

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ **на полностью диэлектрические оптические кабели**

С.Соколов, д.т.н., МТУСИ

Распространено заблуждение, что полностью диэлектрические оптические кабели не подвержены воздействию внешних электромагнитных полей. Между тем, электромагнитное поле распространяющегося по оптическому волокну света реагирует с внешним полем. В статье рассмотрены некоторые случаи воздействия внешних электромагнитных полей на проложенный в земле и подвешенный на опорах линии электропередачи оптический кабель без металлических элементов в конструкции.

Все большее распространение в городских поселениях и пригородах получают сети PON и FTТх, значительная часть линий которых выполнена полностью диэлектрическим оптическим кабелем без металлических элементов в конструкции. Линия при этом может прокладываться как в земле, так и в виде кабеля, подвешенного на опорах линий электропередачи или контактной сети электрифицированной железной дороги. При этом предполагается, что полностью диэлектрический кабель не подвержен воздействию внешних электромагнитных полей. Между тем, сильные поля, возникающие при ударах молнии в землю вблизи кабельной линии, вызывают поворот плоскости поляризации распространяющегося по ней света. Если используется система волнового уплотнения, то каждая волна поворачивается на свой угол, зависящий от длины волны. В результате в волокне возникают две ортогональные волны и дополнительная поляризационно-модовая дисперсия. Кабель при этом не повреждается, но возможно увеличение ошибок при приеме сигналов. Если же в цепи имеются элементы, чувствительные к поляризации, то возможны и сбои в работе.

Оболочка оптического кабеля, подвешенного на опорах линий электропередачи, загрязняется пылью и увлажняется, и под действием электрического поля линии электропередачи по загрязненной и увлажненной поверхности кабеля протекает ток, приводящий к повреждению оболочки. В некоторых случаях на металлических кронштейнах и держателях, удерживающих самонесущий оптический кабель, возникает корона, приводящая к разложению пластмассовой оболочки, выделению окислов азота и образованию азотной кислоты, разрушающей кабель. Кабели на высотных сооружениях и в горах могут подвергаться также воздействию гамма-излучения, возникающего при ударах молнии.

### **ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ МОЛНИИ НА ПОЛНОСТЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ, ПРОЛОЖЕННЫЙ В ЗЕМЛЕ**

Явления вращения плоскости поляризации света в поперечном электрическом (эффект Керра) и продольном магнитном (эффект Фарадея) полях были открыты еще в XIX веке [1]. При прохождении света по волокну под воздействием внешнего

электромагнитного поля происходит поворот плоскости поляризации световой волны. Различным образом поляризованные волны света при падении на плоскую поверхность имеют разные величины френелевских коэффициентов отражения и преломления. 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 одна от другой. Так как параметры волокна вдоль различных плоскостей, проходящих через ось, могут несколько отличаться, следствием может явиться увеличение дисперсии и затухания сигнала, аналогичные поляризационной модовой дисперсии при геометрических неоднородностях волокна.

Эффект Керра пропорционален квадрату напряженности поперечного электрического поля и уменьшается с увеличением температуры [2,3]. Плоскость поляризации поворачивается на угол

$$\varphi = 2\pi K E^2 L,$$

где  $E$  – величина поперечного внешнего поля;  $L$  – длина пути, проходимого светом под воздействием поля;  $K = 0,402 \times 10^{-13} \text{ м/В}^2$  – постоянная Керра. Это значение получено для  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ ;  $n = 1,5$ ;  $T = 293 \text{ К}$ .

Как видно,  $K$  имеет малую величину, и для возникновения заметного эффекта Керра электрическое поле должно быть достаточно велико. Большие величины поля возможны вблизи точки удара молнии. Если удар молнии происходит вблизи трассы проложенного в земле диэлектрического оптического кабеля (ОК) без металлических элементов в конструкции, то в волокнах последнего возможно возникновение эффекта Керра. Если удар молнии

происходит на расстоянии  $a$  от ОК, который проложен на глубине  $h$ , то при однородном строении земли напряженность электрического поля в произвольной точке вблизи кабеля равна

$$E = I\rho/[2\pi(a^2 + h^2 + x^2)],$$

где  $I$  – амплитуда тока молнии;  $\rho$  – удельное сопротивление земли.

