

5 ФОРМУЛЫ РАСЧЁТА ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

1. Относительный показатель преломления ОВ:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

2. Показатель преломления сердцевинки для разных ППП:

а) ступенчатый, однородный

$n_1 = \text{const}$ для $0 \leq r \leq a$, где a – радиус сердцевинки;

б) градиентный, параболический

$$n(r) = n_1 \left[1 - \Delta \cdot \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \text{ для } 0 \leq r \leq a.$$

3. Предельный угол полного внутреннего отражения $\theta_{\text{пр}}$

$$\sin(\theta_{\text{пр}}) = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}},$$

где ϵ_1 и ϵ_2 – относительные диэлектрические проницаемости сердцевинки и оболочки соответственно.

4. Волновое число сердцевинки:

$$k_1 = k_0 n_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1,$$

где k_0 и λ – волновое число и длина волны в вакууме соответственно.

5. Волновое число оболочки:

$$k_2 = k_0 n_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2.$$

6. Поперечное волновое число сердцевинки:

$$g_1^2 = k_1^2 - \beta^2,$$

где β – продольная постоянная распространения моды.

7. Поперечное волновое число оболочки:

$$g_2^2 = \beta^2 - k_2^2.$$

8. Характеристическое уравнение для всех мод:

$$g_1 \cdot \frac{J_{n\pm 1}(g_1 a)}{J_n(g_1 a)} = g_2 \cdot \frac{K_{n\pm 1}(g_2 a)}{K_n(g_2 a)},$$

где $J_n(g_1 a)$ и $J_{n\pm 1}(g_1 a)$ – функции Бесселя первого рода n и $n \pm 1$ порядка;

$K_n(g_2 a)$ и $K_{n\pm 1}(g_2 a)$ – модифицированные функции Бесселя n и $n \pm 1$ порядка.

9. Характеристическое уравнение основной гибридной волны HE_{11}

$$g_1 \cdot \frac{J_1(g_1 a)}{J_0(g_1 a)} = g_2 \cdot \frac{K_1(g_2 a)}{K_0(g_2 a)},$$

10. Числовая апертура:

$$NA = \sin(\theta_A) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ где } \theta_A \text{ – критический (апертурный) угол.}$$

11. Нормированная частота:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \cdot NA.$$

12. Нормированная критическая частота моды:

$$V_{кр} = \frac{2\pi \cdot a}{\lambda_{кр}} \cdot NA.$$

13. Критическая частота:

$$f_{кр} = \frac{c}{\lambda_{кр} \cdot n_2}, \text{ где } c \text{ – скорость света в вакууме.}$$

14. Условие ОМ режима ВС:

$$0 < V < V_{кр} = 2,405.$$

15. Фазовая скорость мод:

$$c/n_1 < V_\phi < c/n_2.$$

16. Групповая скорость мод:

$$V_{гр} = V_\phi - \lambda \cdot \frac{dV_\phi}{d\lambda}.$$

17. Число мод в ОВ с ППП:

а) ступенчатым, однородным

$$N \approx \frac{V^2}{2};$$

б) градиентным, параболическим

$$N \approx \frac{V^2}{4}.$$

18. Погонные потери энергии в материале ОВ (до инфракрасной области спектра).

$$\alpha_{\text{ИМ}} = 8,69 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot n_1}{\lambda} \operatorname{tg}(\delta), \text{ дБ/км.}$$

19. Погонные потери из-за релеевского рассеяния **ОВ**:

$$\alpha_{\text{РР}} = \frac{K_{\text{Р}}}{\lambda^4}, \text{ дБ/км,}$$

где $K_{\text{Р}}$ – коэффициент рассеяния материала ОВ [$\text{мкм}^4 \text{ дБ/км}$].

20. Погонные потери в инфракрасной области спектра:

$$\alpha_{\text{ИК}} = C_{\text{ИК}} \cdot \exp(-K_{\text{ИК}} / \lambda), \text{ дБ/км,}$$

где $C_{\text{ИК}} = 0,3 \text{ дБ/км}$ и $K_{\text{ИК}} = 0,5 \cdot 10^6 \text{ мкм}$ – коэффициенты потерь;

21. Собственные погонные потери ОВ:

$$\alpha_{\text{С}} = \alpha_{\text{ИМ}} + \alpha_{\text{РР}} + \alpha_{\text{ИК}} + \alpha_{\text{ИП}}, \text{ дБ/км,}$$

где $\alpha_{\text{ИП}}$ – погонные потери на примесях материала ОВ.

