



15. Меркулов А. А., Кивчун О. Р., Урюпин М. Б., Дорофеев С. А. Процедуры методики мониторинга электропотребления регионального электротехнического комплекса // Инновации в науке, образовании и бизнесе-2014 : тр. XII Международной научной конференции. Калининград, 2014. С. 288 – 292.

16. Дорофеев С. А., Дюндик П. Ю., Меркулов А. А. Трехуровневая структура оценки потенциала энергосбережения техноценоза на основе техноценологического подхода // IV Международный Балтийский морской форум : матер. Международного морского форума. Калининград, 2016. С. 1602 – 1608.

#### Об авторах

Виктор Иванович Гнатюк – д-р техн. наук, проф., Калининградский технический университет, Калининград.

E-mail: mail@gnatukvi.ru

Олег Романович Кивчун – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: oleg\_kivchun@mail.ru

Сергей Алексеевич Дорофеев – канд. техн. наук, нач. кафедры, Филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА», Калининград.

E-mail: oleg\_kivchun@mail.ru

#### About the authors

Prof. Viktor Gnatiyk, Kaliningrad State Technical University.

E-mail: mail@gnatukvi.ru

Dr Oleg Kivchyn, ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: oleg\_kivchun@mail.ru

Dr Sergey Dorofeev, ass. prof., MESC MMF «VMF», Kaliningrad.

E-mail: oleg\_kivchun@mail.ru

УДК 539.143.539.183

***П. С. Кузьменко, А. А. Шпилевой, Е. С. Ягодкина***

### **К ВОПРОСУ О МОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ**

*Представлен модифицированный способ мониторинга оптического волокна в волоконно-оптических линиях связи, применение которого позволит более точно определять местоположение поврежденного участка, снизить затраты на обслуживание линий, повысить надёжность функционирования волоконно-оптических кабелей в условиях внешних негативных воздействий.*

*A modified method of monitoring optical fibers in the fiber-optic communication lines is presented. Its implementation will allow to more accurately determine the location of the damaged area, to reduce the cost of service lines, to improve the reliability of fiber-optic cables in terms of external negative influences.*

**Ключевые слова:** волоконно-оптическая линия, оптический рефлектометр, коэффициент отражения, рассеянное излучение, оптический сигнал.

**Key words:** fiber optic line, optical reflectometer, the reflection coefficient, dissipated radiation, optical signal.

Качество работы волоконно-оптической линии связи как среды передачи данных в значительной степени зависит от состояния оптического волокна, определяемого способом прокладки линии, погрешностями соединений, выполнением проектных и эксплуатационных требований для магистральной и т.п. Оптическая сеть обычно состоит из множества узлов, соединенных между собой посредством участков оптического волокна, известных как «сегменты» (рис. 1). Типовая сеть содержит множество узлов «А», входящих в одну из  $N$ -местных сетей  $P_N$ , соединенных посредством сегментов волокна с центральной станцией «Ц». Каждая из местных сетей содержит  $N$  станций  $B_N$ , обеспечивающих покрытие потребностей населения, входящих в систему зоновой системы связи. Причем для покрытия растущих потребностей населения в обмене информацией каждая зоновая система  $P_N$  построена по принципу «каждый с каждым» [1], что обеспечивает высокий уровень удовлетворения информационного поля потребителя.

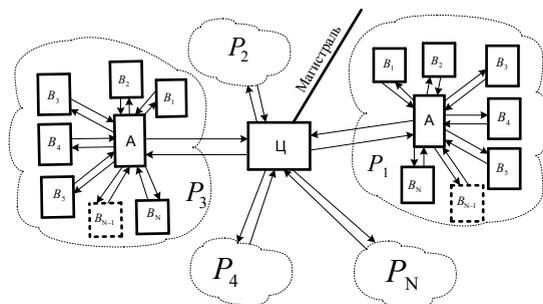


Рис. 1. Структура типовой сети связи с волоконно-оптическими сегментами

Центральная станция «Ц» имеет соединительные сегменты, построенные по принципу «каждый с каждым» с центральными станциями «А» в каждой из  $N$  сегментов для Зоновых систем  $P_N$ . Обычно сеть содержит больше количество первичных и вторичных узлов, представляющую сложную межузловую систему, входящую в первичную и вторичную систему связи Российской Федерации. Эта особенность связана с протяжённостью территории и большими расстояниями между населёнными поселками. Каждый сегмент может содержать как минимум



два волокна: исходящее волокно, чтобы осуществлять передачу трафика, в форме модулированного оптического сигнала из узла, и обратное волокно, чтобы переносить трафик в узел. Хотя показанные сегменты соединяют два соседних узла (например, «Ц» и «А»), следует принимать во внимание, что «сегмент» может в равной степени упоминаться как соединение между двумя несмежными узлами, например «А» и любой из « $B_N$ » как не имеющий промежуточных узлов.

