  – длительность входного импульса;  $T_{вых}$  – длительность принимаемого (выходного) импульса.

Чтобы не допустить МСИ длину секции  $l_{p\sigma}$  рекомендуют выбирать таким образом, чтобы относительная величина дисперсии  $z = \frac{\sigma}{T_T} = 0,25$  [3].

В этом случае длина регенерационной секции связанная с относительной величиной дисперсии [5]

$$l_{p\sigma} = \frac{0,25}{\sigma_{01} \cdot \Delta_\lambda \cdot B}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{01}$  – удельная дисперсия волокна пс/нм · км – определяется типом используемого ОВ и длиной волны излучения  $\lambda$ ;  $B$  – линейная скорость передачи бит/с;  $\Delta_\lambda$  – ширина линии излучения нм.

Увеличение параметра  $z$  приводит к увеличению МСИ, ухудшению помехоустойчивости (увеличению допустимой защищённости), а значит и к уменьшению длины  $l_{p\sigma}$ , что не допустимо, если  $l_{p\sigma} > l_{pa}$ .

Однако, при переоборудовании линий передачи с ВОСП – SDH на ВОСП – WDM и при переходе, соответственно, из второго в третье окно прозрачности кабеля SF, учитывая увеличенное значение  $\sigma_{01}$  в третьем окне прозрачности (19 пс/нм · км по сравнению с 3,5 пс/нм · км) и ширину линии излучения  $\Delta_\lambda \approx 5$  нм лазерных диодов, обычно используемых в ПОМ ВОСП – SDH и WDM, имеем

$$l_{p\sigma} < l_{pa}.$$

В этом случае бюджет по защищённости  $\Delta A_{БЗ}$  увеличивается на  $\Delta A_l$ , за счёт меньшей длины регенерационной секции и нового значения коэффициента затухания  $\alpha_3$ .

$$\Delta A_l(z) = \alpha_2 \cdot l_{pa} - \alpha_3 \cdot l_{p\sigma}(z), \quad (4)$$

где  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  – коэффициенты затуханий оптического волокна ОВ соответственно во 2-м и 3-м окнах прозрачности;  $l_{p\sigma}(z)$  определяется выражением:

$$l_{p\sigma} = \frac{z}{\sigma_{01} \cdot \Delta_\lambda \cdot B}.$$

Наличие запаса по защищённости позволяет увеличить длину регенерационной секции  $l_p$  по сравнению с  $l_{p\sigma}$  увеличением относительной величины дисперсии  $z = \frac{\sigma}{T_T}$ , однако при этом надо учитывать также увеличение допустимой защищённости  $\Delta A_\sigma(z)$ .

Увеличение  $z$  увеличивает  $\Delta A_{\sigma}(z)$  и уменьшает  $\Delta A_l(z)$ . Предельное, максимально-допустимое значение  $z = z_m$  можно определить из уравнения

$$A_{БЗ}(z) = A_{ЭЗ} + \Delta A_l(z) - \Delta A_{\sigma}(z) = A_{ЭЗ},$$

т.е.

$$A_z(z) = \Delta A_l(z) - \Delta A_{\sigma}(z) = 0, \quad (5)$$

при этом фактическое значение относительной дисперсии находится в пределах

$$0,25 \leq z \leq z_m. \quad (6)$$

Определим ухудшение допустимой защищенности  $\Delta A_{\sigma}(z)$  по раскрытию глаз-диаграммы:

$$\Delta A_{\sigma} = 20 \lg \left( \frac{D}{d} \right), \quad (7)$$

где  $D$  – номинальный диаметр глаз-диаграммы;  $d$  – внутренний диаметр глаз-диаграммы, который определяется величиной МСИ.

Величина МСИ определяется значением отсчетов  $g_1 = g(t = T_T)$ ,  $g_2 = g(t = 2T_T)$  и т.д. импульсного отклика  $g(t)$ , а также критерием оценки МСИ.

Импульсная характеристика длинных световодных линий связи с хорошим приближением описывается импульсом гауссовской формы [2, 3].

