

Обнаружение участков с измененной температурой волоконно-оптических линий связи методом бриллюэновской рефлектометрии

И. В. Богачков, Н. И. Горлов

В работе приведены результаты экспериментальных исследований участков волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с измененной температурой на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния.

Ключевые слова: бриллюэновское рассеяние, рефлектометрия, ранняя диагностика, опто-волокно, натяжение оптоволокна.

1. Введение

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в настоящее время являются доминирующим видом высокоскоростных линий связи. Интенсивное развитие ВОЛС, высокая конкуренция операторов связи и высокие требования к надежности работы инфокоммуникационных систем выдвигают на ведущие позиции задачу централизованного контроля состояния разветвленных волоконно-оптических сетей с целью своевременного обнаружения и скорейшего устранения повреждений, возникающих в ВОЛС. Простои линий связи сокращают доходы операторов, ухудшают их репутацию, уменьшают приток инвестиций, снижают качество обслуживания. Поэтому в настоящее время операторы связи начинают уделять особое внимание мониторингу и ранней диагностике состояния линий связи [1–4].

Важной задачей мониторинга и ранней диагностики ВОЛС является получение своевременной и достоверной информации о физическом состоянии оптических волокон (ОВ), находящихся в проложенных оптических кабелях (ОК).

Существенное изменение температуры некоторого участка ОВ может сигнализировать о появлении «проблемного» участка на трассе прокладки ВОЛС.

Например, существенное повышение температуры участка ВОЛС может наблюдаться при прорыве теплотрассы в месте прокладки ОК.

Наоборот, в зимнее время при «оголении» ОК из-за появления трещин в почве или иных разрушений защитных элементов на трассе прокладки ОК будет наблюдаться понижение температуры «проблемного» участка ВОЛС.

Своевременное обнаружение такого участка позволяет принять необходимые меры по устранению аварии до разрушения ВОЛС.

Обычные оптические импульсные рефлектометры не в состоянии определить натяжение ОВ. Для обнаружения механически напряженных участков ВОЛС (натяжения ОВ) применяется метод бриллюэновской рефлектометрии.

Метод бриллюэновской рефлектометрии является одним из эффективных методов определения степени натяжения ОВ [1–6]. В его основе лежит регистрация и последующий анализ спектра вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в ОВ. Спектральные компоненты бриллюэновского рассеяния (БР) света в ОВ обладают тем важным для практиче-

ских применений свойством, что их частота смещена на величину, пропорциональную степени натяжения волокна [1–4]. Зондируя ОВ короткими импульсами, сканируя несущую частоту этих импульсов и анализируя картину распределения спектра бриллюэновского рассеяния (СБР) в ОВ, можно обнаружить местоположение распределенных нерегулярностей в ОВ и определить их характеристики.

2. Сведения из теории

Распространение световых импульсов повышенной мощности в ОВ сопряжено с проявлением нелинейных эффектов. Для дальнейшего анализа представляет интерес один из нелинейных эффектов – БР, особенностью которого является его зависимость от таких параметров ОВ, как механическое натяжение и температура [5–8].

Бриллюэновский сдвиг частоты f_B связан с натяжением ОВ следующими формулами:

$$f_B = \frac{2 n v_a}{\lambda}, \quad v_a = \sqrt{\frac{E_\epsilon}{\rho}},$$

где n – коэффициент преломления сердцевины ОВ, λ – длина волны распространяющегося светового сигнала, v_a – скорость гиперзвуковой волны, возникающей при рассеянии света на акустических фоновых; E_ϵ – модуль Юнга; ρ – плотность кварцевого стекла [1–4].

Связь f_B с температурой (t°) ОВ характеризуется линейной зависимостью [1, 7–9]:

$$f_B(t^\circ) = C_t^\epsilon \cdot (t^\circ - t_0),$$

где C_t^ϵ – коэффициент линеаризации, зависящий от λ и E_ϵ , а t_0 – температура, на которой $f_B = 0$ (например, типичная комнатная температура).

На рис. 1 показана типичная зависимость одномодового ОВ от температуры для $\lambda = 1.55$ мкм [9].

