

Обнаружение механически напряжённых участков оптических волокон в оптических кабелях с помощью Brillouinovских рефлектометров

И. В. Богачков, Н. И. Горлов

В статье приведены результаты исследований натяжений оптических волокон и оптических кабелей, находящихся под действием механических нагрузок при различных производственных процессах, с помощью Brillouinovских оптических импульсных рефлектометров. Результаты исследований подтвердили преимущество метода Brillouinovской рефлектометрии для ранней диагностики и обнаружения локальных механически напряжённых участков оптических волокон. Для определения общего удлинения оптических волокон эффективно использовать метод измерения фазового сдвига.

Ключевые слова: оптическое волокно, натяжение, оптический кабель, ранняя диагностика, Brillouinovский рефлектометр.

1. Введение

Важной задачей ранней диагностики оптических волокон (ОВ) является своевременное обнаружение и устранение механически напряжённых участков в ОВ, находящихся в оптических кабелях (ОК) [1–7].

В процессе изготовления ОВ могут возникать локальные неоднородности кварца (в том числе микротрещины), создающие внутренние напряжения, которые делают ОВ уязвимым к изгибам или вибрациям. В результате разрывная прочность ОВ снижается [1–4, 7].

Повышенное натяжение ОВ в проложенных ОК влияет на долговечность ОК. По данным фирм Fujikura и Corning, при продольном натяжении более 0.3 % вместо ожидаемых 25 лет срок службы ОВ при данном натяжении снижается до 5–10 лет, а при натяжении порядка 1 % составит менее года [1–4].

Для обнаружения подобных «проблемных» участков ОВ применяется метод Brillouinovской рефлектометрии или метод фазового сдвига [1–4]. Метод Brillouinovской рефлектометрии положен в основу работы Brillouinovских рефлектометров (BOTDR – Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) и анализаторов (BOTDA – Brillouin Optical Time Domain Analyzer), которые способны предоставить точную информацию о распределении степени натяжения ОВ вдоль его длины, а на основе этой информации позволяют прогнозировать деградацию и обрыв ОВ [1–5, 8].

Опыт последних лет заставил производителей ОВ и ОК предусмотреть меры, которые минимизируют влияние изгибов и деформаций ОК на натяжение ОВ и повышают надёжность ОК в целом.

Для выявления дефектов ОВ на производстве применяют контрольную перематку ОВ под нагрузкой [3, 4, 7], что позволяет выявить явные «хрупкие» участки.

При производстве ОК ОВ в нем должны укладываться с некоторой свободой (с избыточной длиной ОВ), чтобы при изгибах ОК был определённый запас по их натяжению, что реа-

лизуются производителями ОК в модульных конструкциях. Невыполнение этого условия может привести к опасным уровням натяжения.

В процессе производства ОК необходимо на разных этапах контролировать характеристики ОВ в нем, в том числе такие, как натяжение (удлинение) ОВ.

2. Сведения из теории

Световой сигнал в ОВ, находящихся в условиях повышенного продольного натяжения, вызывает «раскачивание» микротрещин, которые неизбежно возникают при кристаллизации кварцевого стекла в процессе производства ОВ [5, 6]. Это и приводит в итоге к росту этих микротрещин в процессе эксплуатации ОК (медленному – при продольном натяжении около 0.2 % или быстрому – при натяжении более 1 %), а в конечном результате – к деградации ОВ и его преждевременному разрушению [2–5].

Для стандартного одномодового ОВ (Рекомендация МСЭ-Т G.652) характер зависимости срока службы от его натяжения по типовым данным фирмы Fujikura позволяет выделить безопасный диапазон натяжений – менее 0.2 %, недопустимый – более 0.6 %, промежуточный диапазон значений натяжений, требующий дополнительного анализа [1–4] также следует отнести к недопустимым для ОВ в проложенных ОК, так как долговечность ОК в этом случае сокращается [1–6]. Для обеспечения гарантийного срока службы ОК длительностью 25 лет натяжение ОВ не должно превышать 0.26 %. При увеличении натяжения ОВ до 0.45 % появляется 50-процентная вероятность обрыва ОВ в течение срока эксплуатации [3–4].

Хотя в этих оценках не учитывался ряд факторов (дополнительные микрповреждения ОВ или проникновение влаги к поверхности ОВ), из них следует, что даже незначительное увеличение продольного натяжения ОВ может приводить к многократному уменьшению его срока службы [2].

Так как ОВ, материалы модулей, защитные элементы и оболочки ОК имеют различные коэффициенты удлинения и теплового расширения, то в случае изменения температуры могут возникать существенные напряжения внутри ОВ из-за неравномерного расширения соприкасающихся материалов [6, 8].

Контроль механических натяжений ОВ с возможностью пространственной локализации «проблемных» участков ОВ является одним из важнейших достоинств метода бриллюэновской рефлектометрии.

Даже при стендовых испытаниях ОК в лабораторных (производственных) условиях эта способность полезна, поскольку удлинение ОВ на отдельных его участках может значительно превышать предельно допустимую величину, хотя усредненное значение, получаемое с использованием методов МЭК 60794-1, таких как метод измерения приращений затухания и метод измерения фазового сдвига, может оставаться в допустимых пределах [2–4].

