

## ЛИНИИ И КАБЕЛИ СВЯЗИ

УДК 621.59

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД  
К ГРОЗОЗАЩИТЕ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

С. А. Соколов, профессор МТУСИ, д.т.н.; stanislav.a.sokolov@gmail.com

В настоящее время большая часть междугородных линий связи строится на волоконно-оптических кабелях. При этом значительно возросло количество и скорость передаваемой информации, и даже небольшие простои связи вызывают большие потери. Первоначально казалось, что полностью диэлектрические оптические кабели не подвержены ударам молнии, однако вскоре выяснилось, что электромагнитное поле молнии, действуя на оптическое волокно, вызывает поворот плоскости поляризации света в нем, а это вызывает дополнительную дисперсию. Особенно заметны эти эффекты при использовании волнового и ортогонального уплотнения оптических кабелей, что может приводить к сбоям при приеме информации.

Развитие технологии пакетной коммутации меняет конфигурацию линий, связывающих оконечные пункты, в результате чего в разные моменты времени пакеты двигаются по разным линиям и меняется суммарная вероятность повреждения линии во время передачи сообщения. Новейшие исследования молнии показали, что грозовые разряды могут являться также мощным источником рентгеновского и гамма-излучения (особенно в горной местности и вблизи высотных сооружений), к которым оптические кабели очень чувствительны. Все это требует пересмотра традиционного подхода к грозозащите оптических кабелей.

**Ключевые слова:** молния, оптическое волокно, поляризация света, пакетная коммутация, гамма-излучение.

**Введение.** Как известно, междугородные линии связи организуются сегодня в основном на оптических кабелях (ОК). Между тем действующие руководства по грозозащите междугородных кабелей были разработаны в расчете на конструкции кабелей с металлическими жилами (симметричные и коаксиальные кабели), по которым передавался ограниченный объем информации. Нормы на допустимое число повреждений в них зависели от передаваемой нагрузки. Эти нормы численно остались такими же и для оптических кабелей. Однако число каналов, объем передаваемой информации и скорости передачи по ОК многократно возросли по сравнению с электрическими кабелями связи. Кроме того, оптические кабели могут быть как с металлом в конструкции, так и полностью диэлектрическими.

С появлением пакетной коммутации передача информации между двумя оконечными пунктами в разные моменты времени может осуществляться по разным линиям, связывающим эти пункты. При этом условия передачи на этих линиях могут существенно отличаться как по удельному сопротивлению грунта, объему и скорости передаваемой информации, так и по длине линий. Больше того, могут изменяться параметры линии, тип кабеля и даже сама направляющая среда передачи.

Что касается грозозащиты ОК, то новые подходы к ее изучению должны основываться на тех успехах, которые достигли ученые в процессе исследований молнии в последние годы. Выяснилось, что молния не только генерирует большие токи,

но и является источником рентгеновского и гамма-излучения, к которым оптические кабели весьма чувствительны. Распространенное мнение, что чисто диэлектрические ОК не чувствительны к внешним электромагнитным полям, ошибочно. Особенно это важно по отношению к кабелям с системами волнового и ортогонального уплотнения.

**Воздействие молнии на оптические кабели связи.** Оптические кабели могут иметь металлическую оболочку или броню для защиты от механических повреждений при прокладке в каменных, скальных или мерзлых грунтах, содержать упрочняющие металлические элементы, а также металлические жилы дистанционного питания. Воздействие на ОК с металлом в конструкции общеизвестно. При наличии в кабеле металлических элементов может произойти пробой внешнего шланга или изоляции между металлическими элементами конструкции. Во время искрового или дугового пробоя могут пострадать расположенные рядом волокна, а через образовавшееся отверстие начнет постепенно проникать влага.

Потенциал в точке удара молнии обычно очень велик (сотни или тысячи киловольт), поэтому изоляционное покрытие поверх металлической оболочки, если оно имеется, легко пробивается, и ток молнии к кабелю после пробоя протекает как по земле, так и по металлическим покровам кабеля и жилам. Параметры распространения во всех этих цепях (оболочка — земля, жила — земля, жила — оболочка) различны; потенциалы земли, оболочки и жил меняются неодинаково, и на некотором расстоянии от точки удара молнии между ними возникает разность потенциалов, достаточная для пробоя. При этом основными видами повреждений являются повреждения изоляции, происходящие во многих точках вдоль кабеля на расстояниях от сотен до тысяч метров друг от друга.