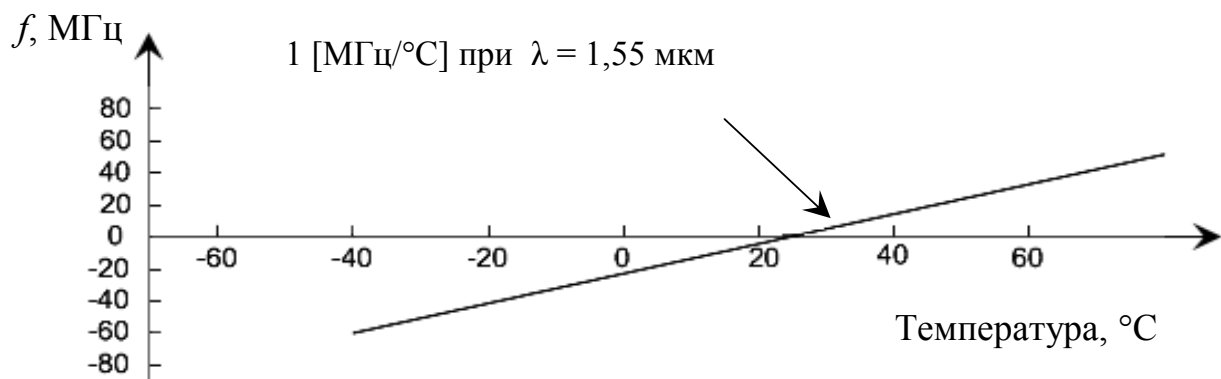


Рис. 1. Зависимости величины бриллюэновского сдвига частоты от температуры ОВ

3. Постановка задачи

С целью уточнения моделей, рассмотренных в [1–4], и проверки результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования с бриллюэновским оптическим импульсным рефлектометром (БОИР) «Ando AQ 8603» участков ОВ с измененной температурой при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

Как видно из рис. 3, картина изменилась: максимум СБР сместился по оси частот в сторону увеличения частоты (F2). Небольшое дополнительное смещение СБР в нагретом участке OB2, отмеченное стрелкой «2», объясняется частичным проникновением СБР из OB3 (DSF) через стык («2–3»).

На рис. 4 представлена аналогичная картина СБР в световоде при охлаждении тех же участков до -6°C .