Ось  $x$  направлена вдоль оси кабеля, причем точке  $x = 0$  соответствует точка на оси кабеля, ближайшая к точке удара молнии на поверхности земли. Для угла поворота плоскости поляризации света в волокне получаем:

$$\varphi = \frac{3}{16} K \frac{(I\rho)^2}{(a^2+h^2)^{3/2}}.$$

Полагая средние значения величин:  $I = 50 \text{ кА}$ ,  $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $a = 10 \text{ м}$ ,  $h = 1 \text{ м}$ , найдем, что  $\varphi = 1^\circ$ , т.е. однократное воздействие молнии в одной точке при средних условиях вызывает сравнительно небольшой эффект. Однако в некоторых случаях при больших значениях удельного сопротивления грунта и амплитуды молнии и близком расстоянии до точки удара молнии (например,  $a = 1 \text{ м}$ ) величина эффекта может возрасти в десятки раз.

В таблице приведены рассчитанные значения частоты превышения того или иного угла поляризации  $\varphi_0$  за грозовой сезон при различных значениях удельного сопротивления грунта  $\rho$ , плотности ударов молнии в грозовой день  $q = 0,1$  удара на кв. км, длине трассы  $L = 100 \text{ км}$  и числа дней с грозой  $N = 25$ . При других значениях  $q$ ,  $L$  и  $N$  таблица легко может быть переделана с помощью линейного пересчета умножением табличных значений на коэффициенты 10 для  $q$ , 0,01 для  $L$  и 0,04 для  $N$ .

Как видно из таблицы, поворот плоскости поляризации, например, на  $45^\circ$  при удельном

**Число случаев превышения величины  $\varphi_0$  за грозовой сезон при  $q = 0,1$ ;  $L = 100 \text{ км}$ ;  $N = 25$  и различных значениях удельного сопротивления земли**

$\rho$ , Ом·м	$\varphi_0$ , град					
	5	10	30	45	90	180
100	0,37	0,29	0,20	0,18	0,14	0,11
200	0,58	0,46	0,32	0,28	0,22	0,18
400	0,92	0,73	0,51	0,44	0,35	0,28
1000	1,7	1,35	0,94	0,82	0,65	0,52
2000	2,7	2,15	1,49	1,3	1,03	0,82
5000	4,97	3,96	2,74	2,4	1,9	1,51

сопротивлении 100 Ом·м осуществляется примерно один раз в 5 лет, а при  $\rho = 400$  Ом·м уже один раз в два года. При  $\rho = 2000$  Ом·м это случается чаще, чем раз в год, а при  $\rho = 5000$  Ом·м – 2,5 раза в год. Грунт с удельным сопротивлением 50–500 Ом·м встречается обычно на равнинной местности; 800–2000 Ом·м характерны при наличии песка; 1000–5000 Ом·м – при наличии камней и скальных пород, а также в районах с многолетней мерзлотой. При расчете удар молнии предполагался однократным, многократные разряды не учитывались.

Под воздействием продольного магнитного поля молнии, т.е. в случае, когда свет распространяется вдоль силовых линий магнитного поля, происходит поворот плоскости поляризации на угол

$$\psi = VLB,$$

где  $B$  – магнитная индукция в среде распространения;  $L$  – длина пути света вдоль магнитных силовых линий;  $V$  – постоянная Верде.

Учитывая, что

$$B = \mu_0 \mu H,$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества;  $H$  – напряженность магнитного поля, для кварцевого стекла получаем:

$$\psi = fNL.$$

Для волны  $\lambda = 1,55$  мкм это выражение принимает вид:

$$\psi = 1,66 \times 10^{-5} LH,$$

где размерность  $H$  – А/м,  $L$  – м,  $\psi$  – градусы.

Обычно  $\varphi \gg \psi$ . Очень большую величину вблизи поверхности земли и в земле электрическое и магнитное поля могут иметь при воздействии высотного ядерного взрыва.

### ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ПОДВЕШЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

Использование опор ЛЭП для подвески на них оптических кабелей позволяет экономить средства и широко используется в странах Западной Европы. В современном мире запыленность атмосферы особенно велика вблизи промышленных центров. В сочетании с влагой покрывая хотя бы небольшим слоем пыли поверхность подвешенного кабеля становится проводящей, и при наличии электрического

поля вокруг кабеля по поверхности оболочки протекает ток, приводящий к ее ускоренному старению, образованию трековых следов на поверхности и даже к полному разрушению. В зависимости от загрязненности атмосферы и величины поля, процесс разрушения может длиться от нескольких месяцев до десятков лет. Сильные электрические поля в нормальном режиме существуют на линиях электропередачи с номинальным напряжением 110 кВ и выше, но они же отличаются высокой надежностью по сравнению с линиями меньших напряжений. Величина напряженности электрического поля может составлять десятки киловольт на метр. Такое поле при неблагоприятных условиях способно вызвать электрический пробой по загрязненной и влажной поверхности оптического кабеля. Поверхностный пробой, даже если он не переходит в устойчивую электрическую дугу, оставляет следы на поверхности оболочки, вызывает расплавление и деформацию, а в дальнейшем деградацию и полное разрушение сначала пластмассовой оболочки, а потом и сердечника кабеля. Обстоятельства, при которых это происходит, зависят от величины напряжения линии электропередачи, ее конструкции и расположения фазных проводов, климата и погодных условий на местности, расположения ОК относительно фазных проводов, конструкции устройств подвески и крепления, конструкции самого ОК и материала оболочки. Увлажнение поверхности неметаллического подвешенного оптического кабеля может происходить при дожде, росе, тумане. Загрязнение поверхности происходит постоянно вследствие выветривания поверхности земли, выброса промышленных отходов и т.п. Количество загрязняющего вещества на поверхности оболочки непостоянно и зависит от условий погоды. Дождь растворяет и смывает часть грязи. Увлажнение загрязненных поверхностей приводит к растворению солей осадка и резкому увеличению поверхностной проводимости  $\sigma$ . Оптический кабель на небольшой длине можно рассматривать как гладкий стержень диаметром  $D$  с толщиной загрязняющего слоя  $\Delta$  и длиной  $L$ . Тогда сопротивление  $R$  слоя загрязнения равно:

$$R = \rho L / (\pi D \Delta),$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление загрязняющего слоя.

Сопротивление загрязненной поверхности на единицу длины может иметь значения от 0,1 до 10 МОм/м. Обозначим удельную поверхностную проводимость как

$$\sigma = 1 / (\rho \Delta).$$

Можно пользоваться следующими значениями удельной поверхностной проводимости  $\sigma$  (мкСм) для различной степени загрязнения поверхности:

чистая поверхность .....	$\leq 2$
слабое загрязнение .....	$\leq 4$
повышенное загрязнение .....	5-10
сильное загрязнение .....	10-20
особо сильное загрязнение (вблизи производств) .....	20-40.

Поверхностная плотность тока при этом равна:

$$j = \frac{I}{\pi D} = \frac{E_L \sigma \pi D}{\pi D} = E(L) \sigma$$

Напряженность поля имеет составляющую вдоль оси провода порядка 10 кВ/м. Если предположить, что провод слабо загрязнен, а диаметр кабеля равен 12 мм, то для поверхностного тока получим величину  $I = 1,5$  мА. При повышенной загрязненности ток может достигать величины 4-5 мА, а при особо сильном загрязнении - 25-30 мА, а если ориентироваться на полную напряженность поля в 100 кВ/м, то и 150 мА. Из опыта эксплуатации линий электропередачи известно, что ток по поверхности сильно загрязненных изоляторов может достигать десятков и даже сотен миллиампер.

