

## АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТОВОЛОКОННЫХ КАБЕЛЕЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Идея использовать свет для передачи информации появилась очень давно, но только сравнительно недавно технологии, использующие данный принцип, получили развитие и реальное применение на практике. Известно, что линии связи имеют значительные протяженности, такое же свойство имеют и линии электропередачи. Поэтому неудивительно, что совмещение прокладки или подвески оптоволоконных линий связи с линиями электропередачи стало очень распространенным явлением в последнее время. В связи с этим в настоящей работе рассматриваются возможности использования оптоволоконных кабелей в энергосистемах, физические принципы передачи данных по оптическому волокну, виды кабелей для подвески на линиях электропередачи, алгоритм выбора типа кабеля, способы монтажа, объем технического обслуживания, приведены примеры практического использования волоконно-оптических кабелей в ОЭС Украины.

Физическая возможность передачи данных по оптическому волокну обусловлена тем, что, согласно законам оптики, в средах с разной оптической плотностью луч света распространяется с разной скоростью. Попадая на границу двух прозрачных сред ( $n_1$  и  $n_2$ ), луч ( $\alpha$ ) частично отражается ( $\beta$ ), а частично преломляется ( $\gamma$ ). Угол отраженного луча равен углу падающего, а угол преломленного луча зависит от соотношения показателей преломления сред (рис. 1) [1].

Согласно закону Снеллиуса произведение синуса угла падающего и преломленного луча на соответствующие показатели преломления сред равны:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \gamma \quad (1)$$



Рис. 1. Отражение и преломление луча света на границе двух сред с различными значениями оптической плотности

Для того, чтобы преломленный луч не проникал во вторую среду, он должен двигаться вдоль границы раздела. Поскольку при этом  $\gamma = 90^\circ$ , то критический угол определяется по формуле:

$$\sin \alpha_{кр} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Эта формула объясняет эффект полного отражения, при котором луч, попавший на границу двух сред, первая из которых имеет показатель преломления больший, чем второй, под углом более критического, полностью отражается. Если же луч проходит в цилиндрическом световоде между параллельными стенками, то при угле входа более критического он никогда не пересечет боковую стенку световода. В качестве последнего используется оптическое волокно.

Оптическое волокно состоит из сердцевины и оболочки. Снаружи волокно покрывается защитным покрытием (рис. 2).

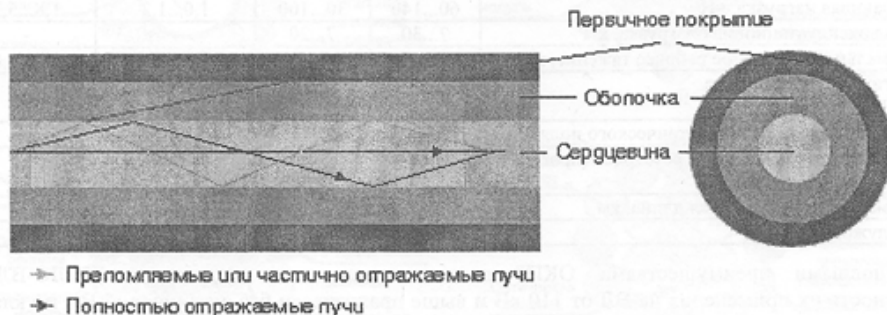


Рис. 2. Оптическое волокно

Сердцевина и оболочка изготавливаются из стекла или пластика, при этом оболочка имеет меньший показатель преломления, чем сердцевина.

Соотношение диаметров сердцевины и оболочки оптического волокна приведены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношение диаметров сердцевины и оболочки оптического волокна

Диаметр сердцевины, мкм	8	50	62,5	100
Диаметр оболочки, мкм	125	125	125	140

В настоящее время в оптоволоконной технике используются лучи света инфракрасного диапазона, которые имеют длину волны 0,85...1,5 мкм. При этом модулирующий источник имеет очень узкий спектр во избежание размывания сигнала на выходе. Поэтому в качестве источников используют лазеры или светодиоды. В качестве приемников излучения используют фотодиоды инфракрасного диапазона. От выбора источников и приемников света также зависит интегральная пропускная способность канала.

Несколько оптических волокон объединяются в волоконно-оптические кабели, которые отличаются своей конструкцией и назначением. Применительно к энергетике в основном используются кабели для подвески на линиях электропередачи и для прокладки в грунте или подземных коммуникациях, причем последние применяются достаточно редко и в незначительных масштабах. Поэтому остановимся более подробно на волоконно-оптических кабелях для подвески на линиях электропередачи [2].

