УДК 681.7.068

**В.Г. Беспрозванных¹, Ф.Л. Барков¹, Ю.А. Константинов³,
А.И. Кривошеев^{1,2}, А.С. Бобровский^{1,2}, Р.Д. Елисеенко^{1,2}**

¹ Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

² Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
Пермь, Россия

³ Лаборатория фотоники Пермского научного центра
Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

НЕЛИНЕЙНАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

Выполнен анализ влияния растягивающих нагрузок до 54 кН на оптический коммуникационный кабель на основе метода бриллюэновской рефлектометрии. Проведена экспериментальная проверка гипотезы нелинейности. Разработана методика раннего детектирования механических напряжений, возникающих в оптическом волокне.

Ключевые слова: волоконно-оптический кабель, бриллюэновская рефлектометрия, частотный бриллюэновский сдвиг, детектирование механических напряжений.

**V.G. Besprozvannykh¹, F.L. Barkov¹, Yu.A. Konstantinov³,
A.I. Krivosheev^{1,2}, A.S. Bobrovskii^{1,2}, R.D. Eliseenko^{1,2}**

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Perm Scientific Industrial Instrument-Making Company,
Perm, Russian Federation

³ Photonics Laboratory of Perm Scientific Centre of Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

NONLINEAR REFLECTOMETRY OF FIBER-OPTIC CABLE DEFORMED STATE

In this paper we propose Brillouin reflectometry based analysis of tensile stress influence on fiber-optic cable. The measurements have been performed in the range up to 54 kilonewtons. A nonlinearity hypothesis has been checked experimentally. A technique for early detection of the strain in a fiber-optic cable has been developed.

Keywords: fiber-optic cable, Brillouin optical time-domain reflectometry, Brillouin frequency shift, strain detection.

Введение

В настоящее время в условиях широкого распространения волоконно-оптических линий связи важной задачей является контроль и диагностика их технического состояния. Мониторинг механических нагрузок, оказываемых на оптический кабель и волоконные датчики, и возникающих при этом деформаций является необходимым аспектом процесса эксплуатации волоконно-оптических линий связи и волоконно-оптических приборов и датчиков [1, 2].

Одним из способов контроля деформаций оптического волокна является метод бриллюэновской рефлектометрии. Бриллюэновское рассеяние представляет собой неупругое рассеяние света на акустических фоновых, в результате чего генерируется стоксова волна, распространяющаяся во встречном направлении. При этом частота последней уменьшается на величину бриллюэновского сдвига f , зависящего от длины волны подаваемого сигнала λ и составляющего около 11 ГГц в области $\lambda = 1550$ нм для световодов на основе кварцевого стекла. Величина сдвига при малых относительных деформациях ε и постоянной температуре может быть найдена по формуле [3]

$$f = \frac{2Vn}{\lambda} + K\varepsilon = f_0 + K\varepsilon, \quad (1)$$

где n – эффективный показатель преломления среды; V – скорость звука; λ – длина волны света в вакууме; f_0 – смещение частоты в отсутствие натяжения волокна; $K = \text{const}$. В соответствии с (1) бриллюэновский сдвиг частоты пропорционален натяжению оптического волокна, что позволяет оценить механические нагрузки в волокне.

При значительном увеличении натяжений и относительных деформаций зависимость $f = f(\varepsilon)$ может значительно отклоняться от линейной, что является одним из проявлений нелинейных эффектов в волоконной оптике [4, 5]. В этом случае, следуя аддитивному подходу в нелинейной оптике, вместо (1) получаем следующую зависимость:

$$f = f_0 + \Delta f(\varepsilon). \quad (2)$$

Нелинейная добавка $\Delta f(\varepsilon)$ определяется конкретными свойствами волокна и используемого зондирующего излучения, а само уравнение (2) изучается главным образом экспериментально.

В статье [6] приведены результаты математического моделирования для участков оптического волокна, подверженных механическим напряжениям, в целях диагностики и мониторинга волоконно-оптических линий связи.

В работах [7, 8] разработаны некоторые оптико-механические модели и нелинейно-оптические технологии неразрушающего контроля, связанные с рефлектометрией оптических волокон и базирующиеся на нелинейном уравнении (2). Приводятся данные о том, что расхождение теории с экспериментом не превышает 5 %.