В случае если удельное сопротивление окружающей земли велико, или поверх металлической оболочки имеется пластмассовый шланг, то стекание тока с оболочки затруднено, и масштабы повреждений увеличиваются. Однако при ударах молнии электромагнитному воздействию подвергаются также и чисто диэлектрические ОК.

Явления вращения плоскости поляризации света в поперечном электрическом (эффект Керра) и продольном магнитном (эффект Фарадея) полях были открыты еще в XIX веке. Поворот плоскости поляризации под действием электрического поля пропорционален квадрату напряженности поперечного электрического поля и обратно пропорционален длине волны распространяющегося света, а также пропорционален первой степени напряженности продольного магнитного поля.

Различным образом поляризованные волны света при падении на плоскую поверхность имеют разные величины Френелевских коэффициентов. Изменение плоскости поляризации света в оптическом волокне может также привести к так называемому двойному лучепреломлению и возникновению двух ортогональных составляющих волны, между

которыми распределится первоначальная энергия сигнала. Каждая из составляющих будет распространяться независимо друг от друга. Так как параметры волокна вдоль различных плоскостей, проходящих через ось, могут несколько отличаться, следствием этого может стать увеличение дисперсии и затухания сигнала, по аналогии с воздействием поляризационной модовой дисперсии при геометрических неоднородностях волокна.

При ударе молнии в землю возникают сильные электрические и магнитные поля. Если рядом находится проложенный в земле ОК, то внешнее поле реагирует с полем распространяющейся по волокну световой волны, в результате чего возможен поворот плоскости ее поляризации. Если же удар очень близок, то поворот может быть значительным. При малой скорости передачи и отсутствии волнового уплотнения этот эффект может быть не замечен, однако при большом объеме и скорости передачи, а также при наличии в линии пассивных компонентов, чувствительных к поляризации, возможны разного рода неприятности.

**Роль волнового и ортогонального мультиплексирования.** Развитие систем волнового мультиплексирования, характеризующихся возрастающим числом несущих, привело к тому, что в одном окне прозрачности может передаваться несколько десятков, а порой и сотен волн, сдвинутых друг относительно друга на доли нанометров. Поворот плоскости поляризации зависит от длины волны и для всех волн он разный. При прочих равных условиях короткие волны смещаются на больший угол по сравнению с длинными. Если первоначально все волны имели одну и ту же (например, вертикальную) поляризацию и распространялись вдоль одной из главных осей (так как волокно имеет некоторую эллиптичность), то после поворота плоскостей поляризации под воздействием внешнего поля появятся составляющие вдоль обеих осей. При этом короткие волны, по сравнению с длинными, будут иметь большую составляющую вдоль горизонтальной оси, а длинные — относительно большие вертикальные компоненты.

Известно также, что короткие и длинные волны распространяются с разной скоростью, что объясняется зависимостью коэффициента преломления от длины волны. Следовательно, определившиеся пакеты волн с разной поляризацией будут иметь еще и разную скорость распространения, что вызовет дополнительную дисперсию. Если используется ортогональное мультиплексирование с одновременной передачей по волокну волн с горизонтальной и вертикальной поляризацией, то составляющие, имевшие первоначально только вертикальную поляризацию, после поворота плоскости поляризации под действием внешнего поля могут иметь также и горизонтальную составляющую, наложенную на основные волны с горизонтальной поляризацией, что еще больше увеличит риск ошибок.

К сожалению, имеется некоторая неопределенность в точности определения поворота плоскости поляризации под действием поля, который может зависеть от технологии изготовления волокна. Тем не менее грозное воздействие на ОК, даже не содержащий металлических элементов, может быть достаточно опасным при организации каналов большой емкости со скоростью передачи в несколько Тбит/с, поскольку цена возможных ошибок при приеме таких сигналов во время ударов молнии достаточно велика.

**Влияние пакетной коммутации. Трансформируемость линий.** Как известно, оконечные пункты могут быть связаны между собой сразу несколькими линиями. Если пакеты между двумя пунктами передаются в разные моменты времени по

разным линиям, а объединение пакетов происходит на конечном пункте, то расчет вероятного числа повреждений усложняется. В общем случае, когда сеть или линия работают по направляющим средам одного типа, решения в отношении защиты ОК принимаются по участкам, а условия, при которых можно рассчитывать количество вероятных повреждений, постоянными, как это делается на длинных магистральных линиях.