В настоящее время наибольшее распространение получили 4 вида кабелей для подвески на воздушных линиях:

- оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос (ОКГТ);
- полностью диэлектрический оптический самонесущий кабель (ОКСН);
- оптический навивной кабель (ОКН);
- оптические прикрепляемые кабели (ОКП).

Типовые технические требования к рассматриваемым кабелям для подвески на воздушных линиях электропередачи представлены в табл. 2.

Таблица 2

Типовые технические требования к оптическим кабелям для подвески на ВЛ

Основные параметры и характеристики	ОКГТ	ОКСН	ОКН	ОКП
Класс напряжений ВЛ	110 кВ и выше	110 и 220 кВ	110 кВ и выше (ГТ) 110 кВ (ФП)	110 кВ и выше (ГТ) 35...110 кВ (ФП)
Максимальная длина пролета ВЛ, м	450...500	450...500	-	-
Диапазон рабочих температур, °С	-50 ... +60	-50 ... +60	-50 ... +60	-50 ... +70
Количество ОВ	16...48	16...48	8...32	8...24
Диаметр ОК, мм	13...20	15...20	6,2...8,4 (ГТ) 7,3...9,0 (ФП)	6,2...7,5
Масса ОК, кг/км	530...720	180...360	32...69 (ГТ) 52...77 (ФП)	40...54
Разрушающая нагрузка, кН	60...140	30...100	1,0...1,2	1,8...5,3
Средняя эксплуатационная нагрузка, кН	7...30	7...20	-	-
Максимально допустимое рабочее тяжение, кН	20...60	15...30	0,3	0,3...0,8
Допустимый ток КЗ, кА2 с (ток КЗ, кА за 0,3 с)	190...400 (25...40)	-	-	-
Допустимый потенциал электрического поля, кВ	-	12...25	-	-
Максимальная температура грозотроса (провода), °С	200	-	260...300	300
Максимальная строительная длина, км	4...6	4...6	2...4	4...6
Срок службы, лет	25	25	25	25

Основными преимуществами ОКГТ являются наивысшая надежность ВОЛС-ВЛ и возможность их применения на ВЛ от 110 кВ и выше практически без ограничений ВЛ по классу напряжений. Однако ОКГТ имеют наибольшую стоимость, требуют применения достаточно сложного технологического оборудования для их подвески и монтажа, а также значительных затрат на проектирование и монтаж ВОЛС-ВЛ. ОКГТ находят применение при строительстве магистральных ВОЛС и транспортных сетей различного масштаба. Особенно преимущества применения ОКГТ проявляются при строительстве новых ВЛ. Ввиду наивысшей надежности именно ОКГТ рекомендуется при строительстве не резервируемых магистральных линий связи.

Основными преимуществами ОКСН являются относительно небольшой вес и возможность разделения собственности, поскольку кабель не используется как часть энергосистемы. Как и в предыдущем случае, ОКСН находят применение при строительстве магистральных ВОЛС и транспортных магистралей цифровых первичных сетей (ЦПС) областного уровня и корпоративных сетей на существующих ВЛ.

Преимуществами ОКН служат высокая надежность ВОЛС, особенно при навивке на фазные провода или новый грозотрос, значительно более низкая стоимость проектных и монтажных работ, высокая скорость подвески и монтажа, малые дополнительные нагрузки на ВЛ, высокая технологичность и возможность проведения подвески и монтажа оптического кабеля на грозотросе без отключения ВЛ. Применение ОКН оправдано и перспективно для строительства как магистральных ВОЛС и транспортных магистралей ЦПС, так и сетей доступа к ЦПС.

К преимуществам ОКП можно отнести значительно более низкую стоимость оптического кабеля. К недостаткам ОКП следует отнести отсутствие широкой практики применения и опыта эксплуатации, а также низкую баллистическую стойкость.

Рассмотрим более подробно каждый тип кабелей.

**ОКГТ.** Оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос, является наиболее широко используемым решением для строительства ВОЛС-ВЛ. Доля ОКГТ составляет около 80% всех ВОЛС-ВЛ на вновь строящихся линиях и свыше 40% на реконструируемых.