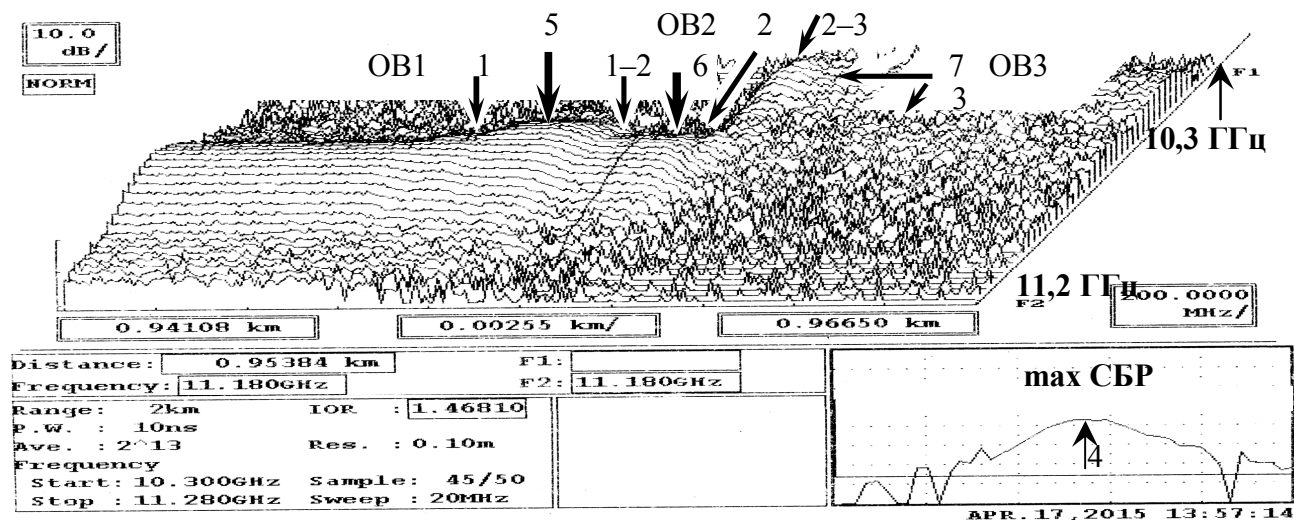


Рис. 4. Картина СБР в световоде при охлаждении участков до -6°C

Как видно из рис. 4, картина также изменилась относительно картины, представленной на рис. 2: максимум СБР OB1 и OB2 сместился по оси частот, но в сторону уменьшения частоты (F1).

Заметного смещения СБР в OB3 со смещенной дисперсией в этом эксперименте не наблюдалось, что объясняется падением мощности сигнала в OB1 и OB2 до места стыка с OB3, что привело к тому, что мощность сигнала, введенная в OB3, оказалась на уровне порога проявления БР.

На рис. 5–7 для рассмотренных случаев представлены соответствующие зависимости (мультирефлектограммы) по длине световода: графики натяжения (Strain), СБР, ширины СБР (B.S.W) и потерь (Loss).

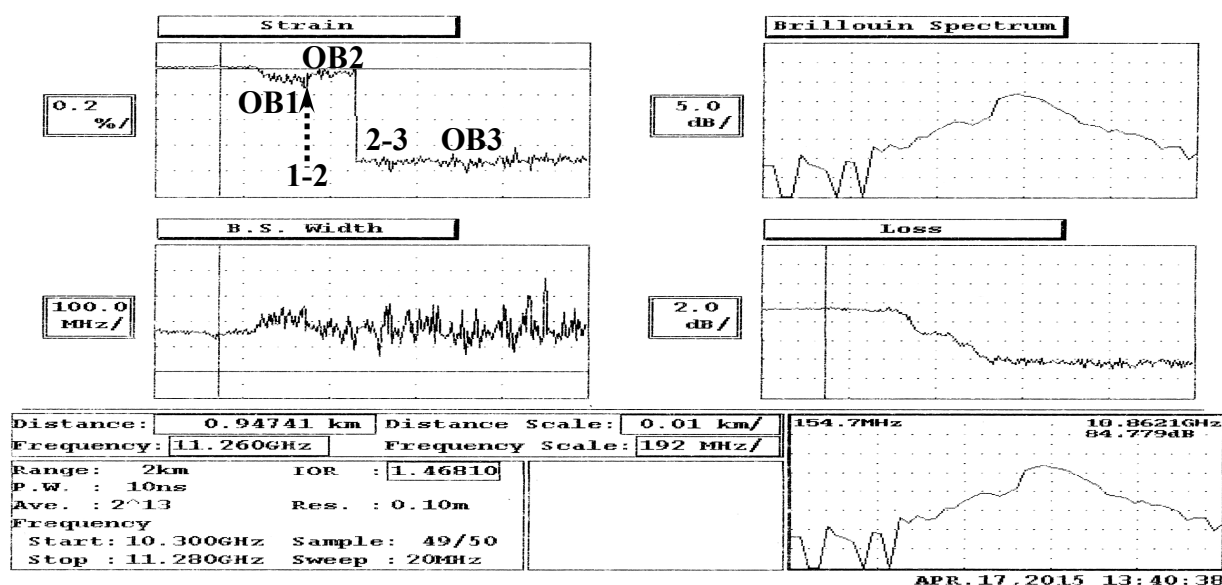


Рис. 5. Мультирефлектограмма световода при комнатной температуре (25°C)