22. Полные погонные потери ОВ в составе ОК:

$$\alpha_{\text{П}} = \alpha_{\text{С}} + \alpha_{\text{К}}, \text{ дБ/км,}$$

где $\alpha_{\text{К}}$ – кабельные потери.

23. Полное затухание линии передачи (ОВ в составе ОК):

$$\alpha = \alpha_{\text{П}} \cdot \ell, \text{ дБ,}$$

где ℓ – длина линии в километрах

24. Динамический диапазон фотоприёмника:

$$D \text{ (дБ)} = (P_{\text{пр макс}} - P_{\text{пр}}), \text{ дБ,}$$

где $P_{\text{пр макс}}$ – максимальная допустимая мощность на входе приёмника

25. Энергетический потенциал аппаратуры:

$$П \text{ (дБ)} = (P_{\text{ц}} - P_{\text{пр}} - \alpha_{\text{вв}}), \text{ дБ,}$$

где $\alpha_{\text{вв}}$ – потери ВС при вводе и выводе излучения.

26. Запас оптической мощности:

$$\Delta П \text{ (дБ)} = (П - \alpha), \text{ дБ.}$$

27. Условия реализации ВОЛС по мощности:

$$D \text{ (дБ)} > \Delta П \text{ (дБ)} > 0.$$

28. Уширение импульса в ОВ – дисперсия:

$$\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2}, \text{ пс,}$$

где $t_{\text{вх}}$ – длительность прямоугольного импульса на входе и $t_{\text{вых}}$ – на выходе ОВ по уровню минус 3дБ.

29. Материальная дисперсия:

$$\tau_{\text{мат}} = \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \cdot \Delta\lambda \cdot l = M(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot l, \text{ пс,}$$

где $M(\lambda)$ – удельная материальная дисперсия.

30. Волноводная дисперсия:

$$\tau_{\text{вол}} = \frac{2n_1^2 \Delta}{c \cdot \lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot l = N(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot l, \text{ пс,}$$

где $N(\lambda)$ – удельная волноводная дисперсия.

31. Хроматическая дисперсия:

$$\tau_{\text{хр}} = \tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вол}}, \text{ пс.}$$

32. Модовая (межмодовая) дисперсия в ОВ с ППП:

а) ступенчатым, однородным

$$\tau_{\text{МОД}} = n_1 \cdot \Delta \cdot \frac{l}{c}, \text{ пс};$$

б) градиентным, параболическим

$$\tau_{\text{МОД}} = n_3 \cdot \Delta^2 \cdot \frac{l}{2c}, \text{ пс}.$$

33. Поляризационная дисперсия:

$$\tau_{\text{ПОЛ}} = T(\lambda) \cdot \sqrt{l} \text{ пс},$$

где $T(\lambda)$ – удельная поляризационная дисперсия.

34. Полная дисперсия ОВ – средне квадратичное уширение импульса:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{МОД}}^2 + \tau_{\text{ХР}}^2 + \tau_{\text{ПОЛ}}^2}, \text{ пс}.$$

35. Скорость передачи информации по ВС:

$$V = \frac{0,25}{\tau}, \text{ Мбит/с}.$$

36. Условие реализации ВОЛС по дисперсии:

$V > V_{\text{ТР}}$, где $V_{\text{ТР}}$ – требуемая скорость передачи.

37. Полоса пропускания для ОМ ОВ:

$$\Delta f = \frac{0,187}{\tau \cdot \Delta \lambda \cdot l}, \text{ МГц},$$

где $\Delta \lambda$ – ширина спектра излучения источника, нм.

38. Полоса пропускания для ММ ОВ с ППП:

а) ступенчатым, однородным

$$\Delta f \approx 1/\tau_{\text{МОД}} = \frac{c}{n_1 l \Delta}, \text{ МГц},$$

б) градиентным, параболическим

$$\Delta f \approx 1/\tau_{\text{МОД}} = \frac{2c}{\Delta^2 n_3 l}, \text{ МГц}.$$

Нормированная частота V - обобщённый безразмерный параметр, зависящий от отношения d_c / λ и числовой апертуры NA.

Нормированная частота отсечки (моды) VOTC - частота, ниже которой данная мода в ОВ не возникает.

Простой критерий распространения одной моды даёт расчёт ОВ на основе уравнений Максвелла: $0 < V < 2,405$.