Метод фазового сдвига основан на измерении (контроле) сдвига фазы оптического сигнала относительно сформированного опорного канала, что позволяет по приращению фазы получить значение удлинения ОВ [3, 5, 7, 11].

В процессе производства ОВ и ОК несложно получить доступ к обоим концам ОВ. Это позволяет применять метод измерения фазового сдвига или BOTDA. BOTDR достаточно подключить к одному концу ОВ, что очень важно для измерений, необходимых при строительстве и эксплуатации ОК [1–6].

В основу работы BOTDR положен метод бриллюэновской рефлектометрии, основанный на анализе спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (СРМБ) в световоде, которое наблюдается при введении в ОВ излучения повышенной мощности.

Компоненты СРМБ имеют частотный сдвиг на величину, пропорциональную натяжению ОВ и его температуре. Определив распределение СРМБ вдоль световода и вычислив бриллюэновский сдвиг частоты (так называется частота максимума СРМБ), можно получить кар-

тину распределения натяжений в ОВ, найти их характеристики и проанализировать причины, вызвавшие эти изменения СРМБ [2–6].

После обработки рефлектограммы СРМБ BOTDR выводит картину распределения натяжения исследуемого ОВ вдоль продольной координаты.

3. Постановка задачи

С целью изучения особенностей бриллюэновских рефлектограмм ОВ, находящихся в ОК, которые получают дополнительные натяжения из-за воздействия различных факторов, были проведены экспериментальные исследования с помощью BOTDR «Ando AQ 8603» и «ViaviMTS-8000».

4. Результаты экспериментов

В экспериментальных исследованиях, результаты которых представлены ниже, изучались ОК, содержащие стандартные одномодовые ОВ (Рекомендация МСЭ-Т G.652).

У катушек ОВ, изготовленных из одной заготовки, профиль СРМБ, бриллюэновский сдвиг частоты, а значит, и характеристики натяжения практически не отличаются, но для ОВ из разных партий даже у одного производителя наблюдается некоторый разброс этих характеристик [3, 4].

На рис. 1 приведена картина натяжения ОВ, находящегося на катушке, которая получена с помощью BOTDR «Ando AQ 8603».

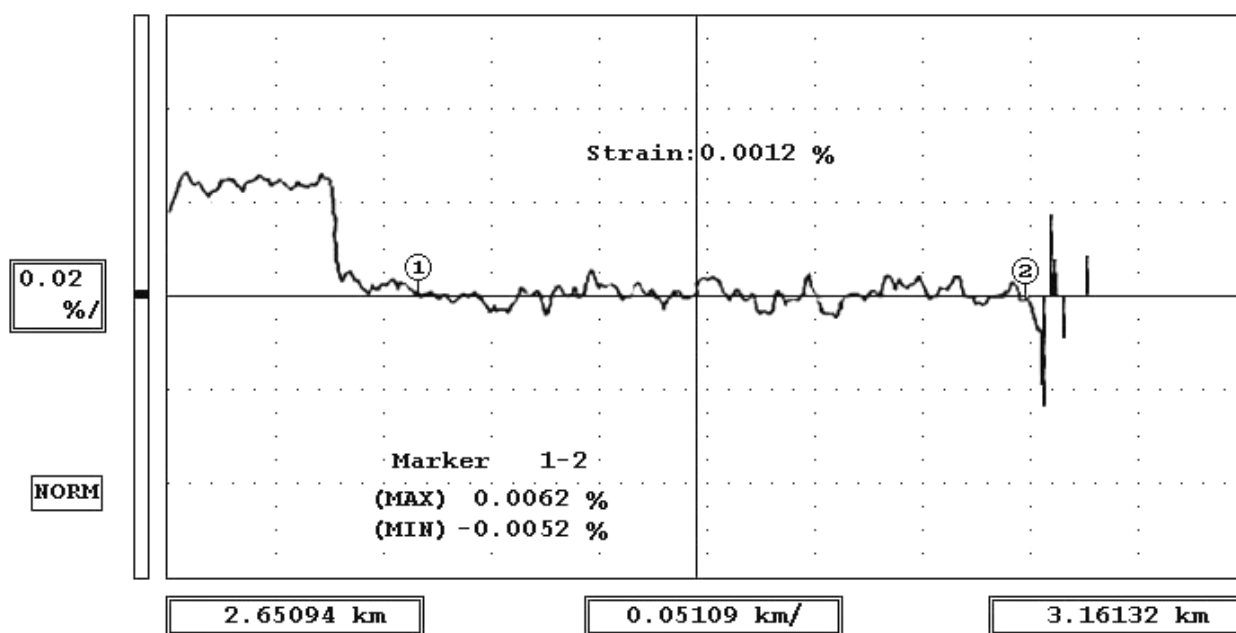


Рис. 1. Картина натяжения ОВ, находящегося на катушке

Хотя натяжение ОВ разных участков (центр или края) и слоёв (внешние или внутренние) незначительно отличается, оно совершенно неопасно для долговечности ОВ. При размотке ОВ в линию (или перемотке ОВ в бухту) картина натяжения между маркерами «1» и «2» превращается почти в прямую линию, проходящую по уровню « -0.002% », поэтому рефлектограмма натяжения ОВ, находящегося на катушке, достаточна для оценки качества ОВ перед следующими стадиями производства ОК.