При подсушивании поверхности влага испаряется, причем неравномерно. Испарение влаги приводит к местному увеличению сопротивления слоя грязи. Подсушивание отдельных участков вызывает увеличение плотности тока на остальных участках окружности, ускоренный их нагрев и образование подсушенной кольцевой зоны с повышенным сопротивлением. В результате падение напряжения на этом участке увеличивается до тех пор, пока не происходит пробой по подсушенной поверхности, что приводит к образованию частичной электрической дуги, шунтирующей часть пути. В подобных случаях приложенного напряжения обычно бывает достаточно для перекрытия маленького воздушного промежутка длиной в несколько миллиметров. Таков механизм развития разряда по поверхности кабеля.

При протекании тока, и особенно при возникновении дуги, выделяется тепло и происходит нагрев поверхности, а в некоторых случаях и расплавление оболочки. Подобные процессы, очевидно, повторяются. Загрязнение и увлажнение имеют частоту появления, совпадающую с частотой появления дождей и туманов. При прекращении дождя начинается подсыхание поверхности и образование чередующихся зон проводимости и островков изоляции, появляются условия для возникновения дуги. В результате повторения подобных процессов

кабель постепенно разрушается. На величине разрядной напряженности сильно сказывается степень загрязненности, интенсивность увлажнения и, следовательно, величина удельной проводимости поверхности. Как уже говорилось, в зависимости от загрязненности, климатических условий, типа линии, места подвески, конструкции самого оптического кабеля, время разрушения будет сильно варьироваться. Для вероятности повреждения оптического кабеля существует формула:

$$P(t) = 1 - e^{-f(t)}$$

где  $f(t) = \left[ \frac{t}{\tau_c(E)} \right]^p$ ;  $t$  - время до повреждения;  $\beta$  - постоянная формы Вейбулла;  $\tau_c(E)$  - характеристическое время, зависящее от напряженности поля и условий подвески. При  $E$ , изменяющейся в пределах от 10 до 100 кВ/м,  $\tau_c$  изменяется от 1000 до 0,1 года.

#### ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ, ВОЗНИКАЮЩЕЕ ПРИ УДАРАХ МОЛНИИ, И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

Исследования [4,5], проведенные в 2001-2003 гг., обнаружили, что во время лидерной стадии разряда молнии, в особенности при положительных лидерах, что чаще всего происходит в горах и вблизи высотных сооружений, возникает радиация в виде рентгеновских лучей и  $\gamma$ -квантов с энергией, превышающей 10 МэВ. Действие радиации на волокно разделяется на три основные категории: образование так называемых центров окраски, изменение плотности волокна, изменение свойств полимерных материалов. При воздействии излучения в материале волокна возникают процессы смещения и образования дефектов решетки. На этих дефектах появляются электроны проводимости и дырки, комбинации которых с вакансиями создают центры окраски, поглощающие свет в некоторых частях спектра, что и приводит к дополнительному затуханию. В случае полимеров ионизирующее излучение существенно изменяет их макроскопические свойства, нарушая связи полимерных цепочек. Как видим, воздействие грозных разрядов в горной местности может сопровождаться не только протеканием тока большой амплитуды и влиянием сильного электромагнитного поля, но также воздействием рентгеновского и гамма-излучения, опасного для оптического кабеля, что следует принимать во внимание при проектировании и строительстве. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [6].

\*\*\*

Полностью диэлектрические оптические кабели подвержены воздействию сильных электромагнитных полей, возникающих при ударах молнии, под влиянием высоковольтных линий электропередачи и при высотных ядерных взрывах, которые в ряде случаев следует принимать во внимание [7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Соколов С.А.** Эффекты Керра и Фарадея в оптическом кабеле. – Электросвязь, 1996, №4.
2. **Соколов С.А.** Воздействие внешнего электромагнитного поля на оптический кабель, не содержащий металлических элементов. – Москва: МТУСИ, 1997.
3. **Соколов С.А.** Возникновение поляризованной модовой дисперсии под действием грозových разрядов. – Электросвязь, 2004, №11.
4. **Dwyer J.R.** et al. X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning. – Geophysical Research Letters, 2005, vol. 32, L01803.
5. **Dwyer J.R.** et al. A ground level gamma-ray burst observed with rocket-triggered lightning. – Geophysical Research Letters, 2004, vol. 31, L05119.
6. **Соколов С.А.** Воздействие грозových разрядов на оптические кабели в горной местности и вблизи высотных сооружений. – Первая миля, 2013, №2.
7. **Соколов С.А.** Электромагнитные воздействия на современную инфраструктуру связи. – Москва: Медиа паблишер, 2009, с. 182.

