

Практическая работа № 4

РАСЧЕТ КАСКАДА ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ EDFA

Цель работы: исследовать затухание волоконно-оптической линии связи, определить необходимость установки усилительных и регенерационных пунктов.

Краткие сведения из теории

Для компенсации затухания оптического сигнала по мере его прохождения по линии связи чаще всего используют оптические усилители построенные на **волокне, легированном эрбием** (EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier). Данный вид усилителей имеет ряд преимуществ, которые обусловили их широкое распространение в последнее время. Во-первых, для работы данного класса усилителей не требуется подстройка под частоту передаваемого сигнала. Во-вторых, усиление ведется в широкой полосе частот. Эти преимущества позволяют легко наращивать емкость сети, не изменяя оборудования линий связи. В-третьих, для усиления сигнала не требуется его преобразование в электрическую форму. Также оптические усилители работают с сигналами любой формы и назначения. Но наряду со своими преимуществами оптические усилители имеют ряд особенностей, которые необходимо обязательно учитывать при проектировании волоконно-оптических линий связи.

Помимо оптических волокон затухания также вносят разъемные и неразъемные (сварные) соединения волокна. Поэтому необходимо учесть потери мощности сигнала при его вводе в волокно и обеспечить определенный технологический запас.

Суммарные потери A участка усиления линейного тракта можно определить по формуле

$$A = n_p \beta_p + n_n \beta_n + A_{\text{зап}} + \alpha_{\text{км}} L_y + \beta_{\text{вв}}, \quad (1)$$

где n_p – количество разъемных соединений в линейном тракте;

β_p – затухание в разъемных соединениях, дБ;

n_n – количество неразъемных соединений на участке усиления

$$n_n = \frac{L_y}{L_{\text{стр}}} - 1, \quad (2)$$

L_y – длина участка усиления, км;

$L_{\text{стр}}$ – строительная длина используемого ВОК, км;

β_n – затухание в неразъемном (сварном) соединении, дБ;
 $A_{\text{зап}}$ – необходимый энергетический запас мощности сигнала, связанный с потерями из-за старения элементов оптического тракта: источника излучения, волоконно-оптического кабеля, оптоэлектронного преобразователя, изменение параметров электрических схем, дБ;
 $\alpha_{\text{км}}$ – километрическое затухание оптического кабеля, дБ/км;
 $\beta_{\text{вв}}$ – потери при вводе оптической энергии в волокно, когда источник оптического излучения непосредственно подсоединяется к станционному кабелю, дБ.

В связи с тем, что

$$A = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{пер}}$ – уровень сигнала на передающей стороне, дБ;

$P_{\text{пр}}$ – требуемый уровень сигнала на приемной стороне, дБ.

Тогда окончательная формула для расчета длины участка усиления примет следующий вид:

$$L_y = \frac{P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}} - n_p \beta_p - A_{\text{зап}} - \beta_{\text{вв}} + \beta_n}{\alpha_{\text{км}} + \beta_n / L_{\text{стр}}}. \quad (4)$$

Расчитанная таким образом длина усилительного участка справедлива для обоих направлений передачи информации, если используется одинаковое оборудование с одинаковыми уровнями сигнала.

Расчет мощности шума, вносимого усилителем. Используемые оптические усилители имеют ряд отличительных особенностей. Одна из них состоит в том, что при отсутствии входного сигнала усилитель является источником спонтанного излучения фотонов, которое является шумом с мощностью $P_{\text{ш ASE}}$. Спонтанно образованные фотоны, распространяясь по волокну в активной зоне волоконно-оптического усилителя, тиражируются, в результате чего создаются вторичные фотоны на той же длине волны, с той же фазой, поляризацией и направлением распространения. Результирующий спектр спонтанных фотонов называется **усиленным спонтанным излучением** (ASE – amplified spontaneous emission). Его мощность нормируется в расчете на 1 Гц и имеет размерность Вт/Гц. Если на вход усилителя подается полезный сигнал от лазера, то определенная доля энергетических переходов, ранее работавшая на усиленное спонтанное излучение, начинает усиливать выходной сигнал мощностью $P_{\text{с вых}}$ под действием сигнала от лазера. Таким образом, происходит не только усиление полезного входного сигнала, но и ослабление ASE. Но, несмотря на это, необходимо все же учитывать шумы мощностью $P_{\text{ш вых}}$, вносимые оптическими усилителями. Накопленный шум влияет на качество передаваемого сигнала, и в случае умень-

шения величины **отношения сигнала к шуму** (ОСШ) (5) ниже требуемого уровня необходима регенерация сигнала.

$$\text{ОСШ} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{с вых}}}{P_{\text{ш вых}}} \right). \quad (5)$$

Потому следует рассчитать максимально возможное количество усилителей оптического сигнала, расположенных между регенераторами.