Эта колокообразная форма импульса в относительных величинах определяется выражением (8) [2]:

$$g\left(\frac{t}{T_T}\right) = D \cdot \exp\left[-a^2 \left(\frac{t}{T_T}\right)^2\right]. \quad (8)$$

Здесь параметр « $a$ » определяет скорость уменьшения  $g(t)$ . Определим его, полагая заданным отношение

$$\mu = \frac{g_1}{g_0}. \quad (9)$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} g_1 &= g(t = T_T), \\ g_0 &= g(t = 0) \end{aligned}$$

выражение (10) имеет вид

$$g\left(\frac{t}{T_T}\right) = D \cdot \exp[-a^2],$$

поэтому

$$\mu = \frac{g_1}{g_0} = \frac{D \cdot \exp[-a^2]}{D} = \exp[-a^2] = \frac{1}{e^{a^2}},$$

значит

$$a^2 = \ln \frac{1}{\mu}. \quad (10)$$

Для определения величины  $d$  существуют два метода оценки:

- среднеквадратичная оценка размытости глаз-диаграммы (Е-критерий);
- D-критерий, когда размытость глаз-диаграммы определяют как сумму модулей всех отсчетов отклика  $g(t)$ .

Когда учитываемых отсчетов  $g(t)$  много, то результат их наложения нормализуется, и использование Е-критерия является оправданным.

Для гауссовой формы отклика, при малых допустимых значениях  $\mu$ , отсчетами  $g_2 = g(t = 2T_T)$ ,  $g_3 = g(t = 3T_T)$  и т.д. можно пренебречь в виду их малости. В этом случае оправданным является использование D-критерия, который является оценкой «по худшему случаю».

Для двоичного однополярного сигнала в ВОСП:

$$d = D - 2|g_1|. \quad (11)$$

Учитывая (7), (9), (10), а также что  $D = g_0$ , можно записать

$$\Delta A_\sigma = 20 \lg \left( \frac{1}{1 - 2e^{-a^2}} \right), \quad (12)$$

где

$$a = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\tau}, \quad (13)$$

где  $\tau = \frac{T_{и}}{T_T}$  – относительная длительность импульса;  $T_{и}$  – длительность импульса, измеренная на уровне 0,5 от максимума ( $0,5 D$ );  $T_T$  – длительность тактового интервала.

Определим зависимость  $\Delta A_\alpha$  от относительной величины дисперсии  $z$ , используя (2), полагая  $T_{и} = T_{вых}$  и учитывая, что для линейного кода NRZ длительность входного импульса  $T_{вх} = T_T$ .

В этом случае

$$z = \frac{\sigma}{T_T} = \sqrt{\frac{T_{вых}^2}{T_T^2} - 1}. \quad (14)$$

Значит

$$\tau = \sqrt{z^2 + 1}. \quad (15)$$

Из (7) ... (15) следует, что

$$\Delta A_\sigma(z) = 20 \lg \left( \frac{1}{1 - 2e^{-\frac{4 \ln(2)}{1+z^2}}} \right). \quad (16)$$

График этой зависимости приведен на рис. 1, из которого видно, что увеличение относительной дисперсии  $z$  до 0,5, т.е. вдвое по сравнению с общепринятым значением  $z = 0,25$  практически не изменяет величину  $\Delta A_\sigma$ .

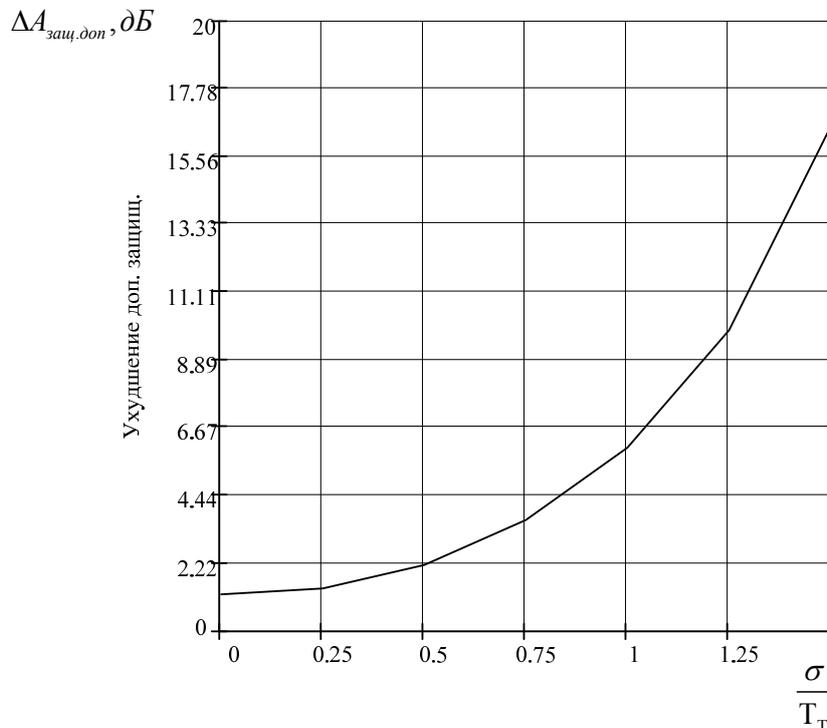


Рисунок 1 – Влияние относительной дисперсии  $z = \frac{\sigma}{T_T}$  на ухудшение допустимой защищенности  $\Delta A_\sigma$  дБ