Таким образом, сеть может содержать большое количество различных типов узлов, каждый из которых выполняет одну или более функций. Например, узлы «А» в каждой системе  $P_N$  являются узлами добавления и извлечения, в которых оптические сигналы трафика добавляются или извлекаются из сети «Ц» и «А». Такие узлы содержат источники лазерного оптического излучения, на выходе которых модулируется электрический сигнал, чтобы создавать сигнал трафика, а также оборудование для демодуляции, которое позволяет восстанавливать информацию в форме электрического сигнала из принимаемого оптического излучения. Узел «А» — узел повторителя, который не добавляет и не извлекает сигналы из сети «Ц», а вместо этого перенаправляет принимаемые оптические сигналы далее, обычно с дополнительным усилением, чтобы повышать мощность сигнала в сегменты к сети « $B_N$ ». Кроме того, узлы «Ц» и «А» могут выполнять обе из этих функций узла и могут иметь возможность добавлять-удалять сигналы из трафика, а также усиливать и повторно передавать принимаемые сигналы трафика. Передача сигналов по сети управляется из центральной станции «Ц», полученной через магистраль. Центральная станция «Ц» наблюдает за маршрутизацией сигналов и обнаружением повреждений в рамках сети до узлов «А» в каждой из сетей « $P_N$ ».

Когда оптическое волокно в рамках сети повреждается, сегмент, в котором возникает разрыв, можно обнаруживать из того факта, что узел-усилитель приемного устройства не принимает оптическую мощность из узла удаленного передающего устройства [2]. Когда используется термин «разрыв», подразумевается то, что волокно повреждено так, что оптические сигналы вообще не передаются по волокну в приемное устройство, удаленное от источника оптических сигналов [3].

Размеры сегмента в рамках сети могут достигать 100 км. Таким образом, в случае повреждения волокна позиция разрыва в сегменте должна определяться с точностью, исключающей необходимость выполнять поиск разрыва по всему сегменту. В связи с этим важной задачей является определение точного места разрыва волокна в поврежденном сегменте.

Наиболее распространенный способ определения разрывов основывается на регистрации и последующей обработке сигнала обратного рассеяния в волокне, осуществляемый при помощи оптического рефлектометра [1]. Оптическое измерение коэффициента отражения во временной области требует отправки кратковременных импульсов с высоким уровнем мощности излучения в тестируемое волокно и обнаружения сигнала, который обратно рассеивается из разрыва или де-

фекта в волокне. Расстояние до разрыва может быть определено посредством обработки сигнала известными способами [4]. При этом сегмент волокна, подлежащий исследованию, исключается из системы связи. Следовательно, для использования данного метода всегда необходимо иметь запасные сегменты.

На рисунке 2 показан метод оценки состояния тестируемого волокна с использованием оптического рефлектометра. Блок управления программирует работу лазера для излучения импульса и прием светодио-дом отраженной и рассеянной мощности в тестируемом волокне. Результаты исследований параметров тестируемого сегмента волокна отражаются блоком информации в виде графиков, приведенных на рисунке 3. По рефлектограмме можно определить конец волокна, местонахождение оптоволоконных стыков и потери в них, а также полные потери в волокне.

72

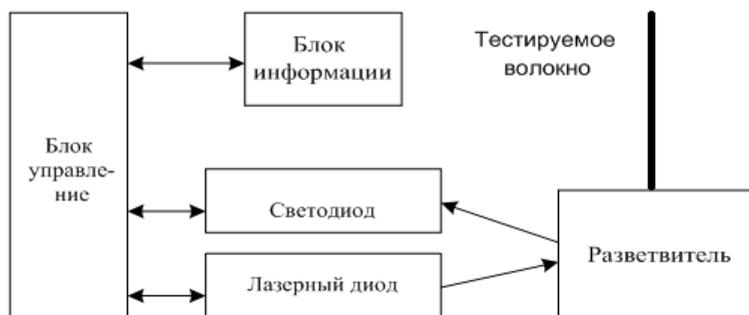


Рис. 2. Схема метода оптической рефлектометрии для волоконно-оптической линии связи

