

## УДК 654.022

А. С. БУТ – студент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, doctorhaos96@gmail.com

Т. Н. СЕРДЮК – к. т. н., доцент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru

# ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ И СИСТЕМ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ

*Статью представил д. физ.-мат. н., проф. В. И. Гаврилюк*

### **История развития оптоволоконных линий. Постановка проблемы**

На сегодняшний день практически все слышаны об оптоволокне, некоторых его характеристиках, особенно о высокой пропускной способности передаче данных. Однако история развития, особенности построения и расчета, достоинства и недостатки, которые проявляются в условиях эксплуатации таких линий Украинских железных дорог представляют немалый интерес. Изучения данного вопроса и посвящена данная статья.

Первый представитель был запатентован американским ученым Норманном Френчем в 1934 году, он получил патент на оптическую телефонную систему, речевые сигналы в которой передавались при помощи света по стержням чистого стекла. В 1962 г. был создан полупроводниковый лазер и фотодиод, используемые как источник и приемник оптического сигнала.

Резкому переходу от медных линий связи к оптоволоконным линиям передачи данных препятствовало большое затухание сигнала, что не давало передавать четкий сигнал на большие расстояния. Только в 1970 году компании «Corning» удалось наладить коммерческое производство волокна с низким затуханием – до 17 дБ/км, через пару лет – до 4 дБ/км. Волокно являлось многомодовым и по нему передавалось несколько мод света. К 1983 году был

освоен выпуск одномодовых волокон, по которым передавалась одна мода.

Впервые на территории СНГ оптоволоконная линия передачи была применена на участке Санкт-Петербург – Аберслунд (Дания), что было одним из прорывов наших стран в эру глобальных цифровых сетей [4].

Стекланные оптические волокна делаются из кварцевого стекла, но для дальнего инфракрасного диапазона могут использоваться другие материалы, такие как фторцирконат, фторалюминат и халькогенидные стекла. Как и другие стекла, эти имеют показатель преломления около 1,5.

В настоящее время развивается применение пластиковых оптических волокон. Сердечник в таком волокне изготавливают из полиметилметакрилата (РММА), а оболочку из фторированных РММА (фторполимеров).

На современном рынке сетевого оборудования представлено множество видов оптоволоконных кабелей, однако сами волокна в них мало чем отличаются друг от друга. Кроме этого, волокна, из которых собирают кабели, производит совсем маленькое число предприятий. К числу самых известных относятся АТ&Т и Fujikura.

Целью работы является проведение анализа существующих видов оптоволоконных линий и кабелей, оценить достоинства и недостатки, возникающие при их обслуживании, и определить направление в модернизации линий связи железных дорог Украины.

### **Виды линий связи. Достоинства и недостатки**

Рассмотрим некоторые особенности эксплуатации линий связи и сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), которые встречаются на Украине.

Линия связи или СЦБ, состоящая из стальных, медных или биметаллических проводов, подвешенных на деревянных или железобетонных опорах. Подвеска проводов производится посредством изоляторов, насаженных на крючья, ввинченные в столбы, или на штыри, установленные на траверсах. Воздушные линии (ВЛ), связывающие между собой железнодорожные пункты, прокладываются вдоль железнодорожного полотна. На перегоне расстояние нижней токи проводов от земли при максимальной стреле провеса не менее 2,5 м, а при пересечении железнодорожных путей – не менее 7,5 м от головки рельса согласно ПТЭ. Недостатками воздушных линий являются подверженность атмосферным влияниям (дождя, снега, росы, инея, грозы, гололеда и пр.) и небольшой срок службы (20...25 лет). Преимуществами их являются: дешевизна, быстрота постройки, простота, обуславливающие чрезвычайно широкое ее распространение на железных дорогах Украины в XX веке [9].

К тому же воздушные линии связи не обеспечивают необходимое количество каналов, стоимость их обслуживания высокая, а надежность низкая. На участках с автоблокировкой или диспетчерской централизацией необходимо иметь не менее 12 групповых каналов технологической связи и 14 двухпроводных цепей для систем автоматики и телемеханики, чего воздушные линии обеспечить не могут.

Кабельные линии (КЛ). Их прокладывают в местах, где строительство ВЛ невозможно из-за стесненной территории, неприемлемо по условиям техники безопасности, нецелесообразно по экономическим, архитектурно-планировочным показателям или другим требованиям.

Наибольшее применение КЛ нашли при передаче и распределении электрической энергии на промышленных предприятиях, в городах, переходе через большие водные пространства и т. п. Достоинствами кабельных линий в сравнении с воздушными являются неподверженность атмосферным воздействиям, скрытность трассы и недоступность для посторонних лиц, меньшая повреждаемость, компактность линии и возможность широкого развития электроснабжения потребителей городских и промышленных районов. Однако КЛ значительно дороже воздушных того же напряжения (в среднем в 2-3 раза для линий напряжением 6...35 кВ и в 5...6 раз для линий 110 кВ и выше), сложнее при сооружении и эксплуатации.

