DOI: 10.17117/na.2015.07.607

Поступило в редакцию: 14.07.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.07.607.pdf>

Беспрозванных В.Г.
Экспериментальное исследование механического
состояния волоконно-оптического кабеля при
высоких растягивающих нагрузках

Besprozvannykh V.G.
Experimental investigation of fiber-optic cable
mechanical state in high tensile stress conditions

В работе выполнен анализ влияния растягивающих нагрузок до 54 кН на оптический коммуникационный кабель на основе метода бриллюэновской рефлектометрии. Проведена экспериментальная проверка гипотезы нелинейности

Ключевые слова: волоконно-оптический кабель, бриллюэновская рефлектометрия

Беспрозванных Владимир Геннадьевич
Кандидат физико-математических наук, доцент
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

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

Key words: fiber-optic cable, Brillouin optical time-domain reflectometry

Besprozvannykh Vladimir Gennadjevich
Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Associate Professor
Perm national research polytechnic university
Perm, Komsomol Avenue, 29

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 необходимой частью процесса эксплуатации волоконно-оптических линий связи и волоконно-оптических приборов и датчиков [1].

Одним из способов контроля деформаций оптического волокна является применение метода бриллюэновской рефлектометрии. Бриллюэновское рассеяние представляет собой неупругое рассеяние света на акустических фоновых волнах, 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 $f = 11$ 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 [2]:

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

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 [3]. 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 работах [4, 5] 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 высоких 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.

Экспериментальные исследования растягивающих нагрузок проводились на испытательном стенде (рис. 1), предназначенном для испытания оптического кабеля под растягивающей нагрузкой до 55 кН.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – бриллюэновский 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, содержащий 6 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 2 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 Манделъштама-Бриллюэна [3]. Параметры бриллюэновского анализатора: рабочая длина волны $\lambda = 1550$ нм, максимальное количество усреднений $N = 104$, минимальное пространственное разрешение $\Delta L = 1$ м.

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

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

Рис. 3. Бриллюэновские рефлектограммы

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). Начиная 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.

Рис. 4. Зависимость частоты бриллюэновского сдвига от натяжения 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 оптоволокна в кабеле.

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

Таким образом, 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.

Список литературы:

1. Ситнов Н.Ю. Задачи и методы мониторинга ВОЛП // Информатика и проблемы телекоммуникаций, 2007. № 2. С. 91-92.
2. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРарт, 2005. 208 с.
3. Беспрозванных В.Г., Первадчук В.П. Нелинейные эффекты в волоконной оптике. Пермь: ПНИПУ, 2011. 228 с.
4. Беспрозванных В.Г., Каюмов В.Р., Латкин К.П., Стволов И.С. Оптико-механическая модель измерения характеристик волоконного световода // Сборник научных трудов SWorld, 2014. Т. 27. № 3. С. 3-7.
5. Беспрозванных В.Г., Дроздов И.Р., Кузьминых Я.С., Петухов А.С. Нелинейно-оптическая технология контроля состояния поляризации волоконных световодов // Сборник научных трудов SWorld, 2014. Т. 7. № 3. С. 22-27.

© 2015, Беспрозванных В.Г.

Экспериментальное исследование механического состояния волоконно-оптического кабеля при высоких растягивающих нагрузках

© 2015, Besprozvannykh V.G.

Experimental investigation of fiber-optic cable mechanical state in high tensile stress conditions