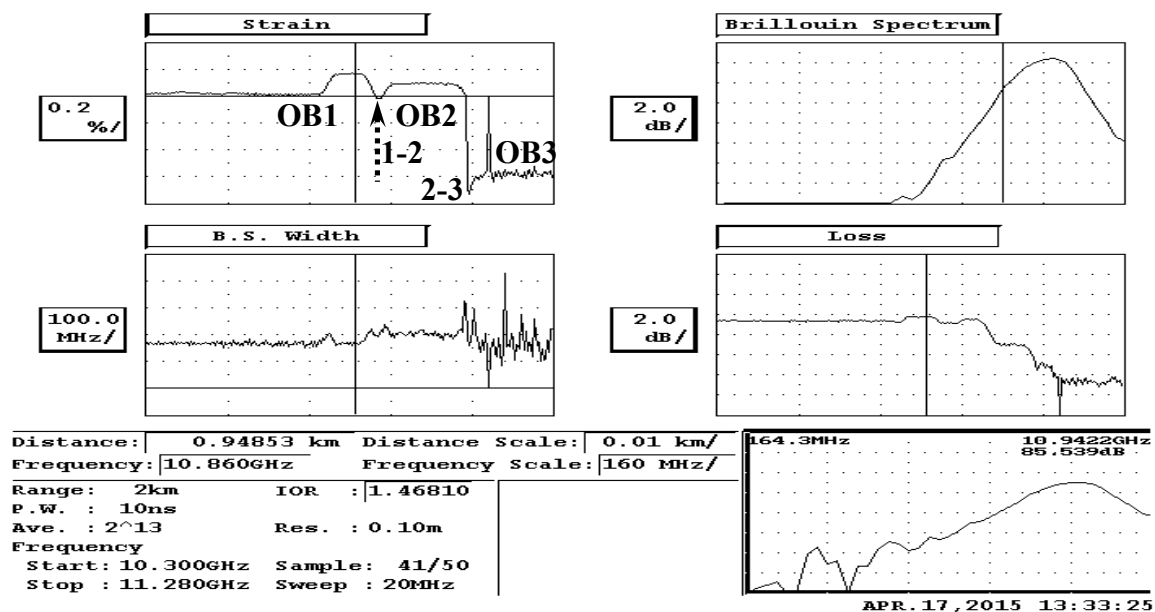


Рис. 6. Мультирефлектограмма световода при нагреве участков до 100 °С

Из рис. 5–7 хорошо видны изменения натяжения (Strain) участков с изменённой температурой. На графиках потерь (Loss) хорошо видны изменения в местах сварки ОБ, а также существенное ослабление зондирующего сигнала перед вводом в ОБ3, что и приводит к искажениям СБР в нём.