Однако помимо преимуществ кабельные линии обладают и рядом недостатков, которые значительно снижают их надежность. Это осушение изоляции из-за перемещения или стекания пропиточного состава, электрическое старение, высыхание изоляции кабелей, работающих в тяжелых тепловых режимах, часто связанное с разложением пропиточного состава (кристаллизация) и т. д. К повреждениям кабелей могут приводить как заводские дефекты, так и механические повреждения, которые были нанесены при прокладке или последующих раскопках и других строительных работах, выполняемых в зоне кабельных трасс. В КЛ могут появляться спиралевидные вспучины (трещины) как результат длительного действия циклов нагрева и охлаждения или значительных перегрузок кабеля более допустимых норм. Межкристаллические разрушения свинцовой оболочки под действием сотрясений и вибраций; грунтовая, химическая коррозия под воздействием разнообразных химических реагентов, которые содержатся в почве; разрушение оболочек кабелей блуждающими токами электрифицированного транспорта.

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) – это вид системы передачи, при

котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием "оптическое волокно". К ее достоинствам следует отнести широкую полосу пропускания, малое затухание светового сигнала в волокне, низкий уровень шумов, высокая помехозащищенность, малый вес и объем, гальваническая развязка элементов сети, высокая защищенность от несанкционированного доступа, экономичность, взрыво- и пожаробезопасность, удаленное электропитание, срок службы до 25 лет.

Недостатки волоконно-оптического кабеля сложность монтажа и механическая непрочность. Тем не менее, на сегодняшний день это самый качественный тип кабеля.

Передача информации по ВОЛС имеет целый ряд достоинств перед передачей по медному кабелю. Стремительное внедрение в информационные сети оптических линий связи является следствием преимуществ, вытекающих из особенностей распространения сигнала в оптическом волокне.

Следует отметить, что затраты на строительство линий связи составляют 60...80 % от общих затрат на сооружение глобальных сетей связи. Таким образом, тема статьи, связанная с поиском и разработкой рекомендаций по внедрению определенных типов оптоволоконных кабелей на железных дорогах Украины, анализом опыта эксплуатации ВОЛС на Приднепровской железной дороге является актуальной задачей.

### Конструкция и область применения оптоволоконных линий

Конструкция оптоволоконного кабеля (рис. 1) не так сложна, как кажется на первый взгляд. Клэдинг (так называется внешний диаметр отражающей оболочки) – это постоянная величина, находящаяся в пределах  $125 \pm 2$  мкм. Для защиты кабеля от проникновения влаги и водорода применяют специальный полимерный лак (его слой

2...3 мкм, толщина слоя которого, входит в указанный размер). Для придания кабелю гибкости, и, при этом, сохранения его прочности, используют специальное защитное покрытие, которое называется буфер и изготавливается оно из эпоксиакриолата [5].

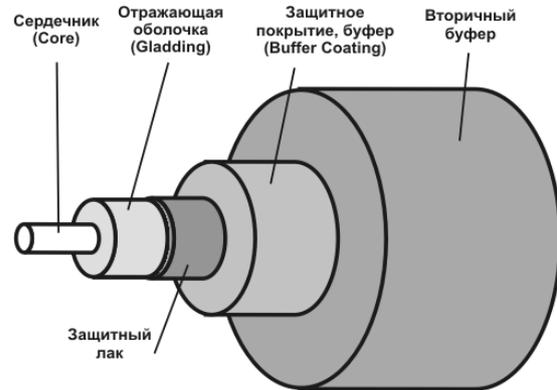


Рис. 1. Конструкция оптического волокна

Оболочка может иметь различные цвета. Это делают для облегчения работы монтажников (электромонтеров и электромехаников связи). Ее толщина равна  $250 \pm 15$  мкм. Для облегчения монтажа кабельной системы и повышения защиты, используют решения с вторичным буфером, диаметр которого 900 мкм. Все последующие части кабеля просто выполняют функцию защиты хрупких волокон от повреждений извне.

Существует два вида оптического волокна: одномодовые (ОМ) и многомодовые (ММ) (рис. 2). Их разделяют в зависимости от размера сердцевинки. Использовать это разделение следует применительно к каждой из длин волн, но сегодняшний уровень развития технологий позволяет не учитывать этот параметр.

Если применяется многомодовое волокно, то диаметр сердечника превышает длину световой волны в два раза. Такой подход обеспечивает свету возможность распространения по нескольким модам одновременно независимо друг от друга. В связи с тем, что разные моды имеют разную длину, сигнал к приемнику будет поступать не одновременно.

Всем известное ступенчатое волокно (оптоволокно со ступенчатым профилем) не может использоваться в сетях, где планируется передача данных на высоких скоростях.

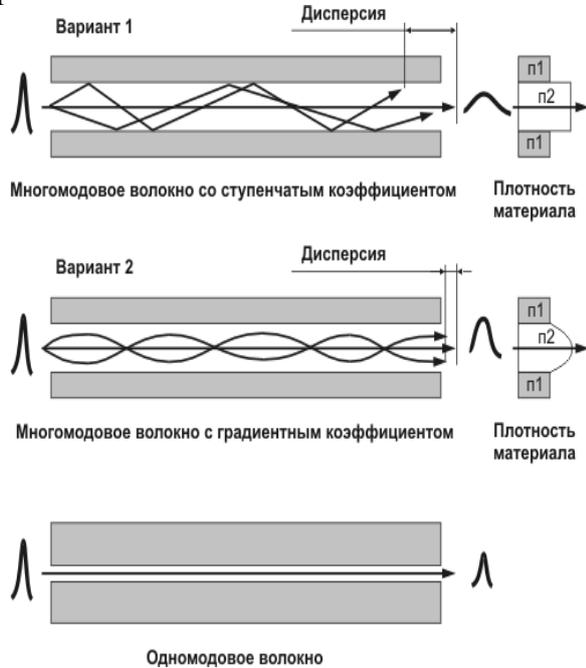


Рис. 2. Виды оптических волокон в зависимости от профиля: одно- и многомодовые

Связано это с тем, что оно имеет постоянный коэффициент преломления по всему сечению сердечника, а это вызывает большое модовое рассеивание.