Потери оптической мощности по мере распространения света по ОВ называются *затуханием*, которое определяется отношением оптической мощности на входе ОВ $T_{>ex}$ к мощности на его выходе $P_{вых}$ •

Для оценки таких величин по решению Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (МККТТ) от 1971г. используются логарифмические единицы с основанием 10 (десятичные логарифмы). Поэтому величина затухания a выражается в *децибелах* (дБ) $a \text{ (дБ)} = 10 \cdot \lg a = 10 \cdot \lg (P_{вх}/P_{вых})$ и называется *коэффициентом затухания света* в ОВ.

Затухание оптической мощности на 1км длины • α ОВ (погонное или удельное затухание) определяется *коэффициентом полных потерь световой энергии* в ОВ $(Xп \text{ (дБ / км)} = a \text{ (дБ)} / -\alpha \text{ (км)})$.

Логарифмические единицы используются и для измерений абсолютных значений мощности, но при этом говорят об *уровне мощности* относительно активной мощности равной $P_0 = 1\text{мВА}$ (1 милливатт). Эта мощность P_0 в логарифмических единицах соответствует абсолютному нулевому уровню мощности. Все другие абсолютные уровни мощности в децибелах (по мощности, дБм) определяются из выражения $P \text{ (дБм)} = 10 \cdot \lg (P / P_0)$.

Номинальная оптическая мощность передатчика P_n - оптическая мощность источника излучения, обеспечивающая его оптимальную работу (регламентируется производителем).

7

Оптическая мощность фотоприёмника $P_{пр}$ - оптическая мощность на входе фотоприёмника, при которой *вероятность ошибки $p_{ош}$* декодирования цифрового оптического сигнала не больше *номинальной вероятности p_n* , т. е. $p_{ош} < p_n$.

Энергетический потенциал аппаратуры Π , выраженный в децибелах, определяется как разность уровней мощностей передатчика P_n и приёмника $P_{пр}$ с учетом потерь ввода/вывода a вв: $\Pi = (P_n - P_{цр} - OS \text{ вв}) \text{ (дБ)}$. Энергетический потенциал Π обеспечивает гарантированное выполнение условия $p_{ош} < p_n$.

Разность энергетического потенциала Π (дБ) и затухания ОВ a (дБ) позволяет оценить *запас оптической мощности* $ДП \text{ (дБ)} = (\Pi - a) \text{ (дБ)}$ данной линии оптической связи.

Дисперсия - это зависимость фазовой скорости световых волн от частоты $V_{<p} = V_{<t>(co)}$. Это же относится и к показателю преломления $n = n(co)$. Дисперсия приводит к уширению (увеличению) длительности импульса по мере его распространения в ОВ, и при больших значениях дисперсии к ошибкам декодирования, вследствие перекрытия импульсов цифрового оптического сигнала.

Скорость передачи данных - количество бит информации, передаваемых в системе за секунду (бит/с).

Пропускная способность канала (информационная полоса пропускания) - максимальная (предельная) скорость передачи канала, определяет потенциальные возможности системы связи, использующей данный канал. Для ОВ пропускная способность определяется тем, насколько близко могут располагаться кодирующие информацию соседние импульсы без взаимного перекрытия (без межсимвольной интерференции), и, следовательно, без межсимвольных помех.

Полоса пропускания канала № - диапазон частот спектра информационного сигнала, определяет способность ОВ передавать определенный объем

8 информации в единицу времени и лимитируется дисперсией ОВ.

Приведенные выше основные термины и понятия помогут ознакомиться с некоторыми этапами расчета ВОЛС.

3 МЕТОДИКА РАСЧЁТА ВОЛС

Расчёт ВОЛС проводится в следующей последовательности — поэтапно.

1 этап Обработка исходной и нормативной документации и выбор основных компонентов ВОЛС.

- 1) выбор вида исходной информации по существующим нормативным документам (стандартам, протоколам, нормативам) и определение системы передачи, полосы частот передачи или скорости передачи;
- 2) выбор источника излучения, определение его нормативных параметров;
- 3) выбор фотоприёмника, определение его нормативных параметров;
- 4) определение энергетического потенциала аппаратуры;
- 5) выбор типа ВС и конструкции ОК.

2 этап Расчет потерь линейного тракта ВОЛС с учетом допусков на энергетический запас:

- 1) расчёт потерь в линейном тракте ОВ;
- 2) определение допусков ОВ на энергетический запас;
- 3) расчёт запаса энергетического потенциала ВОЛС.

3 этап Расчет дисперсии ОВ

4 этап Анализ результатов и коррекция выбора

3.1 Анализ исходной информации

На первом этапе расчёта уточняют и анализируют данные технического задания. Определяют скорость передачи информации (для цифровых систем) или передаваемую полосу частот (для аналоговых систем) и выбирают систему передачи, обеспечивающую получение требуемого числа каналов и дальности связи. Затем анализируют сигналы, передаваемые по ВОЛС. В цифровых системах выбирают наиболее оптимальный код, а в аналоговых — способ модуляции. Выбирают топологию схемы распределения данных, подсчитывают необходимое число оконечных устройств.