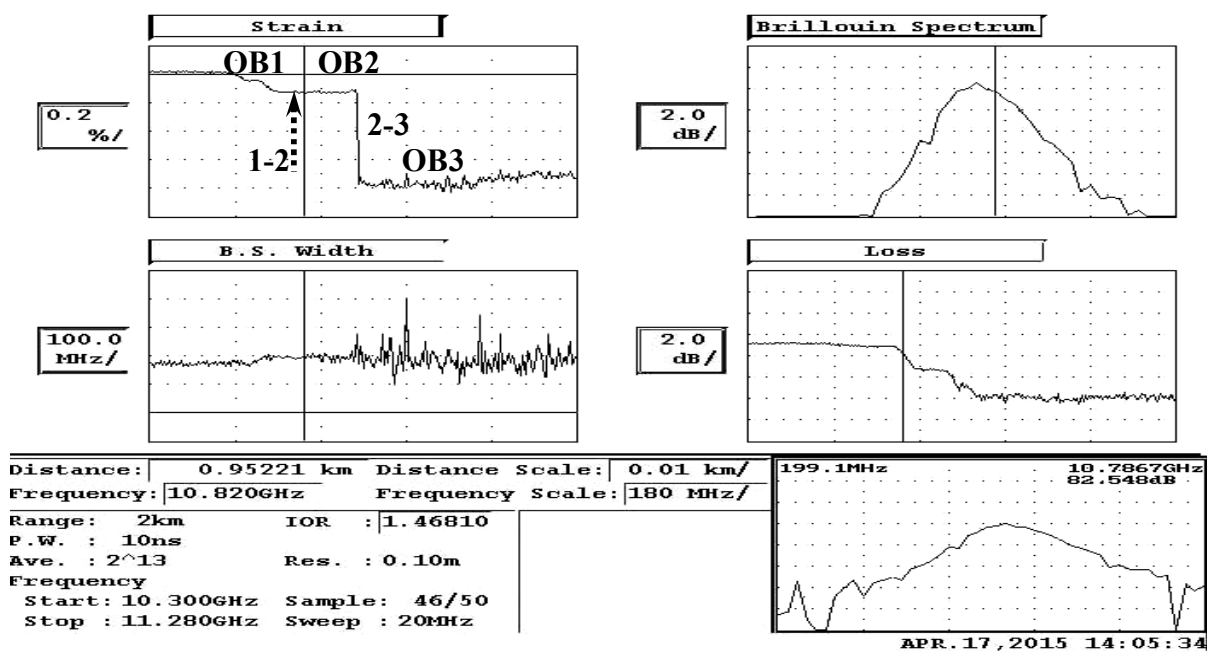


Рис. 7. Мультирефлектограмма световода при охлаждении участков до – 6 °С

На рис. 8–13 представлены развернутые графики натяжения, соответствующие рассмотренным случаям.

На рис. 8, 9 представлены графики натяжения при комнатной температуре (участок с изменённой температурой ОБ1 отмечен маркерами 1, 2, участок с изменённой температурой ОБ2 – маркерами 3, 4, аналогичный участок ОБ3 (DSF) – маркерами 5, 6).

На рис. 10, 11 представлены графики натяжения при нагреве участков до 100 °С, а на рис. 12, 13 – графики натяжения при охлаждении тех же участков до – 6 °С.

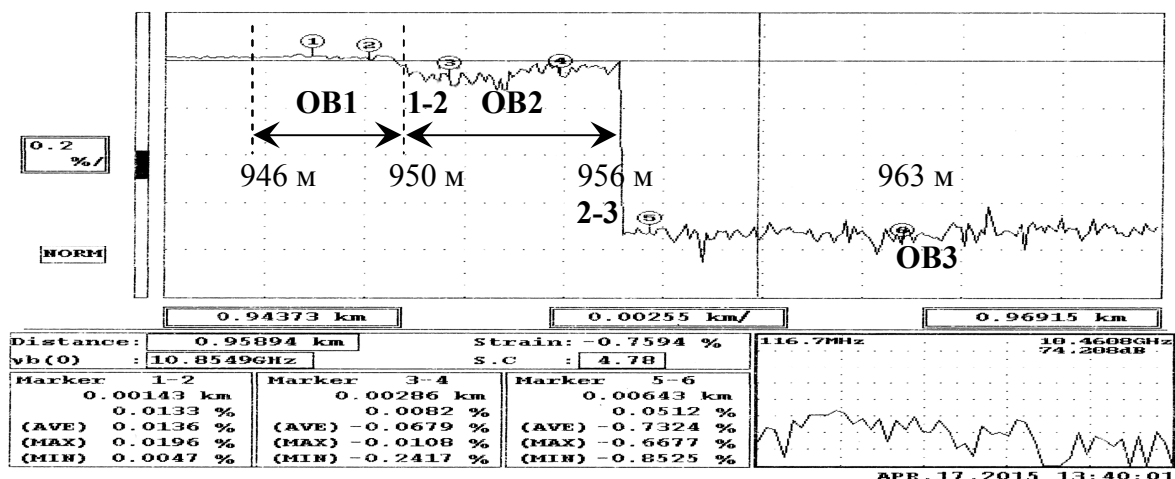


Рис. 8. График натяжения при комнатной температуре (25 °C)

