

# ВРАЩАЮЩИЙСЯ СОЕДИНИТЕЛЬ ДЛЯ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Практика использования телекоммуникационных систем связи предъявляет к элементной базе волоконно-оптической техники новые требования по созданию волоконно-оптических вращающихся соединителей [1].

Целью работы является описание простого в конструкции и изготовлении, надежного в эксплуатации, обладающего малыми оптическими потерями волоконно-оптического вращающегося соединителя.

В распоряжении разработчика имеется оптический кабель длиной 100 м на основе кварцевого волоконного световода 50/125 мкм, по которому оптическое излучение распространяется от источника излучения до фотоприемника через вращающийся соединитель.

Уровень вносимых потерь соединителя задан и не должен превышать 1 дБ.

Создание вращающегося соединителя целесообразно свести к решению задачи определения допусков на рассогласование соединяемых световодов по заданной величине вносимых оптических потерь. Рассмотрена оптическая схема соединения световодов и предложена математическая модель, отражающая зависимость величины вносимых потерь от конструктивных параметров соединителя. Несмотря на то, что в реальности смещение торцов световодов происходит в трехмерном пространстве и его оценивают по трем координатам, в нашем случае для оценки смещения световодов выбрана двумерная система координат. Это сделано потому, что в отверстии соединительной втулки оптические наконечники со световодами могут сместиться на наибольшее расстояние только двигаясь по диаметру этого отверстия, что на схеме соответствует оси ординат. Это наибольшее смещение и определяет точностной выбор подшипника качения.

В оптической схеме соединителя рассматривается распространение излучения между двумя световодами с одинаковыми геометрическими и оптическими параметрами. Световоды в данной схеме расположены с продольным смещением  $z$  и поперечным смещением  $x$  (рис. 1).

Получим обобщенную математическую модель этой оптической схемы.

Основой для вывода математической модели является теория оптических волноводов. Согласно этой теории, вносимые оптические потери в месте соединения волоконных световодов определяются из выражения:

$$A = 10 \lg \frac{P_n}{P_u}, \quad (1)$$

где  $P_u$  – величина оптической мощности на торце излучающего световода;  $P_n$  – величина оптической мощности на торце приемного световода.

В то же время величина оптических потерь между торцами световодов равна сумме величин оптических потерь от каждого рассогласующего фактора:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_i, \quad (2)$$

где  $i$  – порядковый номер фактора рассогласования.

К факторам рассогласования относятся: зазор между торцами соединяемых световодов, смещение продольных осей световодов в перпендикулярной плоскости, угловое смещение продольных осей световодов, непараллельность торцов световодов, шероховатость на торцевой поверхности световодов, разность диаметров сердцевин световодов, разность числовых апертур, эллиптичность световодов, разность показателей преломления сердцевин световодов [2].

Следует отметить, что вопросу общих потерь в соединении световодов уделено достаточное внимание. В [2] предложено для расчета потерь в случае градиентного волоконного световода использовать аппроксимацию Гаусса и считать, что суммарные потери складываются из потерь от каждого вида рассогласования по квадратичному закону. При рассмотрении волоконных световодов со ступенчатым распределением показателя преломления сердечника и равномерным распределением мощности по модам

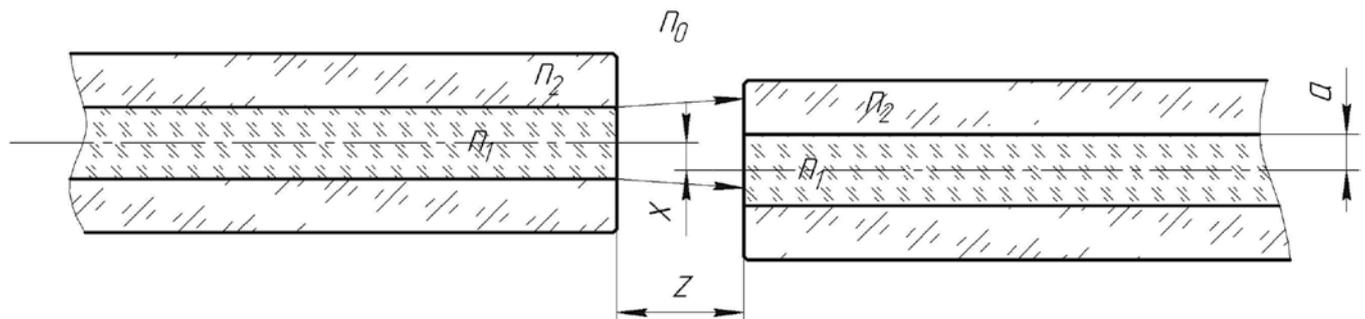


Рис. 1. Оптическая схема соединения волоконных световодов

общие суммарные потери определяются суммой потерь по отдельным видам рассогласования [3, 4].