Мощность усиленного одним оптическим усилителем спонтанного излучения можно найти по формуле

$$P_{ASE} = hf \frac{n_{sp}}{\eta} (G - 1), \quad (6)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,6252 \cdot 10^{-34}$ Вт·с²;

f – частота в соответствии с используемой длиной волны, Гц;

n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии, $n_{sp} = 2$, поскольку распространяются две моды поляризации;

η – квантовая эффективность, $\eta = 1$;

G – коэффициент усиления усилителя.

Мощность шума усилителя для полосы частот, в которой осуществляется передача сигнала (Δf)

$$P_{ш ASE} = P_{ASE} \Delta f. \quad (7)$$

Располагая вычисленными характеристиками шума, вносимого оптическим усилителем, можно найти их максимально возможное количество, при котором сохраняется требуемое ОСШ.

Расчет ОСШ. При передаче сигнала по волоконно-оптической линии связи с усилителями EDFA происходит накопление шумов. Данное явление обусловлено двумя факторами: усилением усилителями входного шума и добавлением к нему шума усиленного спонтанного излучения. Входным шумом для первого оптического усилителя является мощность шума нулевых флуктуаций, которым можно пренебречь.

Для нахождения ОСШ (по мощности) на выходе k -го усилителя используется формула

$$\text{ОСШ}_k = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{с вых}}}{P_{\text{ш вых } k}} \right). \quad (8)$$

Начальная мощность шума на входе первого усилителя пренебрежительно мала. Потому можно считать $P_{\text{ш вых } 0} = 0$. С учетом этого мощность шума на выходе k -го усилителя

$$P_{\text{ш вых } k} = kP_{\text{ш ASE}}. \quad (9)$$

Абсолютный уровень шума на выходе k -го усилителя

$$p_{\text{ш вых } k} = 10 \cdot \log \left(\frac{kP_{\text{ш ASE}}}{P_0} \right), \quad (10)$$

где P_0 – нормированное абсолютное значение мощности сигнала нулевого уровня, $P_0 = 10^{-3}$ Вт.

Подставив выражение (9) в (8), получаем

$$\text{ОСШ}_k = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{с вых}}}{kP_{\text{ш ASE}}} \right). \quad (11)$$

Для нахождения ОСШ как разницы уровней сигнала и шума формулу (11) можно записать в виде

$$\text{ОСШ}_k = p_{\text{пер}} - p_{\text{ш вых } k}. \quad (12)$$

По формуле (12) можно рассчитать отношение сигнал/шум на выходе оптической линии, содержащей несколько оптических усилителей и представить их в виде графика на рисунке 1, где k – порядковый номер усилителя.

Помимо этого, на рисунке 1 показаны уровни сигнала и шума после прохождения нескольких оптических усилителей, а также нормированное (минимальное) ОСШ. Эти результаты справедливы для двух направлений передачи информации. Видно, что с увеличением количества оптических усилителей возрастает уровень накопленного шума в линии. Это ведет к уменьшению отношения сигнал/шум. Для приведенного примера требуемое ОСШ (25 дБ) сохраняется на выходе линии с использованием шести оптических усилителей. Далее необходима регенерация сигнала, поскольку уровень накопленного шума превышает пороговое значение. Дальнейшее увеличение уровня шума приведет к снижению качества передаваемой информации.

Для примера, представленного на рисунке 1, длина регенерационного участка определяется по следующей формуле:

$$L_{\text{пр}} = 7L_y. \quad (13)$$

На выходе седьмого усилителя ОСШ ниже нормированного уровня, поэтому вместо седьмого усилителя необходимо устанавливать регенератор. И максимальное расстояние от аппаратуры передачи до регенератора или от одного регенератора до другого составит семь усилительных участков. Если по расчетам на линии связи необходимо установить один или несколько регенераторов, то целесообразно размещать их равномерно вдоль линии.

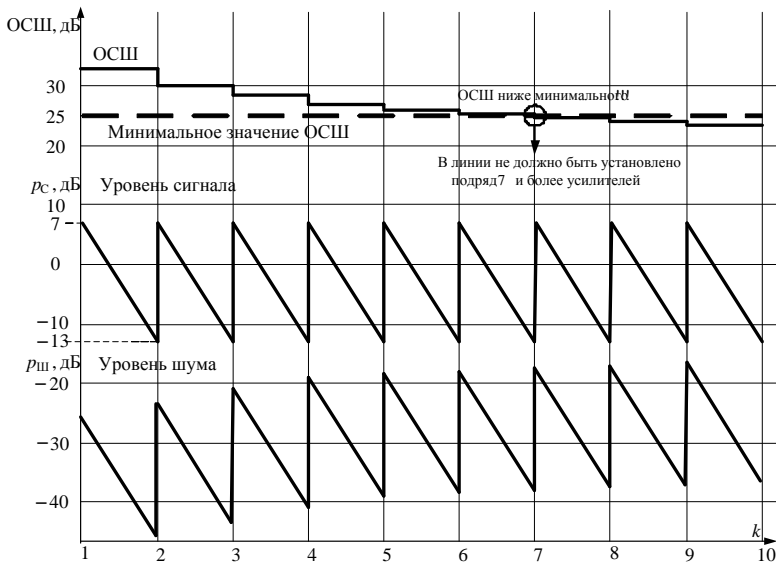


Рисунок 1 – ОСШ, P_c , $P_{ш}$ линии связи с несколькими оптическими усилителями

На рисунке 2 приведена структурная схема расположения линейного оборудования (усилители и регенераторы) волоконно-оптической линии связи для следующих исходных данных:

- протяженность волоконно-оптической линии связи, $L = 650$ км;
- длина усилительного участка, $L_y = 62,41$ км;
- длина регенерационного участка, $L_p = 436,87$ км.