В конструкции кабеля типа ОКГТ можно выделить сердечник или оптический модуль, содержащий оптические волокна, и внешний одинарный или двойной повив преформированных проволок. Стальная проволока, используемая в повивах ОКГТ, защищена от коррозии, для этого применяется так называемая плакированная алюминием проволока, которая существенно устойчивее к окислению, чем гальванизированная, ввиду большей толщины покрытия. Кроме того, ее проводимость выше, а прочность не ниже, чем у аналогичных стальных проволок. Также для обеспечения стойкости к токам короткого замыкания в повиве используют алюминиевые

проволоки. Комбинацией различного числа стальных и алюминиевых проволок добиваются необходимых характеристик по прочности на растяжение и стойкости к токам КЗ. Поскольку грозотрос подвержен частому действию разрядов молний, для наружного слоя используются проволоки диаметром не менее 2,5 мм и стараются, по возможности, избегать наличия алюминиевых проволок во внешнем повиве, из-за их низкой молниестойкости.

По конструктивному исполнению ОКГТ различных производителей можно условно разделить на четыре основные группы, отличающиеся размещением и конструктивным исполнением оптического сердечника. Конструкции их представлены на рис. 3.

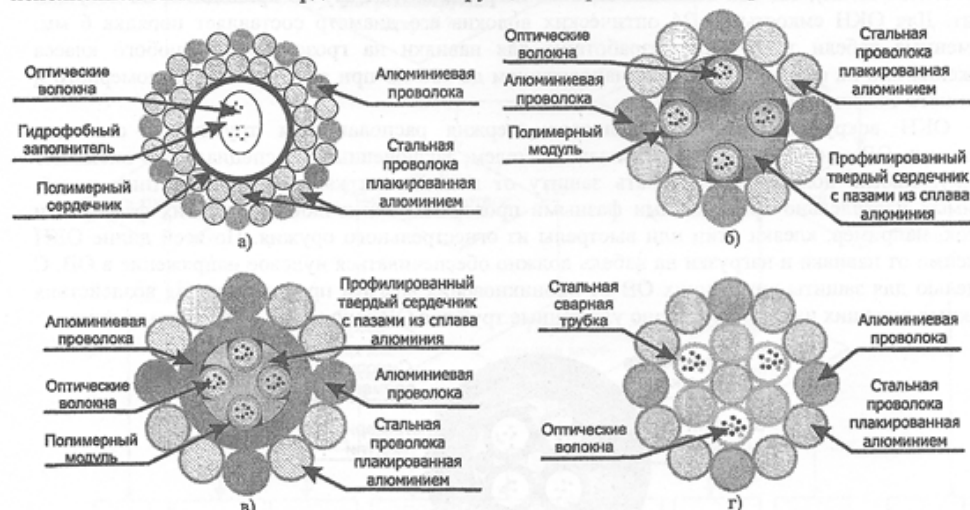


Рис. 3. Основные конструкции ОКГТ

**ОКСН.** Оптические самонесущие диэлектрические кабели предназначены для монтажа на опорах действующих ВЛ с подвеской на уровне нижней траверсы, либо по оси опоры ВЛ – в точке нулевого потенциала. Традиционно область применения ОКСН – ВЛ с относительно небольшими пролетами до 200...300 м. Так на ВЛ напряжением 10, 35 и 110 кВ, при отсутствии грозозащитного троса на линиях, кабель ОКСН является практически единственным решением для ВОЛС-ВЛ.

Наиболее распространенная конструкция ОКСН представляет собой оптический сердечник модульной скрутки, защищенный арамидными нитями, которые используются в качестве армирующих элементов (рис. 4). При этом оптические волокна находятся внутри трубок (модулей), выполненных из прочного полибутилентерефталата или полиамида, которые заполнены водоотталкивающим гелем. Различные компании используют, как правило, 5-ти или 6-ти элементную скрутку на центральный элемент, выполненный в виде стеклопластикового стержня, который, обладая отрицательным температурным коэффициентом, держит конструкцию при высоких температурах. Поверх скрученных модулей накладывается полиэтиленовая оболочка типа ПЭВП или ПЭНП, в зависимости от необходимой стойкости к раздавливанию. Для конструкций ОКСН, обеспечивающих баллистическую стойкость, внутренняя оболочка выполнена из специальных материалов повышенной прочности. На промежуточную оболочку приклеиваются арамидные нити, которые укладываются в два слоя противоположного повива. Прочная внешняя оболочка обеспечивает защиту ОКСН от внешних воздействий.