Полагаем:

$$A_1 = -10 \lg(K_1) \quad (3)$$

– оптические потери при поперечном смещении световодов, которые возникают из-за децентровки  $x$ , вызванной конструкцией соединителя,

$$A_2 = -10 \lg(K_2) \quad (4)$$

– оптические потери из-за продольного смещения световодов.

$$A_i = -10 \lg(K_i) \quad (5)$$

– оптические потери, вызванные  $i$ -ми факторами рассогласования световодов.

Тогда:

$$-10 \lg \frac{P_n}{P_u} = -10(\lg(K_1) + \lg(K_2) + \dots + \lg(K_i)); \quad (6)$$

$$\lg \frac{P_n}{P_u} = \lg(K_1) + \lg(K_2) + \dots + \lg(K_i); \quad (7)$$

$$\lg \frac{P_n}{P_u} = \lg[(K_1) \cdot (K_2) \cdot \dots \cdot (K_i)]. \quad (8)$$

Отсюда

$$P_n = P_u (K_1) \cdot (K_2) \cdot \dots \cdot (K_i) \quad (9)$$

где  $K_i$  – коэффициент передачи соединения, через которое проходит оптическое излучение.

Для построения математических преобразований используются формулы, отражающие закономерности рассогласований при продольном смещении световодов и поперечном смещении осей световодов. Угловое рассогласование продольных осей соединяемых световодов из рассмотрения исключено, поскольку устраняется конструкцией и технологией изготовления оптического соединителя.

На практике для подстановки в формулу  $P_n = P_u [K_1 \cdot K_2]$  используются математические выражения [3, 5]:

$$K_1 = -10 \lg \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \left[ \arcsin \left( \frac{x}{2a} \right) + \frac{x}{2a} \sqrt{1 - \left( \frac{x}{2a} \right)^2} \right] \right]; \quad (10)$$

$$K_2 = -10 \lg \left( 1 - \frac{z}{4a} NA \right). \quad (11)$$

Практически значимым математическим отображением данной оптической схемы является выражение:

$$P_n = P_u \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \left[ \arcsin \left( \frac{x}{2a} \right) + \frac{x}{2a} \sqrt{1 - \left( \frac{x}{2a} \right)^2} \right] \right] \left( 1 - \frac{z}{4a} NA \right), \quad (12)$$

где  $x$  – смещение между осями стыкуемых волоконных световодов;  $a$  – радиус волоконного световода;  $P_u$  – мощность на

торце передающего световода;  $P_n$  – мощность на торце приемного световода;  $z$  – расстояние между торцами стыкуемых световодов;  $NA$  – числовая апертура волоконного световода.

На основании этого выражения определяется величина поперечного смещения  $x$ , которая обеспечивает достижение заданного уровня вносимых оптических потерь. Величина продольного смещения  $z$  полагается известной.

По рассчитанному значению смещения  $x$  определяется предельное значение радиального биения внутреннего кольца подшипника качения.

При производстве многомодовых волокон допуски на диаметр светоотражающей оболочки составляют  $\pm 2$  мкм. Это означает, что волокно с диаметром 123 мкм может соединяться с волокном диаметром 127 мкм. При механическом соединении эти различия могут дать значительное возрастание потерь: до 0,36 дБ. Эти потери при теоретическом расчете учитываются на этапе предварительного построения соединителя: общие рассчитанные потери соединителя не должны превысить заданного установленного предельного значения. На практике необходимость снижения потерь из-за различия диаметров оболочек повышает требования к точности юстировки стыкуемых световодов. Аналогичная ситуация существует с устранением неизбежных френелевских потерь, которые существенно снижаются при наличии в пространстве между торцами световодов иммерсионной жидкости. Взаимодействие системы оптических элементов светодиод – принимающий световод рассмотрено в [3, 6]. Френелевские (однократные) потери на отражение от торца принимающего световода составляют величину  $A_F = 0,17-0,20$  дБ. Взаимодействие системы оптических элементов передающий световод – принимающий световод рассмотрено в [3]. Френелевские потери при соединении кварцевых волоконных световодов – передающего и принимающего  $\sim 0,3$  дБ.