Если линия, по которой ведется передача, трансформируемая, т.е. в разные интервалы времени ее конфигурация, тип и длина меняются, то общая сумма вероятных повреждений и надежность будут также зависеть от времени. Коммутируемые пакеты в разные моменты могут направляться по разным линиям, и чем чаще осуществляется подобная коммутация и меняются длина и состав виртуальной линии, тем чаще будут меняться общая вероятность повреждений и надежность всей составной линии.

Вероятное число повреждений виртуальной линии — величина переменная, заключенная между минимальным и максимальным значениями. Причем виртуальная линия не обязательно будет иметь минимальное значение вероятности при работе связи по кратчайшей физической линии. Если задать уровень вероятности повреждения виртуальной линии не ниже некоторого определенного предела, необходимо рассмотреть все возможные варианты конфигураций данной сети и либо исключить варианты, не удовлетворяющие требованиям, либо усилить защиту отдельных участков сети.

**Подверженность рентгеновскому и гамма-излучению. Воздействие молнии в горной местности.** В последние годы в изучении молнии были сделаны удивительные и сенсационные открытия, особенно в процессе исследований ее лидерной стадии. Оказалось, что в процессе ее развития генерируются рентгеновское и  $\gamma$ -излучение большой энергии. Было обнаружено, что они возникали в виде дискретных интенсивных всплесков синхронно с образованием шагов лидера, однозначно демонстрируя, что источник рентгеновского излучения тесно связан со ступенчатым процессом.

Проложенные в грунте или подвешенные на опорах ОК могут подвергаться воздействию грозных разрядов, и, как следствие, в некоторых случаях, рентгеновскому и  $\gamma$ -облучению. Зачастую вблизи заряженных облаков могут оказаться и летательные аппараты. И хотя длина ОК внутри них небольшая, амплитуда воздействия молнии (вследствие близости к источнику излучения) может быть достаточно велика. До недавнего времени о таких воздействиях ничего не было известно, но последние открытия в области исследования молнии заставляют обратить внимание на эту проблему.

Основные эффекты, производимые рентгеновским и  $\gamma$ -излучением в волокне — это смещение атомов из нормального положения в кристаллической решетке и ионизация. Радиация приводит к нарушению связей, имеющихся в основе материала оптического волокна и к появлению свободных связей, которые служат ловушками для зарядов. При этом возникают дефекты в структуре решетчатого кварца. При облучении вещества фотонами с энергией менее 1 МэВ возникающие дефекты относительно незначительны и могут иметь тенденцию к восстановлению исходного состояния. При более высоких энергиях гамма-квантов нарушения будут носить необратимый характер.

При облучении ОК в результате захвата структурными и примесными дефектами электронов и дырок возникают так называемые центры окраски, которые поглощают свет в некоторых частях спектра, что и приводит к дополнительному затуханию ОК. В результате облучения изменяются первич-

ные параметры ОВ — коэффициент преломления и величина затухания.

Легирующие добавки, остаточные механические напряжения, примеси, малое содержание гидроксильной группы ОН снижают радиационную стойкость волокна. В этой связи ОВ с отсутствием водяного пика могут оказаться более чувствительными к радиационным воздействиям. При импульсном облучении оптические потери достигают более высоких значений чем при стационарном. В случае полимеров ионизирующее излучение существенно изменяет их макроскопические свойства, нарушая связи полимерных цепочек.

При энергии квантов порядка 1 МэВ воздействие излучения приводит к эффектам, создаваемым вторичными быстрыми электронами, которые эффективно взаимодействуют с электронами атомов, вызывая ионизационные потери. При очень больших энергиях  $\gamma$ -квантов (порядка десятков и сотен МэВ) возможно непосредственное взаимодействие с ядрами атомов, как в случае нейтронных потоков. Тогда возможны изменения фазового состояния и плотности стекла, а также образование объемных и точечных дефектов, вызывающих образование внутренних напряжений и деформаций. Возможны выбивание атомов из положения равновесия на сравнительно большие расстояния, образование дефектов на границе между сердцевиной и оболочкой кабеля.