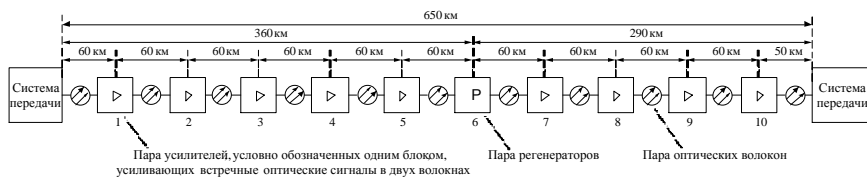


Рисунок 2 – Структурная схема расположения линейного оборудования волоконно-оптической линии связи

Порядок выполнения работы

- 1 Изучить краткие сведения из теории.
- 2 В соответствии с шифром выбрать исходные данные для расчета каскада оптических усилителей EDFA из таблицы 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета каскада оптических усилителей EDFA

Параметр	Первая цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Километрическое затухание волокна ($\alpha_{км}$), дБ/км	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
Строительная длина кабеля ($L_{стр}$), км	6,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2
Длина волны передачи оптического сигнала (λ), нм	1532,68	1540,56	1548,51	1556,55	1528,77	1550,12	1560,61	1552,52	1544,53	1536,61
Параметр	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Затухание в неразъемных соединителях (β_n), дБ	0,050	0,070	0,080	0,065	0,045	0,060	0,040	0,055	0,075	0,085
Полоса частот, в которой осуществляется передача сигнала (Δf), ГГц	100	50	200	100	50	50	100	200	50	100
Нормированное ОСШ, дБ	27	26,5	26	25,5	25	22,5	23	23,5	24	24,5

3 Принять следующие параметры для расчета каскада оптических усилителей EDFA:

- уровень сигнала на передающей стороне $p_{пер} = 7$ дБ;
- требуемый уровень сигнала на приемной стороне $p_{пр} = -13$ дБ;
- количество разъемных соединителей в линии связи $n_p = 2$;
- затухание в разъемном соединителе $\beta_p = 0,4$ дБ;
- необходимый энергетический запас мощности сигнала, связанный с потерями из-за старения элементов оптического тракта: источника излучения, волоконно-оптического кабеля, оптоэлектронного преобразователя и изменения параметров электрических схем, $A_{зап} = 3$ дБ;
- потери при вводе оптической энергии в волокно, когда источник оптического излучения непосредственно подсоединяется к станционному кабелю, $\beta_{вв} = 2$ дБ.

4 Вычислить протяженность волоконно-оптической линии связи, км:

$$L = -\frac{N^3}{500} + \frac{N^2}{4} - 2N + 500, \quad (14)$$

где N – двузначный номер шифра.

5 По формулам (2)–(4) рассчитать длину усилительного участка.

6 Рассчитать частоту оптического сигнала в соответствии с используемой длиной волны:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (15)$$

где c – скорость света в вакууме, $3 \cdot 10^8$ м/с.

7 Рассчитать коэффициент усиления усилителя:

$$G = \frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{пр}}} = 10^{\frac{P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}}}{10}}. \quad (16)$$

8 По формулам (5)–(12) рассчитать каскад оптических усилителей EDFA, результаты расчетов оформить в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Результаты расчета каскада оптических усилителей EDFA

Номер усилителя	Уровень сигнала на входе усилителя, дБ	Уровень сигнала на выходе усилителя, дБ	Уровень шума на входе усилителя, дБ	Уровень шума на выходе усилителя, дБ	ОСШ, дБ
1	-13	7			
2	-13	7			
3	-13	7			
4	-13	7			
5	-13	7			
и т. д.	-13	7			

9 По результатам расчетов построить график в соответствии с образцом, представленным на рисунке 1. Графически определить и рассчитать по формуле (13) длину регенерационного участка волоконно-оптической линии связи.

10 По результатам расчетов составить структурную схему расположения линейного оборудования волоконно-оптической линии связи.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Результаты расчета каскада оптических усилителей EDFA в табличном и графическом виде.

3 Результаты расчета длины регенерационного участка волоконно-оптической линии связи.

4 Структурная схема расположения линейного оборудования волоконно-оптической линии связи.

5 Вывод по работе.

Контрольные вопросы

1 Особенности EDFA-усилителей.

2 Как определяются суммарные потери?

3 Что такое ASE?

4 Причины накопления шумов в волоконно-оптической линии связи.