Графическое изображение уравнения (12) представлено на рис. 2.

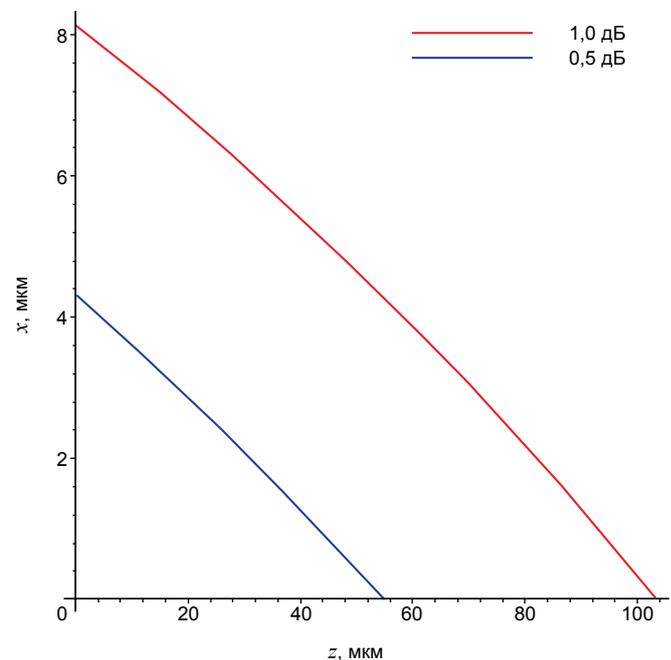


Рис. 2. Графики зависимостей поперечного смещения  $x$  осей световодов от расстояния между их торцами  $z$  для обеспечения уровня оптических потерь в соединении световодов 0,5 дБ и 1 дБ. Радиус сердцевины световода – 25 мкм

Приведенные графики наглядно показывают, что для обеспечения в соединении световодов с радиусом сердечника 25 мкм оптических потерь на уровне 1 дБ необходимо обеспечить оптический контакт световодов и смещение их оптических осей на величину не более 8,2 мкм. Другое исполнение соединителя допускает продольное смещение «z» световодов до 110 мкм, но при отсутствии поперечного смещения осей световодов. Остальные варианты исполнения являются промежуточными, но не менее жесткими по допускам на рассогласования. Отметим необходимость такого конструктивного исполнения соединителя, при котором обеспечено отсутствие вносимых оптических потерь из-за углового рассогласования продольных осей соединяемых световодов.

Практическое воплощение изделия состоит в том, что волоконно-оптический вращающийся соединитель содержит корпус, размещенные в нем первый и второй волоконные световоды, причем первый волоконный световод закреплен в первом оптическом наконечнике, который фиксируется в корпусе подшипника с возможностью вращения, а второй волоконный световод закреплен аналогично первому, причем оба оптических наконечника прижаты друг к другу пружинами и накидными гайками, связанными с корпусом, при этом торцевые поверхности волоконных световодов выполнены в виде сферы положительного радиуса.

Конструктивно предлагаемый волоконно-оптический вращающийся соединитель представляет собой единую законченную сборочную единицу, отличающуюся симметрией исполнения, и выполнен на основе оптических наконечников (коннекторов) FC.

Конструкция, соединителя обеспечивает надежность его работы в диапазоне температур от  $-40$  до  $+60$  °C.

Торцы стыкуемых оптических наконечников выполнены сферическими (рис. 3) для исключения механического трения между поверхностями торцов волоконных световодов в процессе воздействия эксплуатационных факторов. При радиусе полировки 25 мм сферическая поверхность торца сердцевины световода оказывается заглубленной на 26 мкм, практически оставаясь плоской, поскольку изменяет коэффициент передачи соединения на 0,0003 % [7]. Поэтому расчет допусков на смещение световодов проводился по выражениям (10)–(12) для плоских торцов световодов.