Используя (4) и полученное выражение (16), уравнение (6) для определения  $z_m$  запишется следующим образом

$$A_z(z) = \left[ \text{ЭП} - \alpha_3 \cdot \frac{z}{\sigma_{01} \cdot \Delta_\lambda \cdot B} \right] + 20 \lg \left( \frac{1}{1 - 2e^{-\frac{4 \ln(2)}{1+z^2}}} \right). \quad (17)$$

На рис. 2 приведены зависимости  $A_z(z)$  для следующих исходных данных:

ЭП = 25-35 дБ;  $\sigma_3 = 0,3$  дБ/км;  $\Delta_\lambda = 4$  нм;  $\sigma_{01} = 19$  пс/нм · км;  $B = 155$  Мбит/с, что соответствует STM-1.

Видно, что для приведенных исходных данных при ЭП = 30 дБ, дБ максимально допустимая величина относительной дисперсии  $z_m = 1$ .

Практически увеличение  $A_\sigma(z)$  на величину более чем 3...5 дБ нецелесообразно, так как при этом начинает увеличиваться влияние дестабилизирующих факторов на правильный прием сигнала.

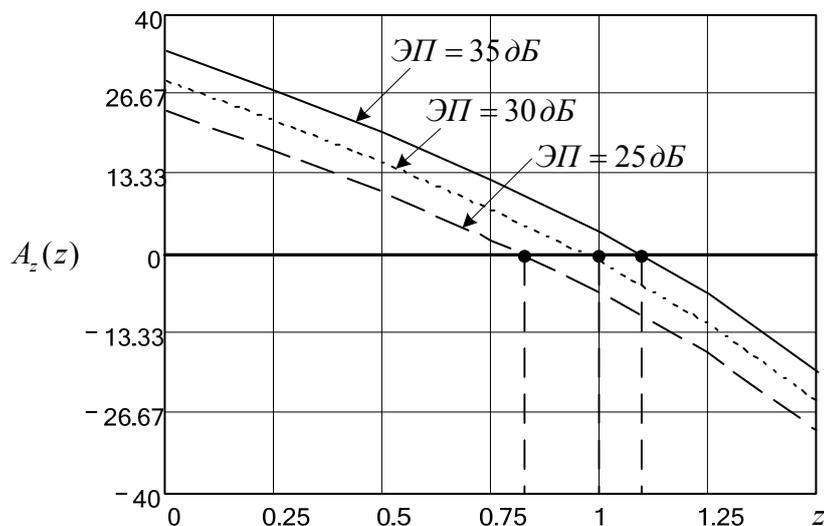


Рисунок 2 – Графическое определение предельных значений  $z$

В заключении можно сказать следующее, что в случае, когда  $l_p$  ограничена дисперсионными искажениями, то ее можно увеличить в два, а иногда в три раза за счет увеличения допустимого расширения импульсов приемника.

Известно, что увеличить  $l_{рс}$  можно также используя ПОМ с меньшей шириной линии излучения  $\Delta_\lambda$ , однако предлагаемый способ является более простым и дешёвым.

### Литература

1. Підсумки роботи галузі зв'язку та інформатизації за січень-березень 2008 р. <http://www.stc.gov.ua/uk/publish/article/68241>
2. Гауэр Дж. Оптические системы связи; пер с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
3. Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П., Проживальский О.П. Проектирование волоконно-оптических систем: Учеб. пособие. – Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2006. – 70 с.
4. Брескин В.А. Проектирование цифровых систем передачи: Учеб. пособие. – Одесса: ОЭИС им. А.С. Попова, 1987. – 30 с.
5. Захаров В.М., Кись О.Н. Проектирование волоконно-оптических линий передачи. – Ч.1. Линейный тракт: метод. пособие. – Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 1991. – 24 с.
6. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Sygus Systems, 1999. – 657 с.