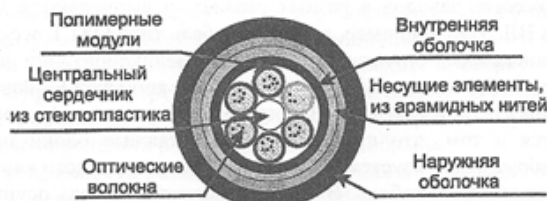


Рис. 4. Типовая конструкция ОКСН

Теоретически можно разработать ОКСН для очень большой длины пролета ВЛ из-за его малой массы, однако для пролетов длиной более 500 м ОКСН выпускают редко, поскольку цена на кабель растет логарифмически с увеличением количества используемых арамидных нитей. Кабель типа ОКСН удобно подвешивать и осуществлять его стыковку.

**ОКН.** Основная идея этой технологии состоит в том, чтобы использовать уже существующий грозозащитный трос или один из фазных проводов в качестве несущего элемента, на который наматывается специальный ОК – ОКН. При этом ОКН малогабаритный и имеет малую массу (около 40...50 кг/км), так как основная силовая нагрузка в этом случае приходится на несущий элемент. Для ОКН емкостью в 24 оптических волокна его диаметр составляет порядка 6 мм. Современные кабели типа ОКН разработаны для навивки на грозотрос ВЛ любого класса напряжения или на фазный провод ВЛ напряжением до 150 кВ при обеспечении равномерного и постоянного тяжения кабеля.

В ОКН вокруг центрального силового стержня располагаются трубки со свободно уложенными ОВ вместе с гидрофобным наполнителем, заключенными в специальную внешнюю оболочку. Кабель должен обеспечивать защиту от воздействия как электромагнитных полей, наводимых параллельно проходящими фазными проводами, так и любых внешних факторов и нагрузок, например, клевки птиц или выстрелы из огнестрельного оружия. По всей длине ОКН независимо от навивки и нагрузки на кабель должно обеспечиваться нулевое напряжение в ОВ. С этой целью для защиты внутренних ОВ от проникновения влаги и предотвращения воздействия возможных внешних нагрузок свободно уложенные трубки с ОВ заполнены специальным гелем.



Рис. 5. Конструкция ОКН

**Алгоритм выбора** в каждом конкретном случае подходящего типа волоконно-оптического кабеля представлен на рис. 6.

**Производством** волоконно-оптических кабелей для подвески на ВЛ в Украине занимаются два завода: ЗАО завод «Южкабель» и ОАО Одесский кабельный завод «Одескабель».

В настоящее время ЗАО завод «Южкабель» является крупнейшим предприятием в регионе по выпуску кабельно-проводниковой продукции и изделий цветного проката, успешно функционирующим в условиях рыночной экономики. ЗАО завод «Южкабель» не только обеспечивает потребности Украины, но и является экспортером в страны СНГ, ближнего и дальнего зарубежья. Среди ассортимента продукции есть одномодовое и многомодовое оптическое волокно, а также кабели типа ОКСН и ОКП.

ОАО Одесский кабельный завод "Одескабель" – флагман отечественной кабельной промышленности, входящий в число 50-ти крупнейших мировых производителей кабельной продукции. Предприятие способно полностью покрыть потребности Украины и СНГ в кабельной продукции, а экспорт составляет около 40%. В ассортимент продукции завода входят кабели типа ОКСН и ОКН, а также оптические муфты для соединения кабеля на опорах ВЛ.

К большому сожалению, оптические кабели типа ОКГТ в Украине не производятся ни одним заводом, поэтому монтируется кабель зарубежного производства. За рубежом производством кабелей занимается множество заводов в разных странах, и выпускаются все типы оптических кабелей для подвески на ВЛ. Так, например, в России кабель типа ОКГТ всех видов производится компанией ООО «Саранскабель-оптика», в США и Великобритании кабель типа OPGW производит AFL Telecommunications – дочернее предприятие японской Fujikura.

**Монтаж** кабелей типа ОКГТ и ОКСН на ВЛ осуществляется методом монтажа под тяжением. Суть метода заключается в том, что сначала через монтажные блоки пропускают канат из полиамидных нитей, который используется для протяжки более прочного каната – троса-лидера, к которому затем крепят оптический кабель. В процессе монтажа кабеля осуществляется контроль тяжения в нем и обеспечивается необходимое усилие при его креплении, при установке проектных

значений стрел провеса кабеля [3].

