УДК 621.315, 681.7.068

В.А. Конышев¹, Т.О. Лукашова¹, О.Е. Наний^{1,2}, А.Г. Новиков¹, В.Н. Трещиков^{1,3}, Р.Р. Убайдуллаев¹

¹ООО «Т8 НТЦ», г. Москва, Россия ²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия ³Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ УДАРОВ МОЛНИИ НА РАБОТУ КОГЕРЕНТНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ВОЛС-ВЛ

В статье приводятся количественные оценки влияния ударов молнии на работу когерентных систем передачи информации, использующих инфраструктуру высоковольтной линии электропередачи (ВОЛС-ВЛ) на основе оптического грозотроса. Учитываются: средние статистические параметры разряда молнии; геометрия ЛЭП и оптического грозотроса; физические свойства транспондера (настраиваемые параметры) и оптического когерентного сигнала. Приводится критерий работоспособности когерентного канала связи с учетом воздействия ударов молнии при оптимальной настройке параметров когерентного транспондера. Даны рекомендации по вводу в эксплуатацию когерентных DWDM-линий, использующих в качестве инфраструктуры ВОЛС-ВЛ с оптическим грозотросом.

Ключевые слова: ВОЛС-ВЛ, ОКГТ, удар молнии, высоковольтная линия электропередачи, оптический грозотрос, эффект Фарадея, стандартное одномодовое волокно, SSMF, когерентная линия передачи, скорость вращения SOP, состояние поляризации, запас по OSNR, требуемый OSNR, BER, коэффициент ошибок.

V.A. Konyshev¹, T.O. Lukashova¹, O.E. Nanii^{1,2}, A.G. Novikov¹, V.N. Treshchikov^{1,3}, R.R. Ubaydullaev¹

¹OOO "T8 STC", Moscow, Russia ²Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia ³Institute of Radio Engineering and Electronics, them. V.A. Kotelnikov RAS, Moscow, Russia

INFLUENCE OF A LIGHTNING STRIKE ON ROBUSTNESS OF COHERENT AERIAL FIBER OPTIC COMMUNICATION LINE

The quantitative estimations of the impact of lightning strikes on the operation of coherent fiber optic communication line using the infrastructure of a high-voltage power line (FOCL-VL) are presented. Following parameters are taken into account: average statistical values of a lightning discharge; power linesand optical ground wiregeometries; physical properties of the transponder (tunable parameters) and optical coherent signal. A robustness criterion of the coherent communication channel is given taking into account the effects of lightning strikes with optimal tuning of the parameters of a coherent transponder. Recommendations on the deploying of coherent DWDM lines using FOCL-VL with an optical ground wire as infrastructure are given.

Keywords: coherent fiber optic communication line, FOCL, optical ground wire, OPGW, OSNR margin, required OSNR, standard single mode fiber, high-voltage line, lighting strike, Faraday effect, state of polarization, SOP rotation rate, BER.

Введение

Рост телекоммуникационного трафика в современную эпоху заставляет в протяженных DWDM-линиях связи переходить с традиционного канального оптического оборудования 10 Гбит/с, использующего амплитудные форматы модуляции, на оборудование с когерентными оптическими каналами, использующее амплитудно-фазовые форматы модуляции с поляризационным мультиплексированием, обеспечивающее значительно большую скоростью передачи. Так, в последние несколько лет в целях увеличения эффективности существующих ВОЛС стали проектироваться когерентные DWDM-линии с канальной скоростью 100, 200 Гбит/с и более. Современные когерентные системы связи обеспечили значительное увеличение пропускной способности волоконно-оптических линий и сетей связи благодаря использованию поляризационного мультиплексирования и многоуровневых квадратурных форматов модуляции. Для их работы не требуется использование физических компенсаторов дисперсии на промежуточных узлах линии связи благодаря электронной компенсации дисперсии.