Особое внимание для достижения низкого уровня вносимых оптических потерь в соединителе уделено фиксации подшипников качения в корпусе соединителя и оптического наконечника во внутреннем кольце подшипника. Дело в том, что на точность стыковки сердечников световодов существенно влияют такие параметры подшипников, как радиальное биение внутреннего кольца относительно наружного, торцевые биения по дорожкам качения внутреннего и наружного колец.

Для отсутствия поперечного смещения осей световодов важно расположение на одной оси в корпусе соединителя центров внутренних отверстий подшипников. Поскольку расстояние между торцами световодов после полировки равно 52 мкм, то смещение центров волокон относительно друг друга как за счет эксцентриситета самих волокон, эксцентриситета наконечника, так и за счет эксцентриситета (биения) подшипника, исходя из расчета и графика (рис. 2), не должно превышать 4,1 мкм. Для обеспечения этой величины смещения световодов и исходя из размера диаметра оптического наконечника в  $2,499 + 0,001$  мкм выбран подшипник W 619/2.5-2Z с максимальным радиальным биением 4 мкм. Величина радиального биения выбирается равной

или меньшей половине расчетной величины смещения  $x$  между осями световодов. Поэтому проведен отбор и выбраны подшипники с радиальным биением не более 2 мкм. Угловое рассогласование между осями волоконных световодов устраняется применением, по крайней мере, двух подшипников, выбранных по приведенным выше критериям.

Посадка подшипника на наконечники осуществляется охлаждением наконечников и нагреванием подшипника. Затем эта собранная конструкция охлаждается и помещается в отверстие нагретого корпуса соединителя. Отверстие выполнено за одну технологическую операцию, причем диаметр отверстия меньше внешнего диаметра внешней трубы подшипника.

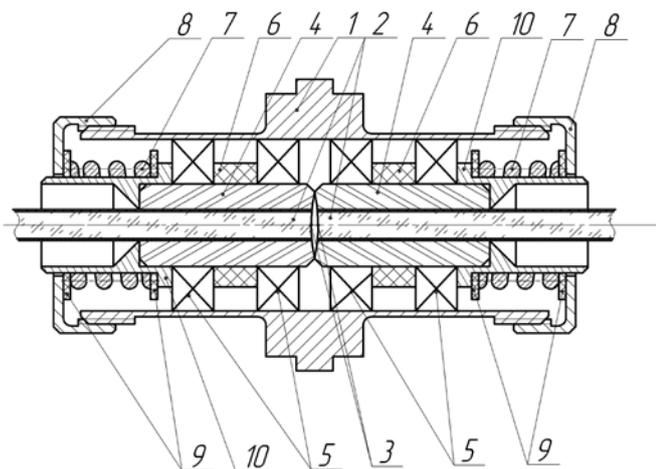
Остальные факторы рассогласования не рассматриваются из-за малой степени влияния на оптические потери соединителя. При оценке степени влияния этих факторов принято во внимание, что возросший уровень технологии изготовления световодов позволяет полагать несущественными для возникновения вносимых оптических потерь такие факторы рассогласования как разность диаметров сердцевин световодов, разница числовых апертур, эллиптичность световодов, разница показателей преломления сердцевин световодов. В еще большей степени незначительность этих факторов становится очевидной, если учитывать, что изготовление соединителя выполняется на отрезках идентичных световодов, полученных из одного единого магистрального световода.

Для устранения влияния непараллельности торцов световодов и шероховатости на торцевой поверхности световодов предложена оригинальная технология обработки торца световода, направленная на уменьшение уровня вносимых оптических потерь. Разработанная технология базируется на известной, но окончательная полировка выполняется не на сухом материале, а на материале, увлажненном жидкостью на основе дистиллированной воды. Отличие предложенной технологии – в повышении качества полировки торца, что ведет к снижению уровня отраженного сигнала и увеличению возвратных потерь соединителя.

Проведен сравнительный анализ соединителей, выполненных по известной и разработанной новой технологиям. Измерены оптические потери, вносимые соединителями. При проведении измерений использовался оптический тестер OLT-20A. Из партии в 100 образцов, выполненных по известной технологии, 40 образцов имели оптические потери в диапазоне 0,00–0,05 дБ; остальные – в диапазоне 0,05–0,15 дБ. Из партии в 100 образцов, выполненных по новой технологии, 76 образцов имели оптические потери в диапазоне 0,00–0,05 дБ; остальные – в диапазоне 0,05–0,15 дБ [8].