## "Навитех-2013" – ВАЖНОЕ СОБЫТИЕ РЫНКА НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В Центральном выставочном комплексе "Экспоцентр" с 24 по 26 апреля с успехом прошла 5-я Международная специализированная выставка навигационных систем, технологий и услуг "Навитех-2013". Смотр был организован и проведен "Экспоцентром" при поддержке Федерального космического агентства, Некоммерческого партнерства "Содействие развитию и использованию навигационных технологий" (НП "ГЛОНАСС"), Ассоциации "Глонасс/ГНСС-Форум", под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ и Правительства Москвы.

Выставку "Навитех-2013" посетили заместитель председателя Правительства Российской Федерации Дмитрий Рогозин, советник Президента Российской Федерации Игорь Левитин, заместитель Министра транспорта Российской Федерации Алексей Цыденов, председатель Комитета Государственной Думы по экономической политике, инновационному развитию и предпринимательству Игорь Руденский.

В этом году участниками смотра стали 63 компании из Белоруссии, Израиля, Канады, Китая, Литвы, России, Украины. В числе российских разработок – спутниковый модем МСС 1.0 ("АПК КОМ"), многофункциональные "интеллектуальные" системы спутникового мониторинга ASC-7 и ASC-8, бортовой ГЛОНАСС/GPS-трекер GNS-GLONASS 4.7 (Novacom Wireless), облачная web-платформа для мониторинга транспорта FortMonitor-3, навигационный терминал нового поколения с поддержкой "ЭРА ГЛОНАСС" FORT-112EG (Fort), навигационный ГЛОНАСС/GPS/SBAS модуль GeoC-3, бортовые терминалы Profi, Optim и Light от компании Omnicomm, автомобильный ГЛОНАСС/GPS-трекер Geopath PRO ("Геопуть"), ГЛОНАСС Сторож ("Радиотерминал"), трекер Naviset GT-50 ГЛОНАСС (Naviset), персональный трекер Voyager

3N ГЛОНАСС, спутниковые системы слежения за мобильными объектами Voyager "Контейнер" и 2N ГЛОНАСС, автомобильный трекер "Алькор", поисковый маяк "Антарес" ("ТранспортМониторинг рф."), маяки StarLine M15 и M17 ГЛОНАСС, адаптивная антенная решетка для навигационной аппаратуры пользователей GNSS.

Среди новинок зарубежных производителей большой интерес у многочисленных посетителей-специалистов вызвали модули для передачи данных в M2M сегменте HE920 и LE920 от компании Telit (Италия), влагозащищенный трекер FM120, автомобильный ГЛОНАСС/GPS-трекер, система мониторинга и управления автомобильным, морским и речным транспортом FM1200 от компании Teltonika (Литва), системы мониторинга и управления автомобильным транспортом FM-Tco3-GLONASS (Литва), 3G модуль для ЭРА ГЛОНАСС AHS3, 3G модуль EHSS Rel.2 (Германия), система мониторинга транспортных средств Gosafe G71, беспроводной модуль SIM900E SIMCom, GSM/GPRS модули G610, G620, GS10, 3G модуль H330 Fibocom (Китай), программное обеспечение Wialon Hosting (Белоруссия), 3G видеоплюс CVG-M от компании SerVision (Израиль), спутниковый GPS/Inmarsat терминал для слежения за контейнерами Skyware (Канада), расходомер топлива DFM 500D производства Технолтон (Белоруссия).

В рамках форума состоялись круглые столы, посвященные развитию российского рынка навигационных услуг. Ждем Вас на следующей международной выставке "Навитех-2014", которая пройдет с 23 по 26 апреля 2014 года в ЦВК "Экспоцентр". В эти же сроки в рамках выставки состоится VIII Международный форум по спутниковой навигации.

*По материалам пресс-службы ЗАО "Экспоцентр"*