Для производителей желательна максимально возможная скорость производства ОК. Для ускорения технологических процессов необходимы высокие скорости движения ОВ (при нанесении защитной оболочки (покраске) ОВ – порядка 17 м/с, при формировании оптического модуля – порядка 6 м/с и т.п.), которые требуют приложения дополнительной силы при перемотке. В процессе перемотки натяжение ОВ повышается, а после завершения перемотки из-за «фиксации» некоторых участков ОВ по различным причинам может сохраниться остаточное натяжение [3, 4].

Например, при нанесении защитной оболочки (покраске) ОВ после её отверждения (высыхания) форма ОВ «фиксируется», а значит, сохраняется повышенное удлинение, которое появилось в ОВ в процессе перемотки. Кроме того, затвердевание краски происходит неравномерно (неконцентричность покрытия, нестабильность скорости нанесения и высыхания краски), что может усилить этот эффект и даже повысить затухание сигнала в ОВ [2].

В результате натяжение окрашенного ОВ на катушке возрастает в среднем на 0.002...0.005 %, но могут появиться локальные участки с большим натяжением.

В процессе объединения ОВ в оптический модуль возможен перехлест волокон, что также при высоких скоростях протяжки и слишком стремительном охлаждении оболочки модуля может привести к локальным «защемлениям» ОВ, которые могут сохраниться в готовом ОК.

Контроль натяжения ОВ с помощью BOTDR или измерителя фазового сдвига позволяет своевременно выявить подобные проблемы и скорректировать технологический процесс.

Для повышения стойкости ОВ внутри модуля к растягивающим нагрузкам производители закладывают небольшую избыточную длину ОВ. При растягивании оптического модуля в этом случае ОВ внутри него распрямляется, что приводит к тому, что удлинение модуля до 0.1 % практически не влияет на натяжение ОВ. Лишь при больших удлинениях нагрузка начинает прикладываться непосредственно к ОВ, и тогда натяжение ОВ начинает линейно возрастать с удлинением модуля.

На следующем этапе производства ОК осуществляется скрутка оптических модулей, что считается наиболее опасным процессом, который может привести к натяжению ОВ в модуле и даже к приросту затухания [2].

На рис. 2 представлена картина натяжения одного из ОВ ОК при нарушении технологии скручивания оптических модулей, полученная с помощью BOTDR «Ando AQ 8603».

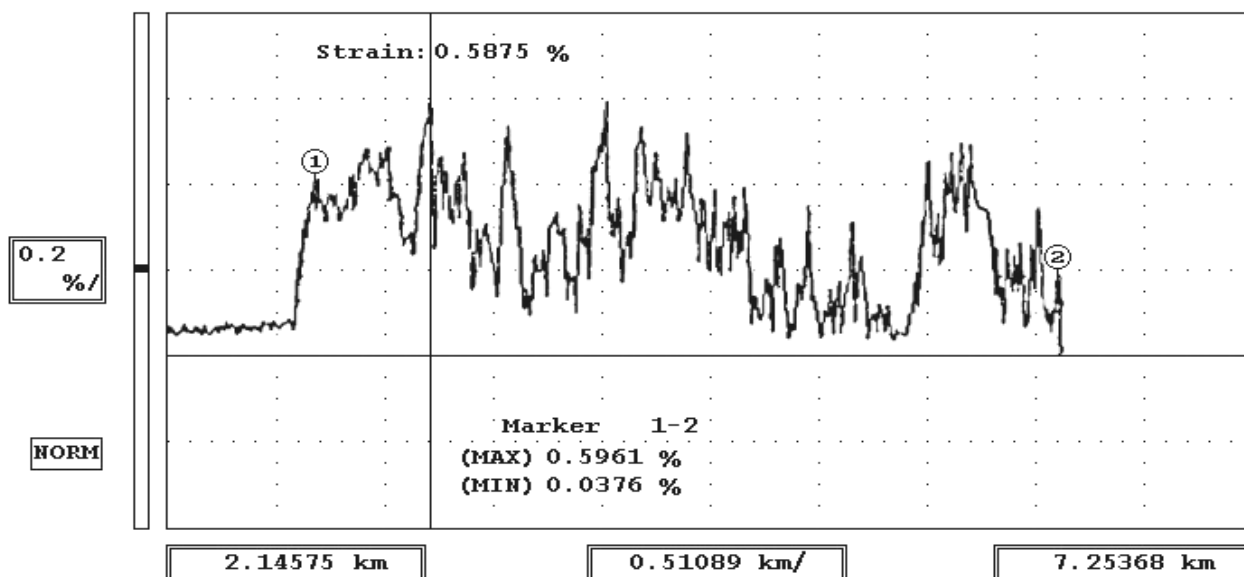


Рис. 2. Картина натяжения ОВ при нарушении технологии скручивания модулей

Подобная картина наблюдается при слишком высоком натяжении оптического модуля в процессе скрутки, например, при слишком высокой скорости протяжки. Всплески на BOTDR-рефлектограмме указывают на места ОВ с повышенным локальным удлинением. Такой ОК использовать нельзя, так как в реальных условиях произойдёт быстрая деградация ОВ.