Торцевые биения по дорожкам качения внутреннего и наружного колец устраняются давлением на внутреннее кольцо подшипника пружины, причем это давление передается через фланец оптического наконечника и плотную посадку подшипника на этом наконечнике. Тем самым, пружина решает две задачи: устранение торцевого биения по дорожкам качения внутреннего и наружного колец подшипников и обеспечение механического контакта между оптическими наконечниками. В конечном итоге решение этих задач направлено на достижение минимальных вносимых потерь, вызванных продольным рассогласованием световодов.

Вращающийся соединитель [9] является основным элементом волоконно-оптической линии связи мобильных телевизионных комплексов. Вносимые оптические потери



**Рис. 3. Волоконно-оптический вращающийся соединитель:**  
 1 – корпус соединителя, 2 – волоконные световоды,  
 3 – сферические поверхности торцов оптических  
 наконечников, 4 – оптические наконечники, 5 – подшипники,  
 6 – разделительное кольцо, 7 – пружины,  
 8 – накидные гайки, 9 – прокладки под пружины,  
 10 – фланец оптического наконечника

соединителя для оптического кабеля на основе кварцевого волоконного световода 50/125 мкм не превышают 1 дБ.

### ВЫВОДЫ

1. Предложен метод расчета соединителей волоконных световодов, позволяющий по заданной величине вносимых потерь определять величины допусков на рассогласование соединяемых световодов и конструктивные параметры соединителя.

2. Создан простой в конструкции и надежный в эксплуатации вращающийся соединитель для волоконно-оптической линии связи мобильных телевизионных комплексов. Требуемый уровень оптических потерь достигнут за счет точности изготовления оптических наконечников и выбора подшипников с допусками, удовлетворяющими требованиям теоретического расчета.

### Литература

- Куликов А.Н. Телевизионные наблюдения в сложных условиях // Специальная техника. – 2000. – № 5.
- Ларин Ю.Т. Оптические кабели связи. Неразъемные соединения. Ч. 1. – М.: Информэлектро, 1991.
- Бутусов М.М., Галкин С.Л., Орбинский С.П., Пал Б.П. Волоконная оптика и приборостроение. Под общ. ред. Бутусова М.М. – Л.: Машиностроение. Ленинград. Отд-ние, 1987.
- В.В. Моисеев, В.Т. Потапов, А.А. Соколовский, В.А. Свиридов. Волоконно-оптические датчики линейных перемещений // Радиотехника. – 1982. – Т. 37. – № 6.
- Семенов Н.А. Оптические кабели связи. – М.: Радио и связь, 1981. – С. 152.
- Потапов В.Т., Соколовский А.А., Шatrov А.Д. Лучевой расчет возбуждения многомодового оптического волокна // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23. – № 4.
- Андрушко Л.М., Гроднев И.И., Панфилов И.П. Волоконно-оптические линии связи. – М.: Радио и связь, 1984. – С. 135.
- Алимов А.Е., Григорьев В.А., Казаков А.С., Самович В.А., Самович В.В. «Особенности использования оптических кабелей в линиях связи для цифрового телевидения». Тезисы докладов на пятой международной научно-технической конференции «Современные телевизионные технологии: состояние и направления развития», ЗАО МНИТИ, Москва, 20–21 октября, 2010 г.
- Патент № 2402051 РФ, 4.12.2008 г. Универсальный волоконно-оптический вращающийся соединитель, Шабаров В.Т., Сучков В.И., Алимов А.Е., Григорьев В.А.

## «Севкабель–Холдинг» будет конструировать оборудование для атомных станций

НИИ «Севкабель» получил лицензию на конструирование оборудования для атомных станций. Лицензия выдана на основании решения Северо-Европейского межрегионального территориального управления по надзору за ядерной и радиационной безопасностью Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору.

До получения лицензии предприятия холдинга осуществляли поставки ограниченной номенклатуры кабельно-проводниковой продукции, что не позволяло в полной мере удовлетворять требования заказчиков.