3.2 Выбор типа ВС и ОК

На втором этапе осуществляется выбор вол__оптического кабеля, наиболее полно удовлетворяющего функциональным, эксплуатационным и экономическим параметрам. Определяют его технические и

оптические характеристики. Фактически выбор кабеля можно отложить до окончания

расчёта, задавшись некоторыми значениями затухания и дисперсии в световодах, соответствующих имеющимся в наличии кабелям, и позднее определить, удовлетворят ли данные значения требованиям системы или нет.

3.3 Выбор источника излучения

Третьим этапом расчёта является выбор источника излучения. С одной стороны, для уменьшения дисперсии желательное использование лазерных диодов (ЛД), имеющих более узкий спектр излучения на длине волны λ я 850нм. С другой стороны желательное иметь источники в длинноволновом диапазоне: для использования эффекта нулевой дисперсии на длине волны $\lambda \gg 1300$ нм и для ОВ со смещённой ненулевой дисперсией на длине волны $\lambda \ll 1550$ нм. Но для этого потребуется применение светоизлучающих диодов (СИД), имеющих большую полосу спектра излучения. Кроме того, СИД имеет больший срок службы и низкую стоимость, что повышает надёжность системы и снижает расходы. Для замедления деградации и увеличения срока службы ЛД уменьшают ток накачки и соответственно пиковую мощность излучения в два раза (на ЗдБ).

10

3.4 Выбор фотоприёмника

Тип фотоприёмника: лавинный фотодиод (ЛФД) или p-i-n-фотодиод определяют исходя из имеющихся в наличии элементов и общих требований, предъявляемых к системе. При этом стремятся, чтобы фотоприёмник имел максимальную чувствительность, требуемую спектральную полосу, большой динамический диапазон, малые уровни шумов. Чувствительность приёмника $R_{\text{пр}}$, обычно определяют, исходя из заданных значений скорости передачи информации V (бит/с), ширины полосы пропускания канала Δf (МГц), и величин: мощности шума $P_{\text{ш}}$ или отношения мощностей сигнал/шум (С/Ш) (для цифровых и аналоговых систем соответственно). Значение РПР можно определить по графикам на рисунке 1. [2]

0,00,20,4 1 2 4 610 ' 40 ВО ЮО

— p-i-n-диод; — ЛФД

Рисунок 1 - Зависимости чувствительности фотоприёмников $R_{\text{пр}}$ от полосы пропускания канала Δf

В графиках принято, что для ЛФД коэффициент лавинного умножения оптимизирован из расчёта минимальной обнаруживаемой мощности. При малой скорости передачи до ЮОМбит/с, использовался усилитель на кремниевом полевом транзисторе, а при большой скорости — биполярный транзистор.

3.5 Определение энергетической характеристики системы

После установления необходимого значения оптической мощности в приёмнике можно рассчитать полный запас по мощности оптического сигнала в линии, т. е. определить энергетическую характеристику ВОЛС.

Ориентировочный расчёт энергетического запаса цифровой системы можно провести на основе графиков, показанных на рисунке 2.

от скорости передачи для цифровых ВОЛС

Зона графиков «Приёмник» соответствует средней оптической мощности, требуемой для уверенного приёма сигналов фотоприёмниками. Нижняя граница графика «Приёмник» соответствует кремниевым ЛФД, пригодным для работы в диапазоне длин волн не более 1мкэд; а верхняя граница соответствует характеристике приёмников на германиевых р-і-п-фотодиодах с максимальной чувствительностью в диапазоне 1,1 - 1,6мкм, т.е. указанная зона охватывает практически все используемые в настоящее время фотоприёмники в диапазоне 0,8 - 1,6мкм. В зонах графиков «Лазер» и «СИД» показаны средние оптические мощности источников при передаче бинарных импульсов с вероятностью ошибки $p_{\text{ош}}=10^{-10}$. Разнесение зон, соответствующих источникам и приёмникам,

12

свидетельствует о возможности получения достаточно большого запаса по мощности даже при высоких скоростях передачи В.

Например, при скорости передачи $V = 100$ Мбит/с мощность лазера должна составлять 1мВт или 0дБ, мощность СИД - 100мкВт или минус 20дБ, а чувствительность фотоприёмника - 10нВт или минус 50 дБ.