Для решения этой проблемы [6] было разработано градиентное волокно (второй вариант). Для производства сердечника используют материал неравномерной плотности. На рис. 2 наглядно продемонстрировано сглаживание, которое значительно сокращает длину пути лучей. Кроме того, чем дальше луч от середины волокна, тем быстрее скорость его распространения. Таким образом, компенсируется дальность расстояние между станциями. Связано это с плотностью материала, которая снижается по параболическому закону на пути от центра к краю, и достигает своего минимума у самого края внешней границы. А, как уже упоминалось выше, скорость распростра-

нения увеличивается со снижением плотности среды передачи [6].

Так и получается, что поток данных выравнивается, благодаря изменению в плотности среды. Если ответственно подойти к вопросу подбора параметров, то можно добиться максимального сокращения разницы во времени распространения сигнала. Можно сделать вывод, что межмодовое рассеивание в градиентном волокне на порядок меньше, чем в оптоволокне, которое имеет постоянную плотность сердечника.

Получающийся в итоге поток данных сбалансирован, но не на 100%, поэтому используют волокна, имеющие как можно меньший диаметр сердечника. В таких волокнах проходит лишь один луч при заданной длине волны.

Самым популярным считается оптоволокно с диаметром сердечника 8 микрон, поскольку это позволяет передавать сигнал с длиной волны 1,3 мкм. Если источник сигнала не идеален, то будет наблюдаться межчастотная дисперсия, но она будет оказывать меньшее влияние, чем при межмодовой или материальной. Отсюда видно, что пропускная способность одномодового кабеля во много раз выше, чем многомодового.

Монтаж одномодового волокна потребует от специалиста высокой точности работ. Связано это с маленьким диаметром сердечника. Кроме того, если производится сварка или волокно соединяется с помощью разъемов, то допусков должно быть значительно меньше, по сравнению с монтажом многомодового волокна. В связи со всеми этими сложностями, большинство сетей, которые строились еще несколько лет назад, создавались с применением многомодовых кабелей.

В наше же время, существует реальное решение этих проблем. Если прибавить к этому еще и тот факт, что многомодовое волокно стоит в два раза дороже обычного одномодного, то можно предположить, что оно скоро будет вытеснено с рынка.

К числу ограничений на применение одномодовых кабелей можно отнести значительную стоимость оборудования. Совсем в недавнем прошлом, простейший конвертер для одномодной системы стоил почти тысячу долларов. На сегодняшний день стоимость уже не является решающим фактором, поскольку она выровнялась с ценой активного оборудования многомодового кабеля. К тому же использование одноволоконного оборудования сейчас носит массовый характер. Это окончательно сбивает многомодовый кабель с его доминирующей позиции.

Основные характеристики одно- и многомодовых оптоволоконных линий приведены в табл. 1 [7].

#### Волоконно-оптические линии передачи

Волоконно-оптическая линия передачи (ВОЛП) – волоконно-оптическая система, состоящая из пассивных и активных элементов, предназначенная для передачи информации в оптическом (как правило – ближнем инфракрасном) диапазоне [1].

ВОЛП имеет два типа элементов пассивные и активные. Опишем распространённые активные элементы.

Мультиплексор/ демультиплексор – широкий класс устройств, предназначенных для объединения и разделения информационных каналов. Мультиплексоры и демультиплексоры могут работать как во временной, так и в частотной областях, могут быть электрическими и оптическими (для систем со спектральным уплотнением).

Регенератор – устройство, осуществляющее восстановление формы оптического импульса, который, распространяясь по волокну, претерпевает искажения. Регенераторы могут быть как чисто оптическими, так и электрическими, которые преобразуют оптический сигнал в электрический, восстанавливают его, а затем снова преобразуют в оптический.

Усилитель – устройство, усиливающее мощность сигнала. Усилители также могут быть оптическими и электрическими, осуществляющими оптико-электронное и электронно-оптическое преобразование сигнала.

Таблица 1

Основные параметры одно- и многомодовых оптоволоконных линий

Параметры	Одномодовые	Многомодовые
Используемые длины волн	1,3 и 1,5 мкм	0,85 мкм, реже 1,3 мкм
Затухание, дБ/км	0,4 - 0,5	1,0 - 3,0
Тип передатчика	лазер, реже светодиод	светодиод
Толщина сердечника	8-9 мкм	50 или 62,5 мкм
Стоимость волокон и кабелей	Около 70% от многомодового	-
Средняя стоимость конвертера в витую пару Fast Ethernet	\$60	\$50
Дальность передачи Fast Ethernet	около 20 км	до 2 км
Дальность передачи специально разработанных устройств Fast Ethernet	более 100 км	до 5 км
Возможная скорость передачи	10 Гб и более	до 1 Гб. на ограниченной длине
Историческая область применения	телекоммуникации	локальные сети

Лазер – источник монохромного когерентного оптического излучения. В системах с прямой модуляцией, которые являются наиболее распространёнными, лазер одновременно является и модулятором, непосредственно преобразующим электрический сигнал в оптический.