Данное направление нуждается в дополнительном экспериментальном исследовании и методическом сопровождении.

Основная цель настоящей работы – изучение рефлектометрии напряженно-деформированного состояния оптического волокна, используемого в оптических кабелях, при воздействии на него растягивающих нагрузок с учетом гипотезы нелинейности. В реальных условиях эксплуатации волоконно-оптических линий связи важна не только задача определения механических напряжений в оптическом волокне, но и своевременная диагностика, поскольку проводимые измерения не всегда могут распознать или уловить участки, на которых имеют место растягивающие нагрузки на оптическое волокно. В работе предложена методика раннего детектирования напряжений, возникающих в оптическом волокне.

1. Схема эксперимента

Экспериментальные исследования растягивающих нагрузок проводились на испытательном стенде марки ПО 608 (рис. 1). Данный стенд предназначен для испытания оптического кабеля под растягивающей нагрузкой до 55 кН.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – бриллиэновский анализатор BOTDA; 2 – испытательный стенд; 3 – волоконно-оптический кабель

Оптический кабель был закреплен на шкивах путем наматывания на них нескольких витков. Для исследования был выбран оптический коммуникационный кабель марки ОКГТ-Ц, изготавливаемый компанией ИНКАБ и содержащий шесть оптических волокон. Кабель содержит центральный стальной оптический модуль со свободно уложенными волокнами. Свободное пространство в оптическом модуле заполнено гидрофобным гелем. На центральный оптический модуль спирально накладываются два повива из армирующих проволок (рис. 2). Данный кабель предназначен для организации волоконно-оптических линий связи на воздушных линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше.

Четыре оптических модуля были последовательно соединены в шлейф для последующего измерения натяжения. Эксперимент проводился на нагрузках от 0 до 54 кН с шагом в 2 кН с записью бриллюэновской рефлектограммы для каждого этапа эксперимента.

Рис. 2. Конструкция исследуемого оптического кабеля

Бриллюэновские рефлектограммы записывались при помощи бриллюэновского анализатора BOTDA Omnisens DiTeSt STA-R202, принцип работы которого основан на использовании явления вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна [4]. Параметры бриллюэновского анализатора: рабочая длина волны $\lambda = 1550$ нм, максимальное количество усреднений $N = 10^4$, минимальное пространственное разрешение $\Delta L = 1$ м.

В данном исследовании температура поддерживалась постоянной и составляла 300 К.

2. Результаты и обсуждение

В ходе проведенного эксперимента были получены бриллюэновские рефлектограммы для различных нагрузок на оптический кабель (рис. 3). В случае *a* по оси ординат на рефлектограмме отложена раз-

ность между значениями бриллюэновской частоты под воздействием механической нагрузки и без нее, т.е. произведен вычет нулевого состояния; в случае *б* результаты представлены без вычета нулевого состояния.

Рис. 3. Бриллюэновские рефлектограммы: *а* – с вычетом нулевого состояния; *б* – без вычета нулевого состояния. Ось абсцисс – координата в волоконной цепи, м; ось ординат – бриллюэновский сдвиг, МГц/ГГц для *а/б* соответственно для сегментов линии 1–4

В эксперименте измерялось удлинение оптического волокна в процессе его растяжения. Обнаружено, что волокно начинает значительно удлиняться (величина относительного удлинения более 0,01 %) при приложении к нему нагрузки в 26 кН, что, следовательно, ведет к заметному увеличению частоты бриллюэновского сдвига.

Анализ результатов показывает, что они не соответствуют линейной зависимости (1), а следуют нелинейному уравнению (2). Лишь с некоторого порогового значения нагрузки, приложенной к испытываемому образцу, частота бриллюэновского сдвига начинает экспоненциально возрастать, как показано на рис. 4, где каждой кривой соответствует растягиваемый оптический модуль кабеля.