Для устранения подобных проблем также необходимо закладывать избыточную длину ОВ в модулях (примерно 3...5 м/км), причем желательно, чтобы она была равномерна для всех ОВ (отклонение не более 1 м/км) [1, 2].

Практика показала, что использование стального центрального силового элемента (стальной трос в полиэтиленовой оболочке) также может привести к локальным натяжениям после скрутки модулей с ОВ. Неровности стального троса, продольные и поперечные воздействия на него могут придать ему спиралевидную форму, что в результате приведёт к дополнительным «защемлениям» и дополнительным удлинениям ОВ в ОК, которые сохраняются в готовом изделии. Гораздо меньше проблем с «защемлениями» в ОК с центральным силовым элементом из стеклопластикового прутка [1, 2].

Испытания, проведенные с ОК, используемыми в качестве датчиков натяжения, с BOTDR «ViaviMTS-8000» также показали, что ОВ в ОК с центральным силовым элементом из стеклопластикового прутка удлиняется очень плавно (датчик «1» на рис. 3) по сравнению с ОВ в ОК со стальным центральным силовым элементом (датчик «2» на рис. 3), так как ОВ хорошо скользит по поверхности стеклопластика. Хотя в ОК со стальным элементом натяжение ОВ при постепенном увеличении растягивающей силы повышается медленнее, в датчике появляется сильная неравномерность натяжения соседних участков вдоль ОВ.

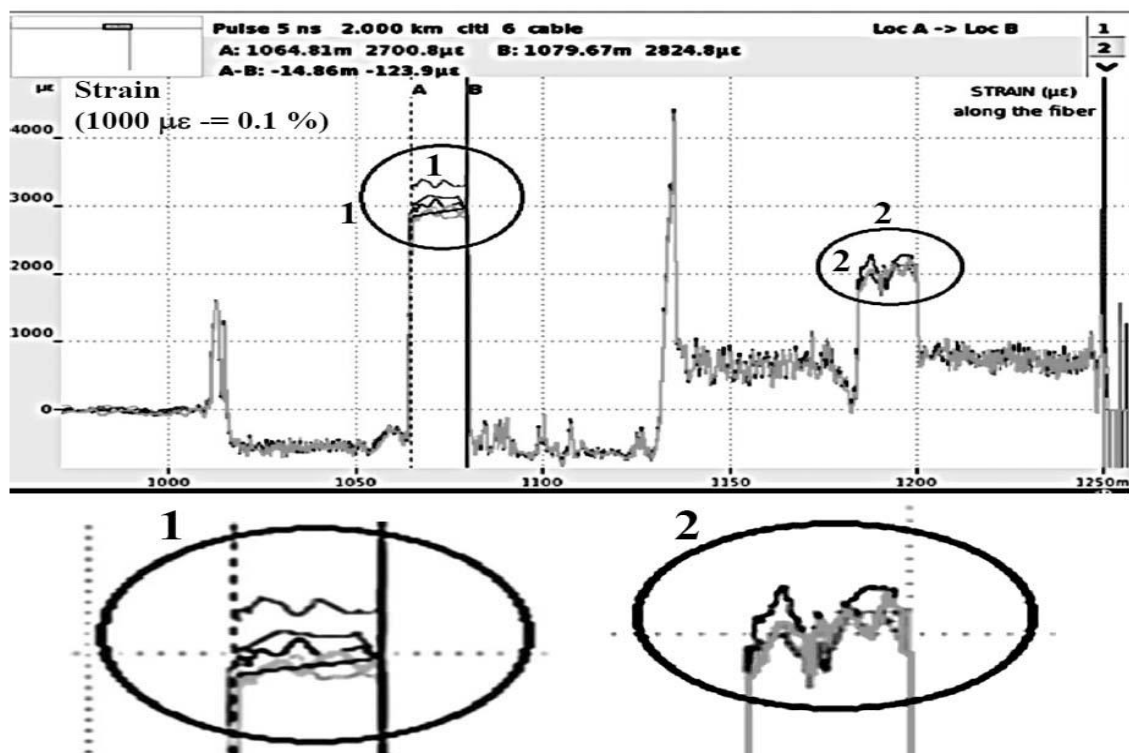


Рис. 3. Картина натяжения ОВ (BOTDR «ViaviMTS-8000») в области двух распределенных датчиков с разной конструкцией центрального силового элемента

Операции нанесения бронепокрова и арамидных нитей при нормальном течении технологического процесса (расположение проволок или нитей и их натяжение должно быть равномерным, не растягивающим заготовку ОК) не приводит к повышению натяжения ОВ [1].

Этап наложения защитной оболочки ОК из-за послеэкструзионной усадки полиэтилена также может вызвать дополнительные натяжения ОВ (порядка 0.04...0.06 %), поскольку в процессе намотки на приёмный барабан условия усадки (и, соответственно, длина оболочки

на участках) отличаются для витков, находящихся на разных уровнях и в разных частях барабана.

На рис. 4 приведена картина натяжения одного ОВ из ОК, намотанного на приёмный барабан после усадки полиэтиленовой защитной оболочки.