Основное оборудование, необходимое для раскатки и подвески оптического кабеля методом монтажа под тяжением, включает тяговое устройство и тормозную машину, монтажные блоки, устройства, препятствующие скручиванию оптического кабеля, шарниры, витой кабельный зажим («чулок»), заземлители.

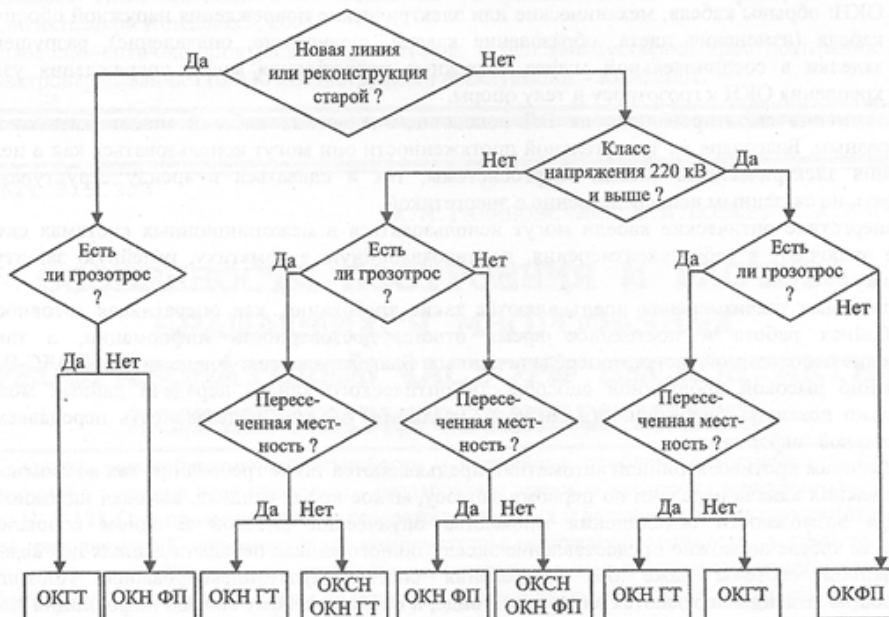


Рис. 6. Алгоритм выбора подходящего типа волоконно-оптического кабеля

Монтаж ВОЛС-ВЛ с применением кабеля типа ОКН (как для грозотроса, так и для фазного провода) осуществляется с использованием специального оборудования, которое поставляет фирма-производитель ОКН – навивной машины с комплектом вспомогательного оборудования. Таким образом, компания-изготовитель поставляет не только оптический кабель, но и предоставляет технологию подвески и монтажа ОКН. Это несколько сужает область применения ОКН, однако дает гарантии на смонтированный комплекс ВОЛС-ВЛ, в отличие от производителей ОКГТ и ОКСН, которые, как правило, несут ответственность только за поставленный кабель. Монтажное оборудование для подвески ОКН малогабаритное и позволяет обеспечить высокую скорость монтажа, непрерывную работу, работать без снятия напряжения (для ОКН ГТ). Технология подвески ОКН является идеальным методом проведения монтажных работ при переходах ОК через водные преграды, городские кварталы и другие подобные объекты, а также в труднодоступной и горной местности. При этом не требуется возводить специальные сооружения при пересечении ВОЛС-ВЛ автомобильных или железных дорог. Применение метода подвески ОКН позволяет монтировать ВОЛС-ВЛ со средней скоростью прокладки примерно до 4 км кабеля за смену.

**Техническое обслуживание** смонтированного оптического кабеля заключается в периодических осмотрах элементов ВОЛС-ВЛ, измерении оптических параметров кабеля и муфт, а также текущий ремонт.

При осмотрах производят проверку внешнего состояния оптического кабеля, арматуры подвески и другой арматуры, креплений зажимов, заземляющих спусков и муфт.

Путем измерений оптических параметров производят проверку состояния оптических волокон в кабеле и муфтах. Измерения затухания оптического сигнала и других параметров оптического волокна производят с помощью рефлектометра. В случае обрыва оптического волокна при этом можно определить расстояние до места обрыва.