Причиной подобного нелинейного поведения может быть наличие в кабеле запаса длины оптического волокна из-за свободной укладки оптического волокна в кабель, а также возможность продольного перераспределения оптического волокна вдоль центрального оптического модуля кабеля. Кроме того, конструкция кабеля позволяет предположить, что армирующие проволоки начинают испытывать растягивающую нагрузку гораздо раньше, чем оптическое волокно, из-за чего также появляется запас прочности оптоволоконного кабеля.

Рис. 4. Зависимость частоты бриллюэновского сдвига от натяжения кабеля

Для анализа состояния оптического волокна в кабеле проведена оценка нелинейности распределения нагрузки вдоль оптического волокна. Для этого были взяты центральные значения частоты бриллюэновского сдвига для каждой волоконной жилы, после чего из них было вычтено среднее значение крайних величин. Полученная величина R характеризует так называемый «радиус выпуклости» бриллюэнограммы соответствующей жилы. Было отмечено, что чем выше натяжение волокна, тем более «выпуклой» становится бриллюэнограмма оптоволоконной жилы, что может свидетельствовать о наличии в центральной части кабеля более высоких нагрузок при его растяжении (рис. 5).

Рис. 5. Радиус «выпуклости» бриллюэнограммы

Кроме стандартных методов обработки бриллюэнограмм был также применен корреляционный метод, описанный в [9], который по-

звolyет увидеть напряженные участки в волокне при воздействии на него небольших нагрузок.

Вычисляя на основе разработанной программы расчета корреляционную зависимость между сдвигами бриллюэновской частоты на соответствующих участках оптического кабеля, можно выявить зоны, в которых наблюдается изменение состояния оптического волокна.

Данные расчета представлены на рис. 6. По оси абсцисс отложена начальная позиция, а по оси ординат – величина интервала Δ , в котором рассчитывается коэффициент корреляции (последний изменяется в пределах от 0 до 1). Уровень серости точки зависит от рассчитанного коэффициента корреляции, при этом нулевому коэффициенту соответствует черный цвет, единичному – белый.

Рис. 6. Коррелограммы бриллюэновских рефлектограмм для случаев:
 а – натяжение 10–12 кН; б – натяжение 20–22 кН; в – натяжение
 30–32 кН; г – натяжение 40–42 кН; д – натяжение 50–52 кН

На коррелограммах г и д (см. рис. 6) отчетливо видны четыре темных пилообразных выступа. Сопоставление координат этих выступов с данными рис. 3 позволяет заключить, что выступы соответству-

ют участкам, в которых происходит значительное изменение механического состояния волокна. Интерпретация этого результата состоит в том, что на таких участках коэффициент корреляции резко падает.

Эти же пилообразные выступы можно наблюдать и на коррелограммах для более низких значений нагрузки, прикладываемой к оптическому кабелю (случаи *б* и *в* на рис. 6). В то же время обычный визуальный анализ рефлектограмм, снятых при этих значениях нагрузки (см. рис. 3), еще не позволяет обнаружить участки волокна, в которых появилось механическое напряжение.

Заключение

Данное исследование доказывает, что метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет осуществлять неразрушающий контроль оптических кабелей связи как в процессе производства, так и в процессе его эксплуатации.

Анализ бриллюэновских рефлектограмм позволяет оценить, какова степень влияния конструкции волоконного кабеля, а также способа укладки в него оптического волокна на чувствительность к растягивающим нагрузкам. Отмечено, что армирующие проволоки, а также свободная укладка оптического волокна в кабель позволяют обеспечить запас прочности для оптического волокна по отношению к кабелю в целом.

Исследование показало, что вносимые растягивающие нагрузки, начиная с пороговых значений примерно в 30 кН, приводят к заметному приросту бриллюэновского сдвига, который, в свою очередь, носит нелинейный характер. Кроме того, при таких нагрузках нелинейный характер носит и само распределение напряжений вдоль волоконного модуля, что подтверждается полученными результатами. Таким образом, примененный в работе методический аппарат исследования относится к области нелинейной рефлектометрии.

Рассмотренный корреляционный метод анализа бриллюэновских рефлектограмм показал, что он может обеспечивать раннее обнаружение механических нагрузок в оптическом волокне. Данный метод полезен при исследовании частотных бриллюэновских сдвигов малой величины.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Пермского края и ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» в рамках научного проекта № 14-42-08009 p_офи_м.