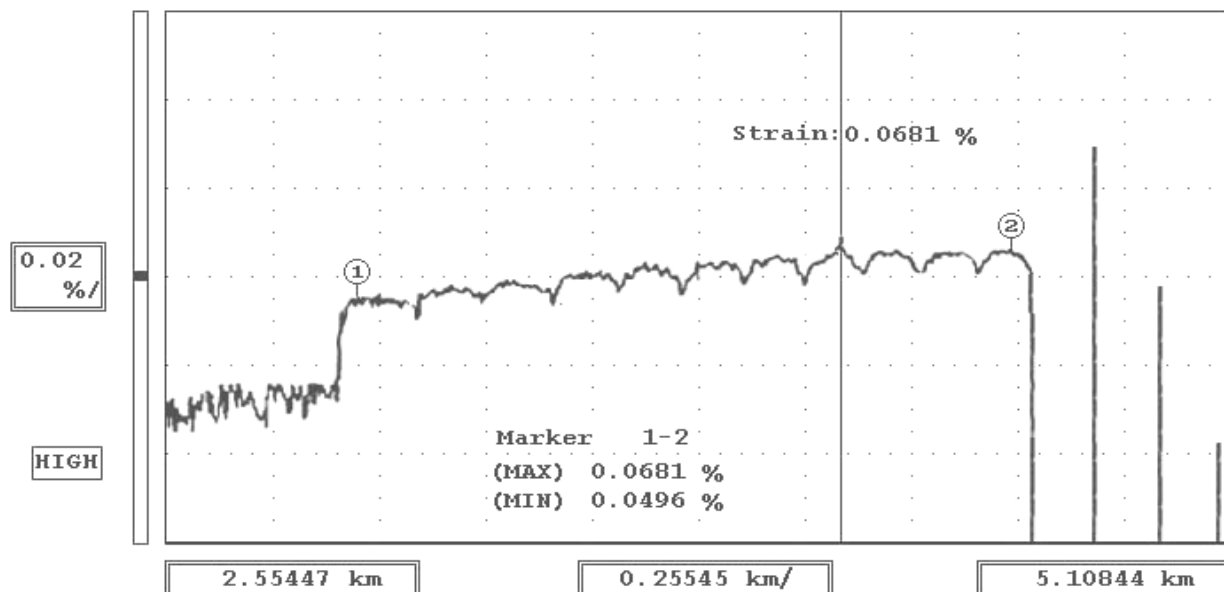


Рис. 4. Картина натяжения ОВ из готового ОК, намотанного на приёмный барабан

На BOTDR-рефлектограмме хорошо видны «полуволны» раскладки ОК (более натяжённые в центре ряда и менее натяжённые по краям ряда), а также различие длин витков внутренних (маркер «2») и внешних (маркер «1») слоёв.

После размотки ОК с барабана картина натяжения «спрямляется».

Для того, чтобы величина натяжения ОВ в ОК оставалась в умеренных пределах, необходимо ограничивать скорость протяжки и охлаждения ОК.

На рис. 5–7 приведены картины натяжения одного ОВ из готового ОК, намотанного на барабан при различных температурах (испытания в климатической камере на стойкость ОК к изменению температуры от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$), которые получены с помощью BOTDR «Ando AQ 8603».

На рис. 5 показана картина натяжения ОВ в ОК при комнатной температуре. Указаны минимальное и максимальное значение натяжения на участке «1» – «2».