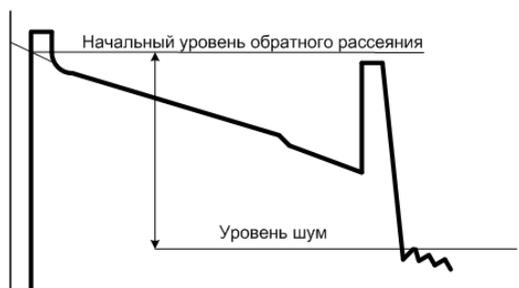


Рис. 3. Пример рефлектограммы оптического волокна

При посылке светового импульса по волокну часть энергии импульса рассеивается в стекле на примесях (релеевское рассеяние), что способствует возврату к источнику, а также отражается ввиду резкого изменения коэффициента преломления в волокне (френелевское отражение), например, при обрыве волокна в стыках. Представленный на рисунке 3 участок равномерного убывания интенсивности светового импульса связан с релеевским рассеянием, а отраженный световой импульс в конце рефлектограммы вызван обрывом волокна в стыке.



Такие системы могут использоваться только тогда, когда вся линия связи в обоих направлениях является бездействующей, поскольку использование внутриволнового сигнала (т. е. сигнала с идентичной или аналогичной трафику длиной волны) может создавать помехи и нарушать трафик, присутствующий в рассматриваемом сегменте, и в сегментах в нисходящем направлении. Необходимо следить за тем, чтобы не допускать выгорания контактов оптики приемного устройства посредством отраженного сигнала, поскольку внутриволновой отраженный сигнал усиливается посредством оптических повторителей способом, аналогичным каналам трафика, и следовательно, есть риск его демультимплексирования и отправки в чувствительную оптику приемного устройства.

Работающие системы преодолевают эти проблемы использованием тестового сигнала с отличной от трафика длиной волны, например вневолнового тона или оптического контрольного канала, для рефлектометров. Тем не менее такие системы являются более дорогими, поскольку они требуют дополнительного тестирующего оборудования в виде добавочного линейного усилителя, а иногда и дополнительного «резервного» волокна. При этом необходима установка такого оборудования, представляющего собой автономный инструментальный OTDR в каждом узле. Очевидный недостаток такого подхода заключается в необходимости использования специализированного персонала, который должен сначала обнаруживать местоположение разрыва с одного конца волокна, а затем прибыть к месту повреждения с целью его восстановления. Это приводит к повышению трудовых и финансовых затрат.

Альтернативу может составлять следующая методика мониторинга оптического волокна. Модуляция оптического сигнала осуществляется с помощью сигнала трафика. Модуляция оптического сигнала - с помощью тестового сигнала на основе некогерентного оптического измерения коэффициента отражения в частотной области (IOFDR). Дважды модулированный оптический сигнал передается в оптическое волокно в первом конце волокна. Происходит обнаружение рассеянного излучения, выводимого из первого конца волокна. Выполняется анализ обнаруженного рассеянного излучения с использованием некогерентного оптического измерения коэффициента отражения в частотной области и определяется расстояние до разрыва в оптическом волокне. С помощью этого способа местоположение разрыва волокна может быть определено в то время, когда волокно используется, без нарушения трафика в волокне или в волокнах в нисходящем направлении и без риска повреждения оптики приемного устройства в нисходящем направлении.

Поскольку IOFDR-сигнал может модулироваться в оптический сигнал с использованием усилителя, идентичного усилителю, используемому для сигнала трафика, и при длине волны, идентичной длине волны сигнала трафика, то для формирования сигналов трафика и IOFDR необходим только один усилитель и излучатель. Сигнал трафика может модулироваться в оптический сигнал перед тестовым IOFDR-сигналом (например, если IOFDR введено в оптический сигнал в усили-



теле повторителя, который выполнен с возможностью усиливать входящий оптический сигнал и повторно передавать усиленный оптический сигнал). Следует принимать во внимание, что альтернативно сигнал трафика может модулироваться в оптический сигнал после тестового IOFDR-сигнала (например, если оптический сигнал, включающий в себя тестовый IOFDR-сигнал, сформирован посредством линейного усилителя/лазера, причем этот сигнал затем модулируется с помощью сигнала трафика). Этапы модуляции выходного сигнала лазера, передачи дважды модулированного оптического сигнала и обнаружения рассеянного излучения могут повторяться многократно, причем частота тестового IOFDR-сигнала изменяется по меньшей мере в одном из этих случаев и предпочтительно в каждом из множества случаев. При этом частота пошагово увеличивается.