Список литературы

1. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.Т. Потапов, Ю.К. Чаморовский // Фотон-экспресс. – 2005. – № 6. – С. 114–128.
2. Ситнов Н.Ю. Задачи и методы мониторинга ВОЛП // Информатика и проблемы телекоммуникаций. – 2007. – № 2. – С. 91–92.
3. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРарт, 2005. – 208 с.
4. Беспрозванных В.Г., Первадчук В.П. Нелинейные эффекты в волоконной оптике. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 228 с.
5. Агравал Г. Применение нелинейной волоконной оптики. – СПб.: Лань, 2011. – 592 с.
6. Богачков И.В., Овчинников С.В., Горлов Н.И. Повышение точности оценки распределенных нерегулярностей в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. – 2012. – № 4. – С. 3–13.
7. Оптико-механическая модель измерения характеристик волоконного световода / В.Г. Беспрозванных, В.Р. Каюмов, К.П. Латкин, И.С. Стволов // Сборник научных трудов SWorld. – 2014. – Т. 27, № 3. – С. 3–7.
8. Нелинейно-оптическая технология контроля состояния поляризации волоконных световодов / В.Г. Беспрозванных, И.Р. Дроздов, Я.С. Кузьминых, А.С. Петухов // Сборник научных трудов SWorld. – 2014. – Т. 7, № 3. – С. 22–27.
9. Поляризационная рефлектометрия анизотропных волоконных световодов / Ю.А. Константинов, И.И. Крюков, В.П. Первадчук, А.Ю. Торошин // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, № 11. – С. 1068–1070.

References

1. Guliaev U.V., Nikitov S.A., Potapov V.T., Chamorovskii U.K. Volokonno-opticheskie tekhnologii, ustroistva, datchiki i sistemy [Fiber-optic technologies, devices, sensors and systems]. *Foton-express*, 2005, no. 6, pp. 114-128.
2. Sitnov N.U. Zadachi i metody monitoringa VOLP [Objectives and methods of monitoring FOTL]. *Informatika i problemy telekommunikatsii*, 2007, no. 2, pp. 91-92.
3. Listvin A.V., Listvin V.N. Reflektometriia opticheskikh volokon [Optical fiber reflectometry]. Moscow: LESARart, 2005. 208 p.

4. Besprozvannykh V.G., Pervadchuk V.P. Nelineinye efekty v volokonnoi optike [Nonlinear effects in fiber optics]. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2011. 228 p.

5. Agraval G. Primenenie nelineinoi volokonnoi optiki [Nonlinear fiber optics application]. Saint-Petersburg: Lan', 2011. 592 p.

6. Bogachkov I.V., Ovchinnikov S.V., Gorlov N.I. Povysheniie tochnosti otsenki raspredelennykh nereguliarnostei v opticheskikh voloknakh [Estimating accuracy increase of the distributed irregularities in optical fibers]. *Vestnik SibGUTI*, 2012, no. 4, pp. 3-13.

7. Besprozvannykh V.G., Kaiumov V.R., Latkin K.P., Stvolov I.S. Optiko-mekhanicheskaiia model' izmereniia kharakteristik volokonного svetovoda [Optomechanical measurement model of fiber waveguide characteristics]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*, 2014, vol. 27, no. 3, pp. 3-7.

8. Besprozvannykh V.G., Drozdov I.R., Kuz'minykh Ia.S., Petukhov A.S. Nelineino-opticheskaiia tehnologiia kontroliia sostoianiia polyarizatsii volokonnykh svetovodov [Nonlinear optical monitoring technology of fiber waveguides polarization state]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 22-27.

9. Konstantinov Iu.A., Kriukov I.I., Pervadchuk V.P., Toroshin A.Iu. Polyarizatsionnaia reflektometriia anizotropnykh volokonnykh svetovodov [Polarization reflectometry of anisotropic fiber waveguides]. *Kvantovaia elektronika*, 2009, vol. 39, no. 11, pp. 1068-1070.

Получено 1.06.2015