Модулятор – устройство, модулирующее оптическую волну, несущую информацию по закону электрического сигнала. В большинстве систем эту функцию выполняет лазер, однако в системах с непрямой модуляцией для этого используются отдельные устройства.

Фотоприёмник (фотодиод) – устройство, осуществляющее оптоэлектронное преобразование сигнала [8].

К пассивным элементам ВОЛП относятся:

- оптический кабель, светонесущими элементами которого являются оптические волокна. Наружная оболочка кабеля может быть изготовлена из различных материалов: поливинилхлорида, полиэтилена, полипропилена, тефлона и других материалов. Оптический кабель может иметь бронирование различного типа и специфические защитные слои (например, мелкие стеклянные иглы для защиты от грызунов);

- оптическая муфта – устройство, используемое для соединения двух и более оптических кабелей;

- оптический кросс – устройство, предназначенное для оконечивания оптического кабеля и подключения к нему активного оборудования.

Исходя из изложенного выше материала и изучив источники [1 – 8], можно определить преимущества и недостатки данной системы передачи сигналов.

Преимуществами волоконно-оптической линии передач являются:

- малое затухание светового сигнала в волокне. Выпускаемое в настоящее время отечественными и зарубежными производителями промышленное оптическое волокно имеет затухание 0,2...0,3 дБ на длине волны 1,55 мкм в расчете на один кило-

метр. Малое затухание и небольшая дисперсия позволяют строить участки линий без ретрансляторов протяженностью до 100 км и более. Усилители в ВОЛП могут ставиться через 40, 80 и 120 километров, в зависимости от класса оконечного оборудования;

- высокая пропускная способность оптического волокна позволяет передавать информацию на высокой скорости, недостижимой для других систем связи;

- широкая полоса пропускания – обусловлена чрезвычайно высокой частотой несущей 10<sup>14</sup> Гц. Это дает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду. Большая полоса пропускания – это одно из наиболее важных преимуществ оптического волокна над медной или любой другой средой передачи информации;

- высокая надёжность оптической среды: оптические волокна не окисляются, не намокают, не подвержены слабому электромагнитному воздействию;

- низкий уровень шумов в волоконно-оптическом кабеле и высокая помехозащищённость позволяет увеличить полосу пропускания, путем передачи различной модуляции сигналов с малой избыточностью кода. Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, способного индуцировать электромагнитное излучение (линии электропередачи, электродвигательные установки и т.д.). В многоволоконных кабелях также не возникает проблемы перекрестного влияния электромагнитного излучения, присущей многопарным медным кабелям;

- высокая защищённость от межволоконных влияний – уровень экранирования излучения более 100 дБ. Излучение в одном волокне совершенно не влияет на сигнал в соседнем волокне;

- гальваніческа розв'язка елементів мережі. Даний перевага оптичного волокна заключається в його ізолюючому властивості. Волокно допомагає уникнути виникнення електричних "земельних" петель, які можуть з'являтися в разі, коли два мережні пристрої незізолюваної обчислювальної мережі, з'єднані мідним кабелем, мають заземлення в різних точках будівлі, наприклад, на різних поверхах. При цьому може виникнути велика різниця потенціалів, що здатно пошкодити мережне обладнання. Для волокна цієї проблеми просто немає;

- інформаційна безпека – інформація по оптичному волокну передається «із точки в точку» і підслухати або змінити її можна тільки шляхом фізичного втручання в лінію передачі;

- пожежо- і вибухобезпека при зміні фізичних і хімічних параметрів. Через відсутність іскроутворення оптичне волокно підвищує безпеку мережі на хімічних, нафтопереробних підприємствах, при обслуговуванні технологічних процесів підвищеного ризику;

- малі габарити і вага. Волоконно-оптичні кабелі мають меншу вагу і об'єм порівняно з мідними кабелями в розрахунок на одну і ту ж пропускну здатність. Наприклад, 900-парний телефонний кабель діаметром 7,5 см, може бути замінен одним волокном з діаметром 0,1 см. Якщо волокно "одягти" в багато захисних оболонок і покрити сталевим броньованим покриттям, діаметр його буде 1,5 см, що в кілька разів менше розглянутого телефонного кабелю [4, 8, 11, 12].

Недоліками волоконно-оптичних ліній є:

- відносна крихкість оптичного волокна. При сильному вигині кабелю можливе ламання волокон або їх помутніння через виникнення мікротріщин, тому при прокладці кабелю необхідно використовувати рекомендації виробника оптичного кабелю (де, зокрема, нор-

мується мінімальний допустимий радіус вигину). Тому ВОЛП потребують спеціальну механічну захист. Теоретично ВОЛП міцні. Стекло як матеріал витримує колосальні навантаження з межею міцності на розрив вище ( $109 \text{ Н/м}^2$ ). На практиці це не досягається. Причина в тому, що оптичне волокно, якби ідеальним воно не було, має мікротріщини, які ініціюють розрив. Для підвищення надійності оптичне волокно при виготовленні покривається спеціальним лаком на основі епоксидної смоли, а сам оптичний кабель зміцнюється, наприклад нитями на основі кевлара (kevlar). Якщо потрібно задовольнити ще більш жорстким умовам на розрив, кабель може зміцнюватися спеціальним сталевим тросом або склопластиковими стержнями. Але це веде до збільшення вартості оптичного кабелю.;