Анализ обнаруженного рассеянного излучения может включать сравнение рассеянного излучения с дважды модулированным оптическим сигналом. Сравнение включает в себя комбинирование обнаруженного рассеянного сигнала со сдвинутой по фазе копией дважды модулированного оптического сигнала и фильтрацию этого комбинированного сигнала с помощью фильтра нижних частот. Вышеуказанная обработка может выполняться для того, чтобы определять частоту  $f_{\max}$ , соответствующую максимуму комбинированного сигнала.

Анализ обнаруженного рассеянного излучения дополнительно может включать в себя определение длины волокна или набора длин волокна, ассоциированных с отражениями, из частоты  $f_{\max}$ . В случае если набор длин волокна соответствует частоте  $f_{\max}$ , этап анализа дополнительно может включать в себя различение реального расстояния до разрыва волокна из набора длин. Длина волокна определяется посредством решения уравнения

$$f(L) = e^{-2La} \sqrt{(2k_{\max}L)^2 + (2La + 1)^2} \sin \left( 2k_{\max}L + 2\arctg \frac{k_{\max}}{a} + \arctg \frac{2La + 1}{2k_{\max}L} \right) = 0.$$

В случае если набор длин волокна соответствует частоте  $f_{\max}$ , то для различения реального расстояния до разрыва волокна, решения уравнения  $f(L)$ , которые не касаются абсолютного максимума уравнения

$$G(f, L, a) = \frac{\sqrt{(e^{2La} \cos(2kL) - 1)^2 + (e^{2La} \sin(2kL))^2}}{\sqrt{a^2 + k^2}} \times \sin \left( -\arctg \frac{k}{a} + \arctg \frac{e^{2La} \sin(2kL)}{e^{2La} \cos(2kL) - 1} \right),$$

могут быть исключены.

Способ мониторинга оптического волокна дополнительно может содержать: модуляцию оптического сигнала с помощью второго тестового сигнала и некогерентное оптическое измерение коэффициента отражения в частотной области IOFDR; передачу модулированного оптического сигнала в оптическое волокно или ассоциированное оптиче-



ское волокно на втором его конце; обнаружение второго рассеянного излучения, выводимого из второго конца оптического волокна; анализ второго рассеянного излучения, а также первого рассеянного излучения с помощью некогерентного оптического измерения коэффициента отражения в частотной области в целях определения расстояния до точки разрыва.

Под «ассоциированным волокном» подразумевается волокно, которое следует физическому маршруту, идентичному маршруту первого оптического волокна, например, волокно, которое находится в одном кабеле, или канале с первым волокном. Одним примером ассоциированных волокон является пара волокон, идущих между двумя сетевыми узлами, причем пара содержит исходящее волокно для переноса трафика между узлами в первом направлении и обратное волокно для переноса трафика между узлами во втором направлении, противоположном первому направлению. Такой модифицированный способ фактически предполагает применение первого способа дважды – с противоположных концов волокна.

Модифицированный способ позволит более точно определять местоположение разрыва волокна, в частности, для случая более длинных волокон. Анализ может основываться на сравнении набора возможных длин до разрыва, которые определены из первого рассеянного излучения, с набором возможных длин, которые определены из второго рассеянного излучения, чтобы определять реальное расстояние до места повреждения.

Постоянный мониторинг состояния волоконно-оптических магистральных и зоновых кабелей позволит повысить их эксплуатационные характеристики в условиях интенсивного силового воздействия и влияния агрессивной внешней среды.

#### Список литературы

1. Вдовенко В. С., Горшков Б. Г., Заирный М. В. и др. Когерентный рефлектометр с двухволоконным интерферометром рассеянного излучения // Квант. электрон., 2011. Т. 41, № 2. С. 176–178.
2. Сокольников А. В., Косарев А. В. Контроль характеристик и параметров оптического волокна и устройств на его основе. М., 2012.
3. Филипенко А. И., Пономарева А. В. Контроль конструктивно-технологических параметров микроструктурированного волокна в АСУ ТП вытяжки волокна // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. № 1/5 (43). С. 17–20.
4. Невлюдов И. Ш., Пономарёва А. В., Аллахверанов Р. Ю. Способ оценки качества оптического волокна со сложной формой поперечного сечения // Проблемы телекоммуникаций. 2015. № 1 (16). С. 117–128.

#### Об авторах

Полина Сергеевна Кузьменко – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: PKuzmenko@kantiana.ru



Андрей Алексеевич Шпилевой — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Елена Сергеевна Ягодкина — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: EJagodkina@kantiana.ru

#### **About the authors**

Polina Kyzmenko, student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: PKyzmenko@kantiana.ru

Dr Andrey Shpilevoy, ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

Elena Jagodkina, student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: EJagodkina@kantiana.ru