Однако в последние годы у когерентных систем, использующих инфраструктуру воздушной линии электропередач (ВОЛС-ВЛ, волоконно-оптическая линия связи по высоковольтной линии), обнаружился один недостаток. Так, в канале когерентной системы передачи в те периоды времени, когда воздушная ВОЛС оказывается в зоне грозового фронта, возникают ошибки. Сегодня природа этого явления в целом понятна – в процессе грозы удар молнии формирует в волокне сильное продольное магнитное поле, изменение которого, в свою очередь, приводит к вращению состояния поляризации оптического сигнала и появлению ошибок на приемной стороне. В то же время количественный анализ влияния ударов молнии на работоспособность когерентной системы передачи не проводился. Этому посвящена данная статья.

Оптический грозотрос и удар молнии

Использование воздушных линий электропередач в качестве инфраструктуры ВОЛС является весьма рентабельным решением. Технологии ВОЛС-ВЛ интенсивно развиваются последние 20 лет. Различают несколько типов кабелей: оптический кабель, грозозащитный трос, далее оптический грозотрос (ОКГТ); оптический кабель самонесущий неметаллический (ОКСН); оптический кабель, встроенный в фазный провод (ОКФП), и оптический кабель самонесущий металлический (ОКСМ). Наиболее надежным решением для ЛЭП высокой вольтажности является использование оптического грозотроса. Так, согласно технической политике ОАО «Россети», одной из крупнейших электросетевых компаний в мире, на линиях 110 кВ и выше рекомендуется организация ВОЛС на основе ОКГТ. Расчет грозоупорности и механической стойкости оптического грозотроса обеспечивает не приводящую к повреждению эксплуатацию оптического волокна из-за механического (сильный ветер) и температурного (удар молнии) воздействий. Главная функция грозотроса – принимать на себя удар молнии и тем самым снижать воздействие перепадов напряжения на фазные провода. Если грозозащитного троса нет, события попадания молнии в фазный провод *1* и в опору ЛЭП 2 примерно равновероятны (рис. 1). При наличии грозотроса равновероятными становятся следующие события: попадание молнии непосредственно в опору 2 и попадание молнии в грозотрос 3, в то время как вероятность попадания молнии в фазный провод составляет 0,5 % от общего числа попаданий молнии.



Рис. 1. Варианты удара молнии: *1* – попадание молнии в фазный провод; 2 – попадание молнии в опору; *3* – попадание молнии в грозотрос

Каналы связи на основе традиционной системы оптической передачи 10 Гбит/с с форматом модуляции ООК не чувствительны к изменениям поляризации оптического сигнала, и в линиях с использованием ВОЛС-ВЛ в таких каналах не возникают ошибки при ударах молнии. Битовые ошибки при пересечении грозового фронта ВОЛС-ВЛ обнаруживаются только в оптических каналах с когерентной системой передачи. Такие системы стали внедряться последние 5 лет. При рассмотрении молнии в первую очередь нас будет интересовать такой ее параметр, как крутизна – производная силы тока молнии по времени. Эта величина достигает максимума на переднем фронте молнии (рис. 2).



Рис. 2. Форма импульса тока молнии

Повторный удар молнии с отрицательным разрядом, происходящий в том же самом плазменном канале, хотя и имеет меньшее значение тока в максимуме, как правило, характеризуется большей крутизной переднего фронта. На основании статистических данных измерений установлены значения вероятности различных значений крутизны переднего фронта молнии (рис. 3) для разных типов молнии, ГОСТ Р. 55630– 2013. Как видно из рисунка, большей крутизной (правый график) характеризуется статистика по второму (повторному) отрицательному разряду молнии.



Рис. 3. Статистическое распределение крутизны токов молнии: 1 – отрицательные первые разряды; 2 – отрицательные последующие разряды; 3 – положительная молния в землю

Внешний вид оптического грозотроса представлен на рис. 4. Силовым элементом грозотроса являются стальные проволоки, токопроводящим – алюминиевые. Волокна в гидрофобном заполнителе находятся в одной или нескольких трубках. Для устойчивости конструкции внешние проволоки кабеля имеют скрутку. Именно наличие скрутки токопроводящих алюминиевых проволок приводит к формированию спирального тока в грозотросе при ударе молнии и появлению продольного компонента магнитного поля.