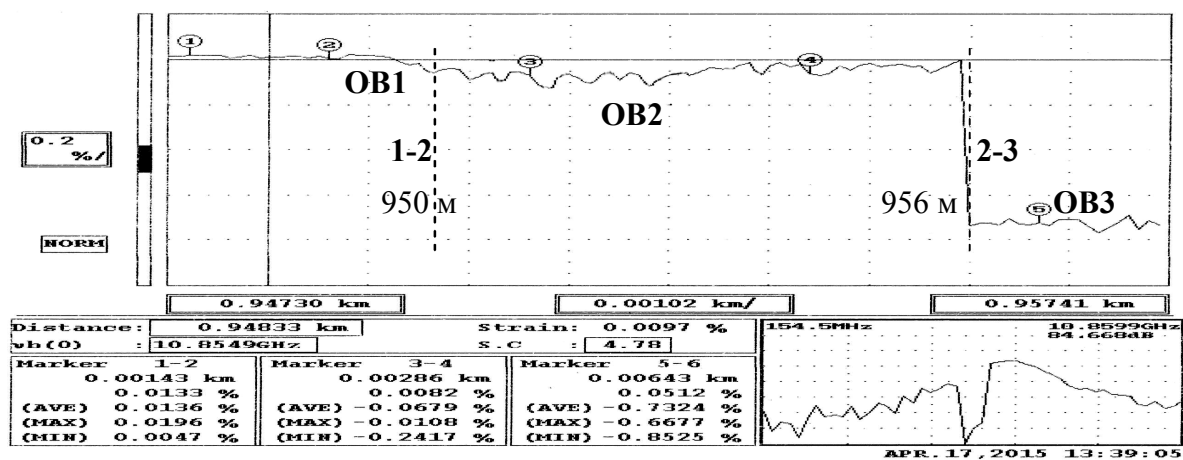


Рис. 9. Развёрнутый график натяжения при комнатной температуре (25 °C)