- складність з'єднання в разі розриву;

- складна технологія виготовлення, як самого волокна, так і компонентів ВОЛП;

- монтаж і обслуговування оптичних ліній. Вартість робіт по монтажу, тестуванню і підтримці волоконно-оптичних ліній зв'язу також залишається високою. Якщо пошкоджується кабель, то необхідно виконувати зварку волокон в місці розриву і захищати цей ділянку кабелю від впливу зовнішнього середовища. Виробники тем часом надають на ринок все більш досконалі інструменти для монтажних робіт з ВОЛП, знижуючи ціну на них;

- складність перетворення сигналу (в інтерфейсному обладнанні);

- відносна дорожнєздатність оптичного кінцевого обладнання. Однак, співвідношення ціна / пропускну здатність для ВОЛП краще, ніж для інших систем;

- помутніння волокна через радіаційне опромінення (однак, існують легіровані волокна з високою радіаційною стійкістю) [8, 11, 12].

Достоинства волоконно-оптичних ліній обумовило їх широке застосування в телекомунікаційних мережах різних рівнів – від міжконтинентальних магістралей до корпоративних і домашніх комп'ютерних мереж, ліній зв'язу залізничних доріг.

### Розрахунок параметрів оптичного волокна

Одномодове оптичне волокно є спрямованою системою для поширення електромагнітних хвиль. Для поширення по світловоду використовується явище повного внутрішнього відбиття на межі двох діелектричних середовищ з коефіцієнтами заломлення  $n_1$  і  $n_2$ , де  $n_1 = \sqrt{\mu_1 \varepsilon_1}$  – коефіцієнт заломлення для сердечника – середовища поширення хвилі, обмежене оболочкою з коефіцієнтом заломлення  $n_2 = \sqrt{\mu_2 \varepsilon_2}$ , при цьому  $n_1 < n_2$ .

Середовищем поширення і обмеження є особливе чисте кварцове скло з різною концентрацією легируючих домішок для отримання різних показувальних заломлення  $n_1 = 1,46$  і  $n_2 = 1,445$  (для кабелю типу ОКТБГ, одномодового, діаметром 50/125 мкм, випускаемого «Одеса-кабель» [13]).

Визначити відносне значення показувальних заломлення можна за формулою:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (1)$$

Вставив числові значення, отримаємо

$$\Delta = \frac{1,46 - 1,445}{1,46} = 0,01$$

По оптичному волокну ефективно передаються тільки промені, закриті всередині телесного кута  $\varphi$ , величина якого обумовлена кутом повного внутрішнього відбиття. Параметр світловоду, який характеризує виконання даного умови, називається числовою апертурою світловоду  $NA$ :

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_0 \sin \varphi_a, \quad (2)$$

де  $\varphi_a$  – апертурний кут, тобто кут між оптичною оссю і однією з образуючих світлового конуса, падаючого в торець волоконного світловоду, при якому кут падіння дорівнює критичному куту;  $n_0$  – коефіцієнт заломлення середовища, з якого промінь потрапляє в світловід (для повітря  $n_0 = 1$ ).

Вставив числові значення, отримаємо

$$NA = \sqrt{1,46^2 - 1,445^2} = 0,2087, \\ \varphi_a = \arcsin 0,2087 = 12,04^\circ$$

Для одномодового оптичного волокна діаметр сердечника вибирається таким, щоб забезпечити умови поширення тільки декількох мод. В цьому випадку, з умови одномодової передачі, нормована частота дорівнює:

$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3)$$

де  $d = 50$  мкм – діаметр сердечника волоконно-оптичного кабелю;  $\lambda = 1,3$  мкм – довжина хвилі джерела оптичного випромінювання.

Таким чином, нормована частота відсічки в даному типі кабелю дорівнює

$$V = \frac{\pi \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{1,3 \cdot 10^{-6}} \sqrt{1,46^2 - 1,445^2} = 5,043$$

Область існування хвилі, що має нормовану частоту відсічки  $V > V_0$ , складає  $f > f_0$ , де  $V_0$  – критична нормована частота, а  $f_0$  – критична частота, Гц [14].

При передачі 12 мод в кабелі типу ОКТБГ використовуються гібридні хвилі  $HE_{12}$ ,  $EH_{11}$ ,  $HE_{31}$  при нормованій частоті  $V = 3,832 \dots 5,316$ , а 16 мод – використовуються гібридні хвилі  $EH_{21}$ ,  $HE_{41}$  при нормованій частоті  $V = 5,316 \dots 5,52$ . Як видно з розрахунків, при заданих параметрах забезпечується дванадцятимодова передача.

Одномодовый режим практически достигается при применении очень тонких волокон, равных по диаметру длине волны  $d \approx \lambda$ . Кроме того, надо стремиться к уменьшению разницы между показателями преломления сердечника и оболочки  $n_1 \approx n_2$ .