Рис. 4. Оптический грозотрос

Таким образом, при протекании тока по грозотросу исключительно из-за его скрутки внутри грозотроса формируется продольное магнитное поле. Величина вектора магнитной индукции [Тл, Тесла, СИ] в грозотросе определяется формулой:

$$B = \mu_0 \frac{I}{d},\tag{1}$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума [$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м], l – сила тока молнии [A], d – шаг скрутки грозотроса [0,25 м]. Так, при токе 100 кА магнитная индукция в волокне *B* равна 0,5 Тл.

Эффект Фарадея

Эффект Фарадея (продольный магнитооптический эффект) заключается во вращении плоскости поляризации проходящего через прозрачную изотропную среду света под воздействием продольного магнитного поля. Для линейно-поляризованного излучения угол вращения плоскости поляризации на выходе Θ определяется по формуле:

$$\Theta = VBL, \tag{2}$$

где *V* – постоянная Верде́ (Verdetconstant), *B* – магнитная индукция приложенного поля, *L* – длина участка волокна. Значение постоянной Верде зависит от свойств вещества. Для оптического волокна V = 0,53 рад \cdot Тл⁻¹·м⁻¹. Если векторы магнитной индукции и распространения излучения сонаправлены, то вращение плоскости поляризации происходит по часовой стрелке, если смотреть по направлению распространения света (правило буравчика) (рис. 5).



Рис. 5. Эффект Фарадея

Формула (2) дает возможность определить угол вращения плоскости поляризации для изотропной среды. Если же среда не изотропна, эффект Фарадея не пропадает. В более общем случае оптического излучения с произвольной поляризацией для описания изменения состояния поляризации используется вектор состояния поляризации (SOP) (вектор Стокса). Теоретическое описание изменения SOP оптического излучения, распространяющегося в неизотропной среде со случайной слабой анизатропией вследствие эффекта Фарадея, дано в работе. Для описания вращения вектора SOP на сфере Пуанкаре введено понятие кумулятивного угла. Метод кумулятивного угла позволяет описать и частный случай изотропной среды и линейно-поляризованного излучения. В этом случае связь между кумулятивным углом θ и углом Θ поворота плоскости поляризации имеет простейший вид:

$$\theta = 2\Theta,$$
 (3)

Формулы для угла вращения SOP вследствие эффекта Фарадея для изотропной и неизотропной среды имеют вид:

$$\theta = 2VBL, \qquad (4)$$

$$\theta = \frac{1}{2\pi} VB \cdot L_{\rm B} \left(\frac{L}{L_{\rm C}}\right)^{\frac{1}{2}},\tag{5}$$

где в формуле (5) $L_{\rm B}$ и $L_{\rm C}$ – соответственно длина биений и корреляционная длина. Важным требованием применимости формулы (5) являются условия: $L \gg L_{\rm B}$ и $L \gg L_{\rm C}$. Для стандартного одномодового волокна можно считать, что $L_{\rm B} = 20$ м и $L_{\rm C} = 1$ км (волокно развернуто в полевых условия, Когельник). Если считать, что $L \sim 100$ м, то формула (5) не может быть применима.

На основании формул (1) и (4) получаем соотношение, связывающее скорость вращения состояния поляризации Ω с крутизной фронта молнии dI/dt:

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt} = 2\mu_0 V \frac{L}{d} \cdot \frac{dI}{dt} , \qquad (6)$$

где d – шаг скрутки, а L – эффективная длина, которая существенно зависит от того, как ток молнии растекается от точки удара молнии в грозотрос и в конечном счете также зависит от активных и реактивных компонентов сопротивлений проводов, опор и их заземлений. Если положить d = 25 см, L = 100 м, dI/dt = 10 кА/мкс, то по формуле (6) скорость вращения SOP будет определена как $\Omega = 5,3\cdot10^6$ рад/с.

Экспериментальное исследование зависимости требуемого OSNR от скорости вращения состояния поляризации

В компании Т8 было проведено экспериментальное исследование зависимости величины запаса по OSNR (OSNR_M) от скорости вращения состояния поляризации. Это позволило количественно оценить влияние эффекта Фарадея на работоспособность когерентной системы передачи.