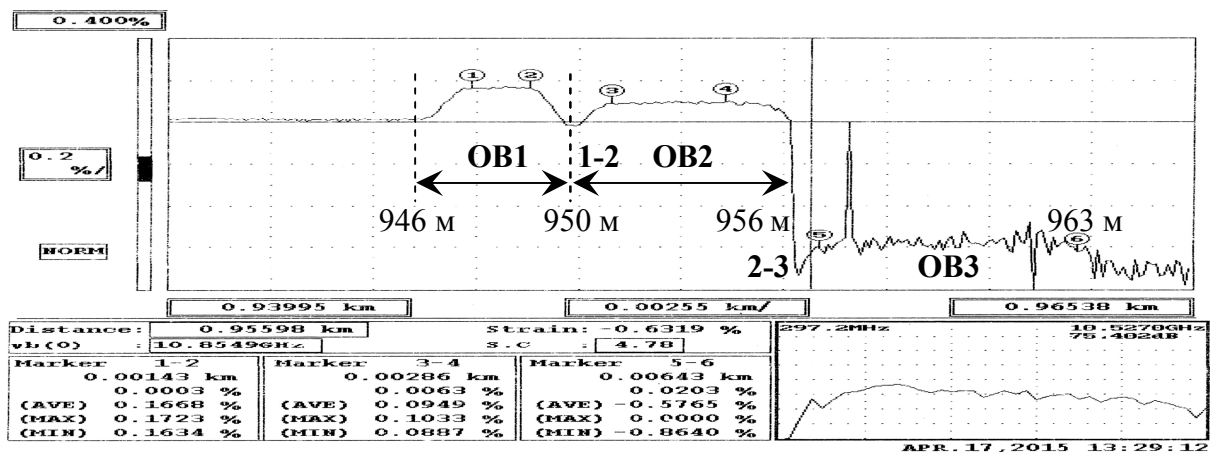


Рис. 10. График натяжения при нагреве участков до 100 °C

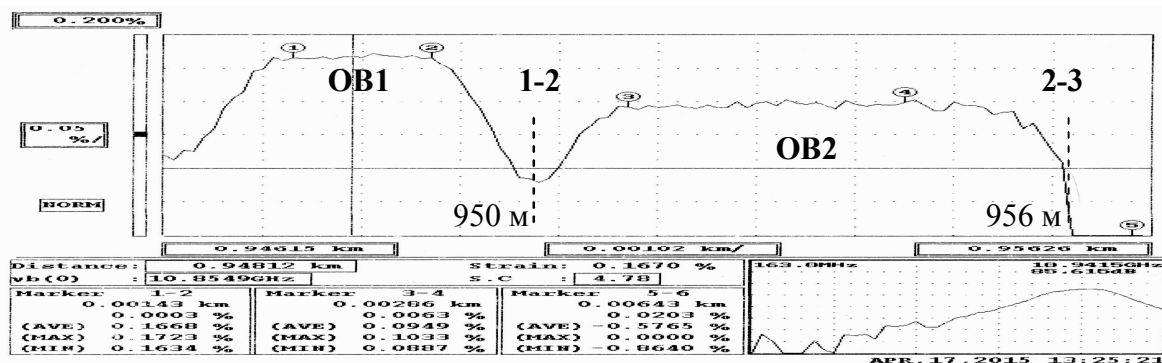
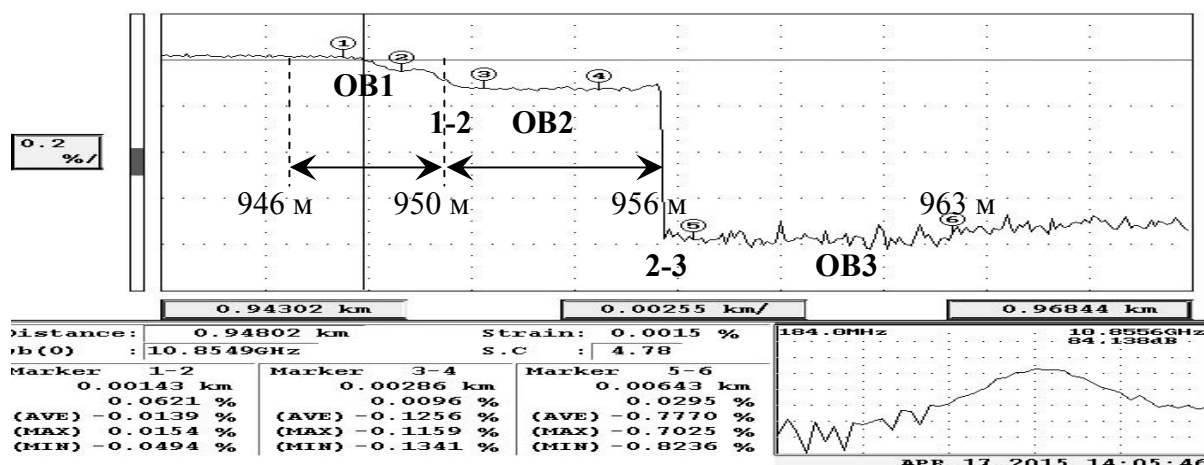
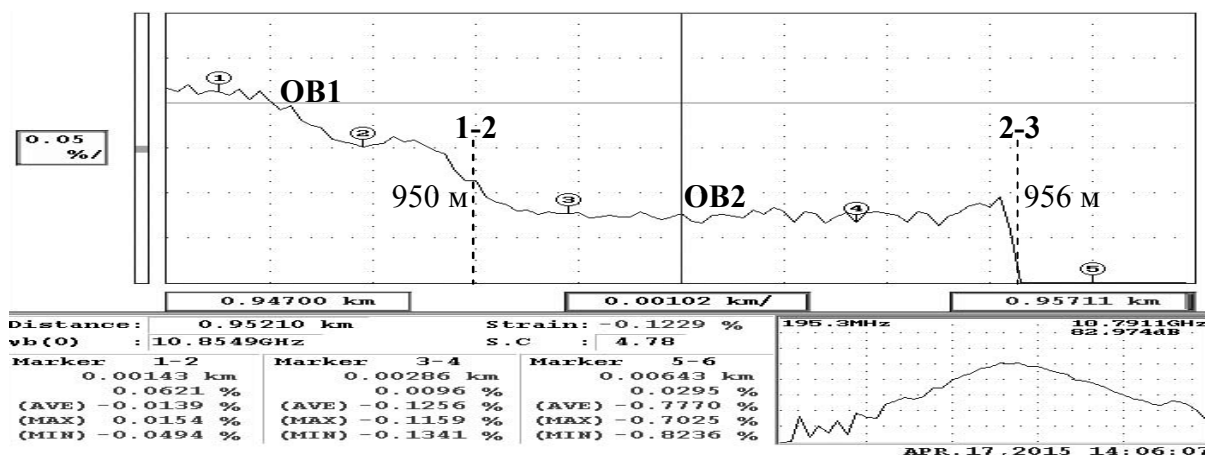


Рис. 11. Развёрнутый график натяжения при нагреве участков до 100 °C

Рис. 12. График натяжения при охлаждении участков до -6°C Рис. 13. Развёрнутый график натяжения при охлаждении участков до -6°C

Анализ графиков натяжения на рис. 8–13 показывает, что в OB1 натяжение изменилось с 0.02% (25°C) до 0.17% (при нагреве до 100°C) и до -0.03% (при охлаждении до -6°C).

