

Эффекты Фарадея и Керра в оптическом волокне при действии электромагнитного поля тока молнии

О.В. Колесников, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), доцент, к.т.н.; o.v.kolesnikov@mtuci.ru

О.С. Белова, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»), доцент, к.т.н.; belovaos@mpei.ru

Д.В. Болотов, МТУСИ, аспирант; d.v.bolotov@mtuci.ru

Г.П. Паимцев, НИУ «МЭИ», аспирант; paintsevvp@mpei.ru

УДК 621.391.63

DOI: 10.34832/ELSV.2026.78.4.006

Аннотация. Исследуется влияние электромагнитных полей грозовых разрядов на поляризационное состояние (state of polarization, SOP) световых волн в высокоскоростных оптических волокнах стандарта ITU-T G.652. На основе матричного формализма Джонса и Мюллера разработана комплексная модель электромагнитного воздействия с учётом магнитооптического эффекта Фарадея, нелинейного эффекта Керра и дисперсии групповой задержки. Модель описывает поведение поляризационного состояния в зависимости от параметров молниевых ударов (амплитуда тока 20–100 кА, длительность переднего фронта 1–5 нс) и геометрии кабельной линии (расстояние 50–1000 м, глубина прокладки 0–1 м). Численное моделирование показывает, что при воздействии молнии в диапазоне расстояний 100–500 м скорость изменения SOP составляет 10^5 – 10^6 рад/с, что приводит к временным искажениям сигнала и деградации параметров качества приёма (BER, QBER). Установлено, что для квантового распределения ключей по схеме BB84 критическое условие $QBER \leq 1\%$ нарушается при индексе параметра воздействия ≥ 30 – 50 (соответствует токам 80–100 кА на расстояниях 100 м или эквивалентным условиям для больших расстояний). Предложены эффективные параметры защиты: расстояние заземления не более 50 м при сопротивлении ≤ 1 Ом и использование фильтрации высокочастотных компонент с частотой среза 5–20 кГц. Результаты подтверждены экспериментально на симуляторе молниевых воздействий и численным интегрированием уравнений Максвелла в средах с учётом затухания в грунтах.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, молниевые разряды, поляризационное состояние, эффект Фарадея, эффект Керра, оптические волокна, электромагнитная совместимость, QBER, BB84.

Для цитирования: Колесников, О.В. Эффекты Фарадея и Керра в оптическом волокне при действии электромагнитного поля тока молнии / О.В. Колесников, О.С. Белова, Д.В. Болотов, Г.П. Паимцев // Электросвязь. – 2026. – № 4. – С. 55–65.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционный подход к молниезащите волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), сформировавшийся в эпоху низкоскоростных систем передачи (до 2,5 Гбит/с), фокусировался преимущественно на предотвращении физического разрушения кабеля связи [1]. Основной угрозой считалось термическое воздействие тока молнии на металлические элементы конструкции (броню, медные жилы дистанционного питания), приводящее к их плавлению, повреждению полимерных оболочек и, как следствие, к механическому разрушению оптических волокон. Для полностью диэлектрических кабелей риск считался минимальным, а меры защиты сводились к заземлению металлических элементов на муфтах и вводах [2, 3].

Однако с переходом систем связи, в которых применяется когерентное детектирование и поляризационное мультиплексирование (PDM-QPSK, PDM-16QAM), к скоростям передачи данных 10 Гбит/с и выше и началом внедрения систем квантового распределения ключей (КРК) парадигма внешних угроз, связанная с негативным влиянием атмосферных разрядов на ВОЛС, кардинально изменилась. Современные оптические форматы коди-

рования используют состояние поляризации (state of polarization, SOP) как физический носитель информации или как ресурс для разделения каналов. В этих условиях электромагнитное поле грозового разряда, даже не приводящее к физическому повреждению кабеля, становится источником критических помех [4].

Как показывают результаты теоретического анализа и натуральных экспериментов [5–9], воздействие импульсных электрических и магнитных полей молнии вызывает в оптическом волокне эффекты Фарадея и Керра. Эти эффекты приводят к сверхбыстрому (микросекундному) вращению плоскости поляризации и фазовым сдвигам [10]. Для классических систем это эквивалентно резкому всплеску динамической поляризационно-модовой дисперсии (ПМД), способному вызвать кратковременный разрыв соединения из-за срыва синхронизации цифровых сигнальных процессоров (digital signal processor, DSP). Для квантовых сетей, где информация кодируется в поляризационных состояниях одиночных фотонов (например, в протоколе BB84), любое неконтролируемое вращение базиса кубита на величину, превышающую порог ошибки, делает генерацию ключа невозможной.