Предварительно проводилась калибровка поляризационного скремблера, который объединял в себе два устройства – источник радиочастотного сигнала и вращающий поляризацию модулятор (рис. 5). Целью калибровки было обеспечение периодического вращения поляризации с постоянной скоростью от 0 до 2π и затем от 2π до 0 с заданным регулируемым периодом.



Рис. 5. Схема тестирования поляриметра: CL – непрерывный лазер; РМ – волокно, поддерживающее поляризацию; SSMF – стандартное одномодовое волокно; SPL – сплиттер; RF – источник радиочастотного сигнала; AOM – акустооптический модулятор; RPM – модулятор, вращающий поляризацию; ICR – интрадинный когерентный приемник; OSC – оциллограф

Для выполнения работ была собрана типовая экспериментальная установка, представленная на рис. 6.



Рис. 6. Экспериментальная установка: ТР – транспондер 100G DP-QPSK

В эксперименте снималась зависимость требуемого OSNR (OSNR_R) от скорости вращения состояния поляризации Ω в конфигурации Back-to-Back при включенном и выключенном режиме компенсации вращения состояния поляризации (рис. 7). Использовался когерентный транспондер 100G DP-QPSK (модель MS-400E-Q100-01 компании T8), скорость передачи 100 Гбит/с, формат модуляции DP-QPSK (табл. 1).

Таблица 1

Тестируемые режимы работы транспондера MS-400E-Q100-01

Описание	Значение	
Режим компенсации вращения состояния поляризации	ON / OFF	
(SOPsuppression)	UN / UFF	
Декодирование	Differential	
Скорость передачи	100 Гбит/с	
Бодовая (символьная) скорость, Гбод	33	
Формат модуляции	DP-QPSK	
FEC	15 %	



Рис. 7. Зависимости требуемого OSNR от скорости вращения вектора состояния поляризации на сфере Пуанкаре для транспондера MS-400E-Q100-01 T8 при выключенном (SOP suppression –OFF) и включенном (SOP suppression –ON) алгоритме отслеживания состояния поляризации

Как видно из рисунка, использование алгоритма компенсации быстрых изменений состояния поляризации позволяет существенно улучшить устойчивость работы транспондера в данных условиях. Далее будет исследоваться именно этот режим. Отметим, что при этом наблюдается небольшое увеличение OSNR_R при нулевой частоте.

Расчет параметров DWDM-линии в условиях эффекта Фарадея

При проектировании DWDM-линии возможна ее попролетная оптимизация. Оптимальная мощность P_n , вводимая в пролет с номером n, рассчитывается из условия минимизации BER и определяется по формуле:

$$P_n = \left(\frac{C_n}{2\eta_n}\right)^{1/3},\tag{7}$$

где $C_n = hvBA_nF_n$. Здесь A_n, F_n, η_n – соответственно в абсолютных единицах затухание в волокне, шум-фактор усилителя и коэффициент нелинейности для *n*-го участка DWDM-линии (участок включает в себя оптический пролёт и усилитель EDFA в конце пролёта).

При проектировании DWDM-линий в отсутствие эффекта Фарадея основным требованием при сдаче линии в эксплуатацию является выполнение условия на величину запаса по OSNR:

$$OSNR_{M} = \frac{OSNR_{L}}{OSNR_{R}} \ge 2, \qquad (8)$$

которое, будучи выраженным через расчетные параметры линии, переписывается в виде:

$$\operatorname{OSNR}_{L}\left(\frac{1}{\operatorname{OSNR}_{BTB}} - \frac{1}{\operatorname{OSNR}_{NL}}\right) = \frac{b - \sum_{n} \eta_{n} P_{n}^{2}}{\sum_{n} C_{n} / P_{n}} \ge 2, \qquad (9)$$

где $b = 1/OSNR_{BTB}$ (обратный требуемый OSNR в конфигурации Back-to-Back, SOP-ON). Наша задача определить, как изменится соотношение (9) для ВОЛС-ВЛ.