В OB2 натяжение изменилось с -0.07% (25°C) до 0.09% (при нагреве до 100°C) и до -0.12% (при охлаждении до -6°C).

В OB3 также было замечено изменение натяжения с -0.73% (25°C) до -0.58% (при нагреве до 100°C) и до -0.78% (при охлаждении до -6°C).

Таким образом, при нагреве до 100°C натяжение во всех OB увеличилось примерно на 0.15% , а при охлаждении до -6°C — уменьшилось примерно на 0.05% .

5. Заключение

Полученные результаты подтвердили, что БОИР успешно обнаружил проблемный участок как с повышенной температурой (это могло бы наблюдаться, например, при прорыве теплотрассы в месте прокладки ОК), так и с пониженной (это могло бы наблюдаться в зимнее время, например, при «оголении» ОК из-за появления трещин в почве или иных разрушений защитных элементов на трассе прокладки ОК).

Таким образом, метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет осуществлять раннюю диагностику ВОЛС и устранять проблемы в OB на ранней стадии, пока изменения в OB не стали необратимыми и не привели к разрушению OB.

Литература

1. Богачков И. В., Горлов Н. И. Методы и средства мониторинга и ранней диагностики волоконно-оптических линий передачи: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 192 с.
2. Bogachkov I. V., Maistrenko V. A. The Modeling of the Brillouin Backscattering for Searching of Mechanical Strained Places in Optical Fibers // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2015. – Omsk, 2015. – P. 1–3.
3. Bogachkov I. V., Ovchinnikov S. V., Maistrenko V. A. Applying of Brillouin Scattering Spectrum Analysis for Detection of Distributed Irregularities in Optic Fibers and Estimation of Irregularities Parameters // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2013. Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. – P. 1–5.
4. Богачков И. В., Овчинников С. В., Горлов Н. И. Повышение точности оценки распределенных нерегулярностей в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2012. – Вып. 4 (20). – С. 3–13.
5. Bogachkov I. V., Maistrenko V. A. Experimental examinations of changes influence of the Brillouin backscattering spectrum in optical fibers on their characteristics // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014 – Proceedings. – P. 1–10.
6. Богачков И. В., Горлов Н. И. Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на спектр бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2015. – Вып. 3 (31). – С. 81–88.
7. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Experimental Researches of the Temperature Influence on Brillouin Backscattering Spectrum and Strain Characteristics of Optical Fibers // IEEE 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. – V. 1, P. 190–194.
8. Богачков И. В., Горлов Н. И. Экспериментальные исследования влияния температуры на спектр бриллюэновского рассеяния и механические характеристики оптических волокон // Тр. XII-ой междунар. конф. IEEE АПЭП, Т. 3. Новосибирск, 2014. – С. 74–79.
9. Богачков И. В., Горлов Н. И. Проектирование, строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий передачи: учеб. пособие: в 5 ч. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013 – 2015.

Статья поступила в редакцию 27.11.2015

Богачков Игорь Викторович

к.т.н., доцент; доцент кафедры средств связи и информационной безопасности Омского государственного технического университета, член IEEE, e-mail: bogachkov@mail.ru.

Горлов Николай Ильич

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой линий связи Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики (СибГУТИ), действительный член Метрологической академии, e-mail: gorlovnik@yandex.ru.

Detection of fiber-optical communication lines sections with changed temperature on the basis of Brillouin reflectometry method.

I. V. Bogachkov, N. I. Gorlov

The results of experimental examination of fiber-optical communication lines sections with changed temperature on the basis of Brillouin reflectometry method are presented in this paper.

Keywords: Brillouin backscattering, reflectometry, early diagnostics, optical fiber, strain of optical fiber.