В результате такого рода физических процессов появляются свободные радикалы, изменяется положение некоторых атомов, вакансий и т.п. Рентгеновское и гамма-излучения особенно сильно проявляются при развитии лидерного процесса молнии от земли к облаку. Это происходит обычно в горах и вблизи высотных сооружений и поэтому расположенные в этих условиях кабели имеют более высокую вероятность поражения рентгеновским и гамма-излучением.

**Заключение.** В действующем Руководстве по грозозащите кабелей допустимое число повреждений определялось в размере 0,1–0,2 повреждения на 100 км в год, причем норма 0,1 относилась к коаксиальным кабелям. Между тем общее количество организуемых каналов по ранее построенным магистралям не идет ни в какое сравнение с объемом информации, которое сегодня передается по ОК, а нормы в Руководстве остались теми же.

Известно, что простой современной линии связи приносит убытки, не сопоставимые с теми, что возникают при простое коаксиальных кабелей. Необходима разработка новых норм, учитывающих материальные потери и риски. В то же время следует заметить, что развитие интернета привело к перегрузке линий связи.

Объем передаваемой информации колоссально возрастает, но не вся она имеет одинаковую ценность. Количество

смартфонов, планшетов и прочих интернет-ориентированных гаджетов уже превышает численность населения земли. Каждый из них потребляет информацию все быстрее и в больших объемах. Например, в 2012 г. объем передаваемой информации вырос на 70%. Когда он удвоится, будет достигнут порог Шеннона. Причем это может случиться уже в ближайшее время, так как мощность сетей конечна. Очевидно необходимо не только оптимизировать конструкции и технологии линий связи, но и фильтровать и агрегировать контент перед тем, как выложить его в сеть, строить клиент-ориентированные сети, радикально изменить способы обработки данных в сети. Пока же существующая сеть просто передает потоки информации, а не интерпретирует ее. Передает больше, чем требуется, например, в режиме видеоконференции. С учетом всех приведенных изменений, происшедших за последние годы в развитии сетей связи, критерии определения защитных средств от ударов молнии для современных оптических кабелей должны быть пересмотрены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Hidenori Takahashi et al.** 400-Gbit/s Optical OFDM Transmission over 80 km in 50-GHz Frequency Grid.— ECOC 2010.— 19–23 September 2010.— Torino, Italy.
2. **Sokolov S.A.** Particularities of Polarization-Mode Dispersion in optical fiber with Wavelength Division Multiplexing during the Lightning stroke. 4<sup>th</sup> International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Proceeding.— 23–25 October 2007. — Qingdao, China//IEEE Press.— P. 448–450.
3. **Sokolov S.A.** High voltage line electrical field influence upon suspended fiber cable.. Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics CEEM'2009.— 16–20 Sept., 2009. — Xi'an, China // Proceedings.— P.51–53.
4. **Соколов С.А.** Эффекты Керра и Фарадея в оптическом кабеле// Электросвязь.— 1996.— № 4.
5. **Соколов С.А.** Возникновение поляризационной модовой дисперсии под действием грозовых разрядов // Электросвязь.— 2004.— № 11.
6. **Dwyer J.R et al.** X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning // Geophysical Research Letters.— V.32. — L01803, 2005.
7. **Dwyer J.R et al.** A ground level gamma-ray burst observed with rocket-triggered lightning // Geophysical Research Letters.— 2004.— V.31.— L05119.
8. Руководство по защите подземных кабелей связи от ударов молнии.— М.: Связь, 1975.— 63 с.
9. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций.— М: Изд-во МЭИ.— 2004.
10. Рекомендация МСЭ-Т. Серия К.— № 25.
11. Руководство по защите оптических кабелей от ударов молнии.— ЦНИИС, 2001.

Получено 20.03.14

**Не забудьте подписаться на журнал «Электросвязь»**



• во всех почтовых отделениях по каталогам:

«Агентство «Роспечать», индекс – 71107; «Пресса России», индекс – 41411; «Почта России», индекс – 61854;

• через альтернативные агентства:

«Урал-Пресс» – www.ural-press.ru

• в редакции журнала «Электросвязь»

тел. (495) 625-84-36, e-mail: tim@elsv.ru www.elsv.ru