При проектировании устойчивых к ударам молнии когерентных DWDM-линий следует учитывать максимально возможную частоту вращения состояния поляризации Ω_0 или частоту, вероятность вращения выше которой ничтожно мала в условиях удара молнии. В работе приведено максимальное зарегистрированное значение скорости вращения SOP на ВОЛС-ВЛ протяженностью 500 км за один сезон наблюдения: $\Omega_0 = 5,1$ Мрад/с. Близкое к этому оценочное значение (5,3 Мрад/с) получено в данной работе. (В силу новизны проблемы в настоящее время нормы и правила по эксплуатации когерентных волоконно-оптических систем передачи с инфраструктурой ВЛ не выработаны как в России, так и в других странах.)

Используем снятую в лабораторных условиях экспериментальную зависимость требуемого OSNR в конфигурации ВТВ (OSNR_R) от скорости вращения состояния поляризации (Ω) (рис. 7) (схема эксперимента приведена на рис. 6). Определим модифицированное значение OSNR^{*}_{втв}:

$$OSNR_{BTB}^* = OSNR_R(\Omega_0).$$
(10)

На основании экспериментальной кривой находим для $\Omega_0 = 5,1 \text{ M pad/c: OSNR}^*_{\text{BTB}} = 13,4 \,\text{дБ}$. Отметим, что OSNR_R(0) совпадает с OSNR_{BTB}, определенным раньше.

Для того чтобы на линии не возникали ошибки во время удара молнии в грозотрос (при расчете считаем, что скорость вращения SOP не превосходит Ω_0), наряду с соотношением (9) должно выполняться соотношение:

$$\operatorname{OSNR}_{L}\left(\frac{1}{\operatorname{OSNR}_{BTB}^{*}} - \frac{1}{\operatorname{OSNR}_{NL}}\right) = \frac{b^{*} - \sum_{n} \eta_{n} P_{n}^{2}}{\sum_{n} C_{n} / P_{n}} \ge 1, \quad (11)$$

где введено обозначение $b^* = 1/\text{OSNR}^*_{\text{втв}}$.

Система неравенств (9), (11) является критерием сдачи линии в эксплуатацию.

При наличии более жестких условий со стороны заказчика к надежности DWDM-линии при расчете следует скорректировать формулу (11) на более сильное неравенство: в правой части «1» заменяется на «2». В таком случае соотношение (9) будет выполняться автоматически.

Заключение

При проектировании когерентных линий связи, использующих инфраструктуру ВОЛС-ВЛ, необходимо принимать во внимание наличие ударов молнии в процессе эксплуатации системы передачи. Требования к системе передачи становятся более строгими.

В статье приведена модель расчета скорости вращения SOP при прямом ударе молнии, которая для предельных значений параметров молнии и типовых параметров оптического грозотроса оказалась равной 5,3 Мрад/с. Эта величина хорошо согласуется с экспериментальным ста-

тистическим исследованием скорости вращений SOP при ударах молнии, проведенным в течение одного сезона на ЛЭП с оптическим грозотросом протяженностью 500 км.

Проведены экспериментальные измерения требуемого OSNR от скорости вращения состояния поляризации когерентного транспондера 100GDP-QPSK производства компании T8. С учетом этих измерений введено понятие модифицированного OSNR в конфигурации Back-to-Back для предельной скорости вращения SOP. На основе полученных результатов дана рекомендация по определению запаса по OSNR в линии, использующей один или несколько участков на базе BOЛC-BЛ.

Таблица 2

№ п/п	Параметр	Традиционные (некогерентные) ВОЛС	Когерентные ВОЛС
1	ASE	+	+
2	Нелинейность	+	+
3	Хроматическая дисперсия	+	_
4	PMD	+	_
5	PDL	+	+
6	Вращение SOP	—	+

Факторы, влияющие на ухудшение качества сигнала в волоконно-оптической линии связи (эта подпись центрируется по левому краю)

В табл. 2 приведены ограничивающие технические характеристики факторы для традиционных и когерентных ВОЛС. В статье был рассмотрен пункт 6.

Получено 1 июля 2020