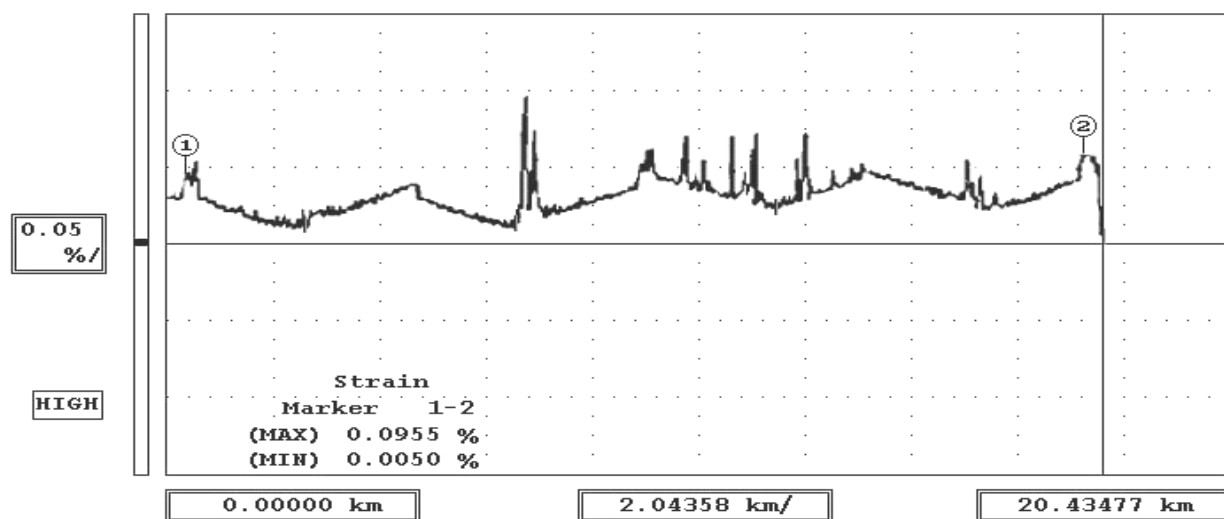


Рис. 5. Картина натяжения ОВ в ОК при комнатной температуре

На рис. 6 представлена картина натяжения ОВ при температуре ОК $+60^{\circ}\text{C}$. Из рисунка видно, что натяжение ОВ повысилось в среднем на 0.05 %. Хотя известно, что зависимость натяжения ОВ от температуры имеет линейный характер [9–13], для ОК на барабане существует множество участков, на которых удлинение ОВ из-за теплового расширения ОК оказалось ограничено «фиксирующими» факторами.

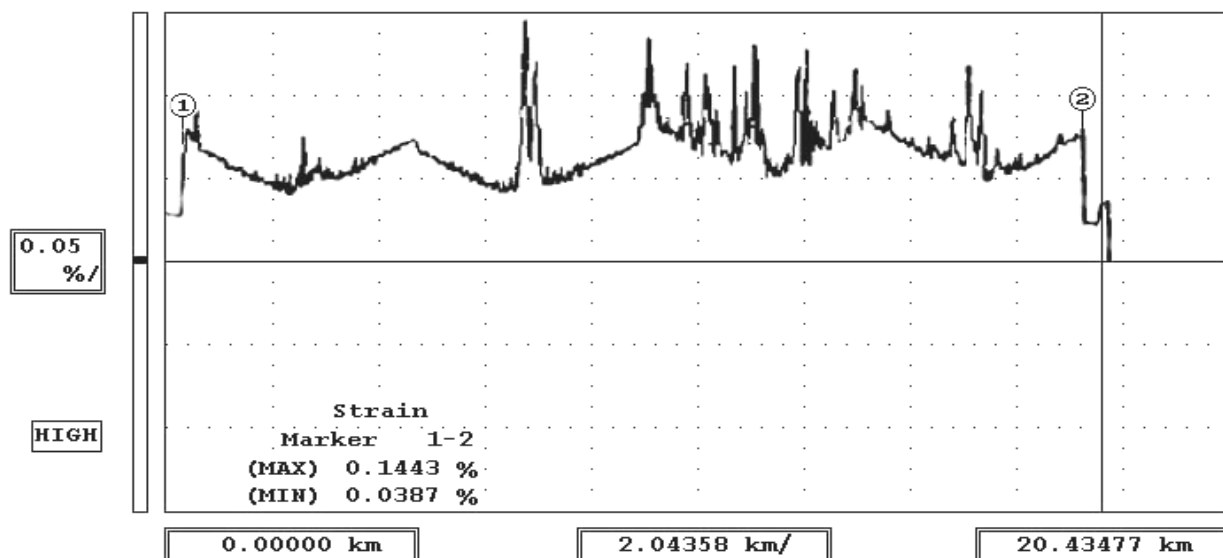


Рис. 6. Картина натяжения ОВ в ОК при высокой температуре

На рис. 7 представлен график натяжения ОВ при температуре ОК -40°C .