Минимальная длина волны, при которой в волокне распространяется фундаментальная мода  $HE_{11}$ , называется волоконной длиной волны отсечки

$$\lambda_{00} = \frac{\pi d}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (4)$$

Однако на практике больший интерес представляет, так называемая, кабельная длина волны отсечки, которая смещена относительно  $\lambda_{00}$  в область более длинных волн из-за влияния механических напряжений, возникающих при укладке оптического волокна в кабель.

Диаметр сердечника волоконного световода для одномодовой передачи может быть определен из следующей формулы:

$$d \leq \frac{2,405 \lambda_0}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}. \quad (5)$$

Одномодовая передача реализуется на гибридной волне  $HE_{11}$ . Эта волна имеет нулевое значение корня бесселевой функции  $P_{nm} = 0,000$ , следовательно, она не имеет критической частоты и может распространяться при любой частоте. Все другие волны имеют конечное значение частоты и они не распространяются на частотах ниже критической. Интервал значений  $P_{nm}$ , при которых распространяется лишь один тип волны  $HE_{11}$  находится в пределах  $0 < P_{nm} < 2,25$ . Поэтому при выборе диаметра сердцевинки ОВ и выборе частоты передачи исходим из этого условия  $P_{nm} = 2,25$ .

Рассчитаем первичные параметры одномодового кабеля с показателями преломления среды  $n_1 = 1,46$  и  $n_2 = 1,457$

Относительное значение показателя преломления по формуле (1):

$$\Delta = \frac{1,46 - 1,457}{1,46} = 0,0021.$$

Числовая апертура по формуле (2) равна:

$$NA = \sqrt{1,46^2 - 1,457^2} = 0,094, \\ \varphi_a = \arcsin 0,094 = 5,4^\circ.$$

Как упоминалось выше, для одномодового волоконно-оптического кабеля диаметр сердечника выбирается таким, чтобы обеспечить условия распространения только одной моды  $HE_{11}$ . В этом случае, из условия одномодовой передачи, нормированная частота по формуле (3):

$$V = \frac{\pi \cdot 9,6 \cdot 10^{-6}}{1,3 \cdot 10^{-6}} \sqrt{1,46^2 - 1,457^2} = 2,17,$$

где  $d = 9,6 \text{ мкм}$  – диаметр сердцевинки оптоволокна,  $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$  – длина волны источника оптического излучения.

Определим критическую частоту, Гц, при которой распространяется лишь один тип волны  $HE_{11}$ :

$$f_0 = \frac{P_{nm} c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \quad (6)$$

где  $c$  – скорость света,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

$$f_0 = \frac{2,25 \cdot 3 \cdot 10^8}{\pi \cdot 9,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,46^2 - 1,457^2}} = \\ = 2,393 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

Длину волны, излучаемую источником оптического излучения, определим по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{f_0}, \quad (7)$$

Подставив значения, получим

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{2,393 \cdot 10^{14}} = 1,254 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Чтобы волоконный световод имел одномодовый режим передачи необходимо:

1. Длина волны источника оптического излучения должна быть соизмерима с диа-

метром волоконного световода  $\lambda = 1,254 \approx 9,6 \text{ мкм}$  (условие выполнено).

2. Показатели преломления сердечника и оболочки ( $n_1$  и  $n_2$ ) должны отличаться незначительно, что характеризует параметр  $\Delta$ . Для одномодового волокна  $\Delta = 0,0015 \dots 0,03$ . Полученная величина  $\Delta = 0,0021$  удовлетворяет данному интервалу.

3. Для одномодового световода нормированная частота должна быть менее 2,405. Полученная величина  $V = 2,17 < 2,405$  (допустимая нормированная частота 2,405).

Таким образом, при применении одномодового режима передачи, реализуемого на гибридной волне  $HE_{11}$ , длиной передаваемой волны  $\lambda = 1,254 \approx 1,3 \text{ мкм}$ .

При использовании многомодового режима передачи, реализуемого на кабелях типа ОКТБг, выпускаемого «Одескабель», при передаче 12 мод возможно применить гибридные волны  $HE_{12}$ ,  $EH_{11}$ ,  $HE_{31}$  при нормированной частоте  $V = 3,832 \dots 5,316$ , а 16 мод – гибридные волны  $EH_{21}$ ,  $HE_{41}$  при нормированной частоте  $V = 5,316 \dots 5,52$ .

### **Применение оптоволоконных линий на железных дорогах Украины**

К сожалению, на украинских железных дорогах оптоволоконные линии связи начали использовать относительно недавно. В то время как, на железных дорогах России оно начало появляться в начале 90-х годов.

На железной дороге используют подвешенной оптоволоконный кабель, который может иметь усиленный центральный трос или кевларовую оболочку, берущую на себя основную силовую нагрузку.

Кевлар применяется в целях облегчения кабеля с одновременным усилением сопротивления разрыву. Кроме того, если подвес делают рядом с электрифицированными железными дорогами, к примеру, то вместо металла используют кевлар – во избежание электромагнитных наводок и исключения

мешающего и опасного действия системы электроснабжения поездов и железнодорожной автоматики.

Такой кабель выполняется полностью диэлектрическим и может крепиться на опорах линий освещения, низковольтных линиях электропередачи и т.п.

Для ВОЛП, применяемых для подвеса на опорах высоковольтных ЛЭП недостаточно быть диэлектрическим. При подвесе на опорах высоковольтных линий необходимо также защитить кабель от коротких замыканий проводов ЛЭП, а также от ударов молний. Так как в этом случае высокая температура, возникающая при разряде, попросту портит кабель.