**Характерные неисправности** разных видов волоконно-оптических кабелей:

- ОКГТ: механические повреждения троса (оборванные или перегоревшие проволоки, наличие коррозии), отсутствие виброгасителей, изменение стрел провеса, неисправности в

подвеске (слабая затяжка поддерживающего зажима, смещение меток при монтаже натяжного зажима, отсутствие гаск и шплинтов, коррозия);

- ОКСН: обрывы кабеля, механические или электрические повреждения оболочки кабеля (изменение цвета, шелушение, местные разрушения оболочки), разрушение заделки в муфте, наружные повреждения муфт, неисправности в подвеске (аналогично ОКГТ);
- ОКН: обрывы кабеля, механические или электрические повреждения наружной оболочки кабеля (изменение цвета, образование каверн, шелушение, оплавление), разрушение заделки в соединительной муфте, наружные повреждения муфт, повреждения узлов крепления ОКН к грозотросу и телу опоры.

Применение смонтированных на ВЛ волоконно-оптических кабелей может быть самым разнообразным. Благодаря их значительной протяженности они могут использоваться как в целях управления электрическими сетями энергосистемы, так и сдаваться в аренду структурам и компаниям, не связанным непосредственно с энергетикой.

В энергетике оптические кабели могут использоваться в межстанционных системах связи, которые включают в себя телеизмерения, противоаварийную автоматику, релейную защиту и автоматику.

К системам телеизмерения предъявляются такие требования, как оперативная готовность, бесперебойная работа и постоянное время ответа, достоверность информации, а также обеспечение необходимой скорости передачи данных. Благодаря высокой надежности ВОЛС-ВЛ и чрезвычайно высокой пропускной способности оптического канала передачи данных можно значительно повысить оперативность системы, увеличить объемы и детальность передаваемой измерительной информации.

К системам противоаварийной автоматики предъявляются такие требования, как возможность предоставления канала передачи по первому запросу, малое время отклика, высокая надежность. Благодаря возможности объединения множества оптических волокон в одном волоконно-оптическом кабеле возможно предоставление эксклюзивного канала передачи данных для каждой пары данной системы даже без применения систем мультиплексирования. Поскольку управляющие команды передаются в цифровом виде, и по оптическому кабелю информация также передается импульсами, то это позволяет отказаться от аналогово-цифровых преобразователей, что в конечном итоге при переходе всей системы на оптический канал связи не приведет к значительному удорожанию системы.

Существенным моментом для энергосистемы является наличие эффективной надежной телефонной системы для осуществления оперативного управления. Например, телефонная связь между диспетчерским центром и подстанциями должна быть установлена очень быстро, особенно в критических ситуациях. Телефонная система должна обеспечивать возможности для предоставления преимущественных прав важным пользователям. Система межстанционной связи нуждается не только в двунаправленной линии связи, но также в повышенном коэффициенте ее готовности и очень быстром доступе к ней. Все эти требования удовлетворяются оптическим каналом передачи данных, к тому же благодаря объединению множества волокон в одном кабеле возможно выделение отдельного канала связи для диспетчерского управления, а для остальных служебных нужд можно использовать всего один канал передачи с использованием временного или частотного разделения доступа.

Реальное применение рассмотрим на примере магистральной ВОЛС ПС 330 кВ Бар – ПС 330 кВ Винница. Линия имеет протяженность 67,94 км. На ВЛ была произведена замена грозозащитного троса на волоконно-оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос, марки OPGW ASLH-DABx16 E 9/125 0.4 F 3.5. Произведенный расчет методом допустимых напряжений показал, что напряжения на наиболее ответственных участках не превышают допустимых.

### Выводы

В настоящее время стремительное развитие информационных технологий приводит к необходимости значительного расширения каналов обмена данными между всеми участниками как глобальных, так и локальных сетей. В этих условиях поставщики услуг передачи данных вынуждены строить новые каналы связи между городами, в том числе разных государств. Поскольку высоковольтные линии электропередачи покрывают всю территорию Украины, а срок службы грозозащитных тросов в большинстве случаев уже истек, то достаточно перспективным является их замена на волоконно-оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос.

Полученные таким образом широкие каналы передачи данных можно использовать как в собственных нуждах, так и сдавать в аренду. При этом срок окупаемости резко уменьшается.

#### Литература

1. Баричев С.В. Световоды. – Компьютерра, 1998, №4.
2. Шмалько А.В., Сабинин Н.К. ВОЛС на воздушных линиях электропередачи. – М.: «Оптиктелеком Комплект», 2003.
3. Волоконно-оптична лінія зв'язку, вмонтована в блискавкозахисний трос повітряних ліній електропередавання 110-330 кВ. Інструкція з експлуатації. – Київ, 2001.