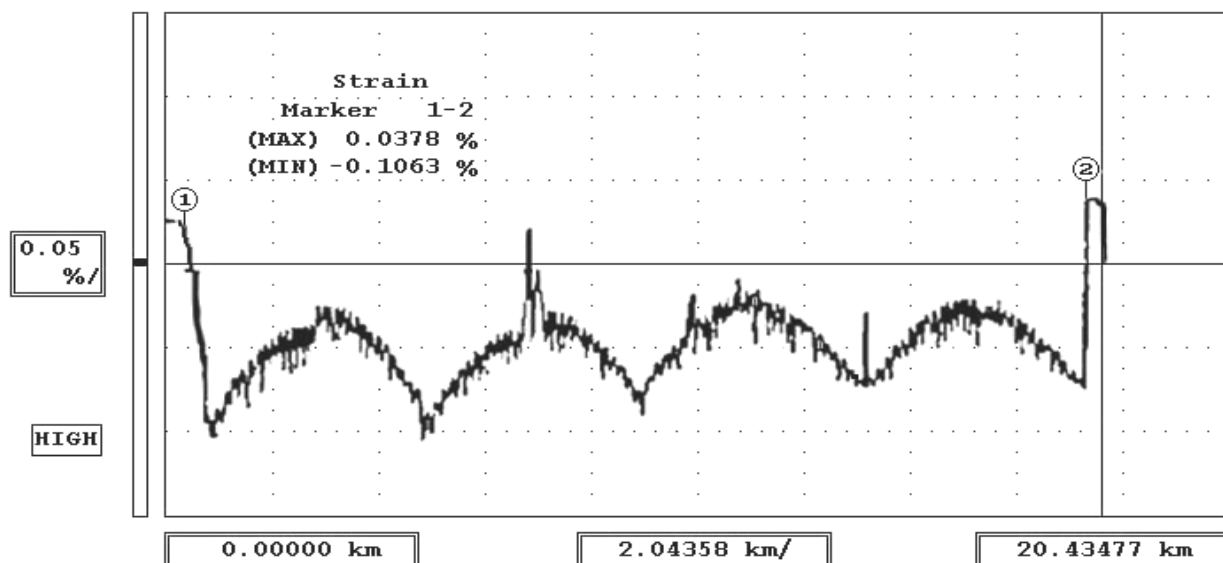


Рис. 7. Картина натяжения ОВ в ОК при низкой температуре

Из рисунка видно, что ОВ сжалось в среднем на 0.07 %. Из-за сжатия ОК «фиксирующие» факторы перераспределились, однако хорошо заметны существенные натяжения ОВ, которые присутствуют на всех трёх графиках на расстояниях 6.9 км (значительное) и 13.5 км (незначительное), которые показывают проблемные участки ОК на барабане.

Во всех рассмотренных температурных испытаниях прироста затухания ОВ не наблюдается [11–13].

Таким образом, BOTDR в процессе производства ОК позволяет обнаружить локальные натяжения ОВ и выявить ошибки в технологии изготовления.

Изучение СРМБ ОВ, находящихся в готовых ОК, которые подвергались существенным растягивающим нагрузкам при лабораторных испытаниях, позволило сделать следующие выводы. Из-за силовых элементов ОК, которые защищают его, а значит, и все ОВ внутри его модулей от механических воздействий, а также из-за избыточной длины ОВ в оптических модулях существенных изменений СРМБ при силовых растягивающих нагрузках определённого участка исследуемого ОК может не наблюдаться (если нет явных дефектов и «защемлений») вплоть до критических уровней нагрузки, которые приводят в месте воздействия к разрушению защитных элементов ОК, а затем и к стремительному разрыву ОВ и ОК в целом. Это наблюдалось при действующей на исследуемый ОК продольной растягивающей силе, которая превышала предельно допустимую нагрузку данного ОК [11].

При этом анализ экспериментальных данных, полученных фазовыми методами [3, 5, 11], показал, что эти методы позволяют обнаружить появление удлинения ОВ в целом (из-за продольного натяжения ОВ) при растягивающей силе, которая ещё не превысила предельно допустимую для исследуемого ОК. Так как при этом не происходит разрушения элементов ОК, после снятия нагрузки ОК вернется в нормальное состояние. Однако подобные воздействия приводят к перераспределению натяжений в ОВ, поэтому контроль с помощью BOTDR также желателен для обнаружения мест именно с локальным натяжением.

На рис. 8 представлены результаты измерений удлинений ОВ на основе метода фазового сдвига.

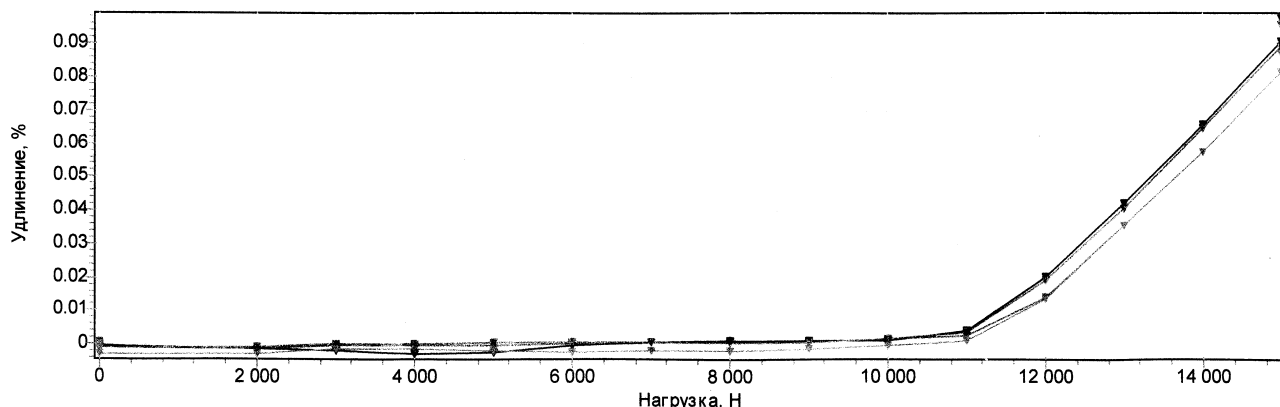


Рис. 8. Анализ удлинения ОВ в ОК при значительных растягивающих нагрузках

Из графиков видно, что изменения удлинения ОВ в ОК относительно опорного канала наблюдаются при растягивающей силе, действующей на ОК, более 11 кН. Учитывая, что место воздействия на ОК в данном случае заранее известно, фазовый метод оказался более предпочтительным.

При прокладке ОК натяжения ОВ будут перераспределяться (при соблюдении правил прокладки все натяжения ОВ вдоль линии будут усредняться к уровню 0 %), но явные дефекты, такие как места с повышенным натяжением, скорее всего, сохранятся, а значит, срок эксплуатации такого ОК может существенно сократиться.