Для этих целей предназначена грозозащитная армированная оболочка, состоящая из алюминированных стальных или алдеревых проволок. Она сохраняет температуру внутри оптоволоконна на допустимом уровне.

Реже самонесущий кабель просто обвивается вокруг грозозащитного троса. В этом случае конструкция кабеля облегчена – силовой элемент тоньше, поскольку часть сопротивления разрыву берет на себя трос.

Проведения подземных кабельных коммуникаций – это использование кабельной канализации. Это удешевляет стоимость прокладки сети, так как сама канализация уже построена, и можно сэкономить на защите кабеля.

Оптоволоконный кабель в этом случае идет с минимальной броней. Представлена она металлической гофрированной лентой, которая защищает кабель от повреждения грызунами.

При прокладке в туннелях и коллекторах также не требуется усиленная защита.

При прокладке подземного оптического кабеля используется броня посерьезнее и состоит она из металлической проволоки, расположенной по кругу. Однако защитить, скажем, от экскаватора она не сможет. Именно поэтому в грунте на некотором расстоянии над кабелем дополнительно прокладывается специальная лента сиг-

нальных цветов с надписями: «Не копать», а наверху устанавливаются предупреждающие таблички.

На предприятиях Укрзалізничці используются волоконно-оптические кабели, изготовленные на отечественных заводах: «Южкабель» и «Одескабель», их зарубежные аналоги.

Так, на Приднепровской железной дороге на участке станция Нижнеднепровск-Узел – МТС Херсонская используются ВОЛП протяженностью 24 км, марка кабеля: ОКТБг – 16 ОВ, диаметр 9,6 мм, производство: Одескабель, дата прокладки 2007 г.

Кабель типа ОКТБг предназначен для прокладки непосредственно в грунтах всех категорий, в том числе в районах с высокой коррозионной агрессивностью и территориях, зараженных грызунами, кроме подвергаемых мерзлотным и другим деформациям. Может прокладываться в кабельной канализации, трубах, блоках, по мостам, эстакадам, а также по наружным стенам зданий и сооружений [13]. Стойкость к продольному проникновению воды у данного типа кабеля – F5, т. е. отсутствует влага на свободном конце кабеля.

Структура кабеля: оптические волокна, сгруппированные в пучки, тиксотропный гидрофобный наполнитель, центрально-расположенная трубка, силовой элемент – продольно расположенные стальные проволоки, броня из гофрированной стальной ламинированной ленты, защитный шланг из полиэтилена, шнур режущий.

Варианты исполнения – оптические волокна, свободно уложенные в центральной трубке, силовой элемент – арамидные нити или стеклонити, оболочка из полиэтилена, специальный защитный шланг, устойчивый к термитам, защитный шланг из ПВХ пластика или компаунда, нераспространяющего горение, низкодымного, безгалогенного. Основные технико-эксплуатационные характеристики кабеля ОКТБг приведены в табл. 2 [13].

Таблица 2

Основные технико-эксплуатационные характеристики ОКТБг

Параметр	Испытания в соответствии с IEC 60794-1	Значение
Количество ОВ в кабеле, шт.	-	2...144
Масса кабеля, кг/км	-	110...350
Диаметр кабеля, мм	-	9...19
Допустимое растягивающее усилие, кН	E1	1,0...3,5
Допустимое раздавливающее усилие, не более, Н/100 мм	E3	3000
Стойкость к ударам, Н·м	E4	15
Минимальный радиус изгиба, мм	E11	20 диаметра в кабеля
Диапазон рабочих температур, °С	F1	-40...+60
Диапазон температур хранения, °С		-50...+60
Диапазон температур монтажа, °С		-10...+60

Расчеты, обосновывающие выбор данного типа кабеля, приведены выше.

Другой участок «Днепропетровск – Синельниково» протяженностью 51 км, обо-

рудован ВОЛП с маркой кабеля: A-DF(ZN)2Y 4x12+1 x4E9/125 1,36F3,5+0,22 H18 1x4E10/125 0,25HG 3,72G производства Alcatel. Данный кабель является одномодовым с 4 стеклянными волокнами [7, 8]. Наличие композитного материала из стеклянных нитей и ваты вокруг центральной части кабеля компенсирует натяжение и обеспечивает водонепроницаемость в продольном направлении. В частности данный кабель используется под землей, в трубах, каналах, везде, где нет угрозы повреждения изоляции грызунами. Кабель был проложен в 2007 г.

Как показал опыт эксплуатации, достоинством данных типов кабелей является то, что в конструкции кабеля нет металлических элементов, на которых может быть наведено опасное или мешающее напряжение. С другой стороны это факт вносит определенные неудобства. Так при поиске места повреждения в этом кабеле нет возможности включить трассоискатель.

Основной недостаток волоконно-оптического кабеля проявляется в хрупкости оптических волокон. И, если при работе с этим кабелем не будет выдержан радиус укладки, то волокна могут повредиться, что приведет к искажению оптического сигнала передаваемого по этому кабелю.

### Вывод

Выполнен анализ существующих волоконно-оптических линий и кабелей, применяемых в качестве линий связи на железных дорогах Украины, в частности на ДП «Приднепровская железная дорога». Передача информации по ВОЛС имеет целый ряд преимуществ перед передачей по медному кабелю (проводу). Сюда следует отнести широкую полосу пропускания, малое затухание светового сигнала в волокне, низкий уровень шумов, высокую помехозащищенность, малый вес и объем, гальваническую развязку элементов сети, высокую защищенность от несанкционирован-

ного доступа, взрыво- и пожаробезопасность.

Как показал опыт внедрения и эксплуатации волоконно-оптических линий на Приднепровской железной дороге, главным достоинством данных типов кабелей является то, что в конструкции кабеля нет металлических элементов, на которых может быть наведено опасное или мешающее напряжение.

Однако прокладка и техническое обслуживание описанных типов линий влечет за собой и ряд трудностей. Во-первых, внедрение и их эксплуатация требует специально обученного персонала, бригад. Стоимость работ по монтажу, тестированию и поддержке волоконно-оптических линий связи на сегодняшний день остается высокой. Технология изготовления оптоволокна является сложной и дорогостоящей. Использование ВОЛП предполагает применение дорогостоящего оборудования в начале и конце линии (мультиплексор, демультиплексор, регенератор, усилитель, лазер, модулятор, фотоприемник и др.). Но, соотношение цена / пропускная способность для ВОЛП лучше, чем для других систем.

Таким образом, авторы считают применение ВОЛП в телекоммуникации перспективным направлением, что и выполняется ныне на модернизируемых и вновь проектируемых участках.

Выполнен расчет параметров одно- и многомодового волоконно-оптических кабелей. Стоимость одномодовых линий является более низкой, чем многомодовых. Пропускная способность одномодового кабеля во много раз выше, чем многомодового. Для одномодового световода нормированная частота должна быть менее 2,405. Передача сигналов организуется на гибридной волне  $HE_{11}$ . Показатели преломления сердечника и оболочки ( $n_1$  и  $n_2$ ) должны отличаться незначительно.

### Библиографический список

1. Виноградов, В. В. Линии железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [Текст] / В. В. Виноградов, С. Е. Кустишев, В. А. Прокофьев. – М.: Маршрут, 2002 – 416 с.
2. Листвин, А. В. Оптические волокна для линий связи [Текст] / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков. – М.: ЛЕСАРпт, 2003. – 98 с.
3. Gambling, W. A. The Rise and Rise of Optical Fibers [Текст] / W. A. Gambling // IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics. – Nov./Dec., 2000. – Vol. 6, No. 6. – P. 1084-1093.
4. Волоконно-оптический кабель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптический\\_кабель](https://ru.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптический_кабель).
5. Измерения кабелей с металлическими жилами [Электронный ресурс] / Режим доступа: [izmer-ls.ru](http://izmer-ls.ru)
6. Листин, А. В. Рефлектометрия оптических волокон [Текст] / А. В. Листвин, В. Н. Листвин. – М.: ЛЕСАРпт, 2005. – 150 с.
7. Волоконно-оптический кабель HELUCOM® A-DQ(ZN)2Y [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sivax.kiev.ua/shop/kabeli-i-provoda/volokonno-opticheskie-kabeli/HELUCOM-A-DQZN2Y.html>
8. MiniXtend Cable, LT, A-DQ(ZN)2Y, 4x12 E9/125 (OS2) [Электронный ресурс]: Corning. Optical Communications. – Режим доступа: [http://catalog.corning.com/opcomm/en-GB/catalog/ProductDetails.aspx?cid=loose\\_tube\\_outdoor\\_cables\\_web&pid=120305&vid=123171](http://catalog.corning.com/opcomm/en-GB/catalog/ProductDetails.aspx?cid=loose_tube_outdoor_cables_web&pid=120305&vid=123171)
9. Воздушная линия: Технический железнодорожный словарь [Электронный ресурс] / Н. Н. Васильев и др. – М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство. – Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/railway/478/>
10. Причины повреждения кабельных линий [Электронный ресурс] / Энергетика, оборудование, документация. – Режим доступа: <http://forca.ru/stati/srs/prichiny-povrezhdeniya-kabelnyh-linii.html>
11. Убайдуллаев, Р. Р. Преимущества и недостатки ВОЛС [Электронный ресурс] / Р. Р. Убайдуллаев // Тералинк. – Москва: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – Режим доступа: <http://www.teralink.ru/?do=printt&id=16>
12. Волоконно-оптическая линия передачи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптическая\\_линия\\_передачи](https://ru.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптическая_линия_передачи)
13. Бронированный волоконно-оптический кабель. Тип: ОКТБг [Электронный ресурс]: Волоконно-оптические кабели: Одаскабелью. – Режим доступа: <http://odeskabel.com/vok-rus/volokonno-opticheskie-kabeli-s-tsentralnoj-trubkoj/26-oktbg.html>
14. Типы волн в световодах. Критические длины и частоты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/YAT/TELECOMM/OPT\\_LS/METHOD/SAVIN\\_1/4.htm](http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/YAT/TELECOMM/OPT_LS/METHOD/SAVIN_1/4.htm)

**Ключові слова:** волоконно-оптичний кабель, довжина хвилі, одномодовий, багатомодовий, телекомунікація.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический кабель, длина волны, одномодовый, многомодовый, телекоммуникация.

**Keywords:** fiber-optical cable, telecommunication, wavelength, singlemode, multimode, telecommunication.

Поступила в редколлегию 10.05.2013