Для ранней диагностики состояния ОВ (своевременного выявления механически напряженных участков, а также участков с изменённой температурой) в ОК, проложенных на реальных трассах, эксплуатирующихся в реальных условиях, самыми эффективными являются измерения с помощью BOTDR, которым (в отличие от BOTDA) достаточно иметь доступ лишь к одному концу ОВ [5, 6, 11–15].

5. Заключение

Современные модульные конструкции ОК имеют определённый запас защиты ОВ от опасного натяжения.

Метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет осуществлять раннюю диагностику ОВ и устранять локальные «проблемные» участки в ОВ на ранней стадии.

Для обнаружения мест ОВ с повышенным механическим напряжением и с изменённой температурой рекомендуется включать BOTDR в состав системы контроля характеристик ОВ. Это позволит выявлять потенциально опасные участки в ОК на разных стадиях изготовления ОК и совершенствовать технологии, применяемые в производственном процессе.

В процессе производства ОВ и ОК несложно получить доступ к обоим концам ОВ, что позволяет применять фазовые методы или BOTDA. При строительстве и эксплуатации ОК доступ возможен лишь к одному концу ОВ, и это допускает применение только рефлектометрических методов (BOTDR).

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

Авторы благодарят ЗАО «Москабель-Фуджикура» (г. Москва) за содействие в проведении экспериментальных исследований.

Литература

1. Богачков И. В., Горлов Н. И. Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на спектр бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2015. № 3 (31). С. 81–88.
2. Акопов С. Г., Васильев Н. А., Поляков М. А. Использование бриллюэновского рефлектометра при испытаниях оптического кабеля на растяжение // Lightwave. 2006. № 1. С. 23–25.
3. Авдеев Б. В., Барышников Е. Н., Длютров О. В., Стародубцев И. И. Изменение избыточной длины в процессе изготовления ВОК // Кабели и провода. 2002. №3 (274). С. 32–34.
4. Корн В. М., Длютров О. В., Авдеев Б. В., Барышников Е. Н. О применении метода Мандельштам–Бриллюэновского рассеяния для измерений характеристик оптических кабелей // Кабели и провода. 2004. № 5 (288). С. 19–21.
5. Богачков И. В., Горлов Н. И. Поиск предаварийных участков в оптических волокнах с помощью рефлектометров // Вестник СибГУТИ. 2018. № 8 (43). С. 34–44.
6. Богачков И. В., Горлов Н. И. Совместные испытания оптических импульсных рефлектометров различных видов для ранней диагностики и обнаружения «проблемных» участков в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2017. № 1 (37). С. 75–82.
7. Марьенков А. А., Гринштейн М. Л., Каменская Е. А., Деков В. Н. Измерение удлинения оптического волокна при испытании оптического кабеля на стойкость к растягивающей нагрузке // Lightwave (Russian Edition). 2003. № 2. С. 38–41.
8. Kurashima T., Horiguchi T., Izumita H., Furukawa S. I., Koyamada Y. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry // IEICE Transactions on Communications. 1993. V. E76–B(4). P. 382–390.
9. Horiguchi T., Kurashima T., Koyamada Y. Measurement of temperature and strain distribution by Brillouin frequency shift in silica optical fibers // Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors. 1992. V. 1797. P. 2–13.

10. *Parker T., Farhadiroushan M., Handerek V., Rogers A.* Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers // *Optics letters*. 1997. V. 26, № 11. P. 787–789.
11. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Обнаружение механически напряженных участков в волоконно-оптических линиях связи на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния // *Телекоммуникации*. 2015. № 11. С. 32–38.
12. *Богачков И. В., Майстренко В. А.* Экспериментальные исследования поперечных деформаций оптических волокон // *Электросвязь*. 2016. № 5. С. 55–59.
13. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Обнаружение участков измененной температурой волоконно-оптических линий связи методом бриллюэновской рефлектометрии // *Вестник СибГУТИ*. 2015. № 4 (32). С. 74–81.
14. *Bogachkov I. V.* A Detection of strained sections in optical fibers on basis of the Brillouin reflectometry method // *T-Comm*. 2016. V. 10, № 12. P. 85–91.
15. *Bogachkov I. V., Maistrenko V. A.* Search of mechanical stressed sections in fiber optical communication lines based on Brillouin backscattering spectrum analysis // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015. V. 8, Is. 7. P. 878–889.

Статья поступила в редакцию 12.12.2018.

Богачков Игорь Викторович

к.т.н., доцент; доцент кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета, IEEE Senior Member, e-mail: bogachkov@mail.ru.

Горлов Николай Ильич

д.т.н., профессор; заведующий кафедрой «Линии связи» Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), действительный член Метрологической академии, e-mail: gorlovnik@yandex.ru.

Mechanical strain places detection of the optical fibers in optical cables using Brillouin time-domain reflectometers

I. V. Bogachkov, N. I. Gorlov

Research results of the optical fiber strain and optical cables being under the influence of mechanical forces in various manufacturing processes, using Brillouin optical time-domain pulse reflectometers are presented in this work.

The research results confirmed the advantage of the Brillouin reflectometry method for early diagnostics and detection of local mechanically stressed places of optical fibers. To determine the total elongation of optical fibers, the phase shift measurement method is effectively used.

Keywords: optical fiber, strain, optical cable, early diagnostics, Brillouin reflectometer.