

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И РАННЯЯ ДИАГНОСТИКА ИХ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА—БРИЛЛЮЭНА

В этой работе представлены результаты исследований возможностей автоматизации обработки данных измерений, полученных от бриллюэновского оптического рефлектометра, световодов, содержащих различные виды одномодовых оптических волокон. Анализируя параметры рассеяния Мандельштама—Бриллюэна, полученных из данных бриллюэновских рефлектограмм, возможно осуществлять классификацию оптических волокон в исследуемых оптических кабелях телекоммуникационных систем, а также оценивать изменение бриллюэновского частотного сдвига и определять степень продольного натяжения оптических волокон. Начальные значения бриллюэновского частотного сдвига и спектр рассеяния Мандельштама—Бриллюэна для каждой разновидности оптических волокон отличаются. Представлены разработанные программы для автоматизированной обработки бриллюэновских рефлектограмм. С помощью анализа уровня обратно отражённого сигнала можно выделить фактор, оказавший преимущественное влияние на параметры сигнала рассеяния Мандельштама—Бриллюэна в исследуемых участках оптических волокон, и компенсировать влияние температурных изменений в графиках распределения продольного натяжения. Это позволяет построить график распределения продольного натяжения вдоль световода, вызванного именно механическими воздействиями на оптические волокна. Сделаны выводы о точности оценок, полученных по различным алгоритмам, на основании накопленного опыта по работе с представленными программами.

Ключевые слова: оптическое волокно, натяжение волокон, бриллюэновская рефлектометрия, спектр рассеяния Мандельштама—Бриллюэна, профиль бриллюэновского спектра.

Для выявления участков оптических волокон (ОВ) с изменёнными натяжением и температурой в оптических кабелях (ОК) применяются бриллюэновские рефлектометры (БОИР — бриллюэновский оптический импульсный рефлектометр) [1–6]. В основу работы БОИР положен анализ характеристик рассеяния Мандельштама—Бриллюэна (РМБ) [5–8].

В настоящее время для различных назначений разработано множество разновидностей ОВ [1, 8–11]. За последние годы изменился состав поставщиков материалов, применяемых для производства ОВ и изготовления ОК на территории России [1, 9].

Оценка оптических характеристик ОВ в проложенных ОК, а также классификация разновидностей ОВ в ОК (в том числе ОВ, схожих типов, но разных производителей) являются актуальными задачами [8–12].

Для их решения целесообразно получить и проанализировать бриллюэновские рефлектограммы. С помощью графиков, полученных с использованием БОИР, можно классифицировать тип ОВ в проложенном ОК, поскольку даже волокна одной разновидности, но разных производителей имеют заметные различия в частотных характеристиках РМБ [8–11].

В структуре современных ОВ может существовать несколько слоёв, оптические и акустические свойства которых различны, что оказывает влияние на формирование спектра РМБ (СРМБ) [9–11].

Для изучения параметров РМБ (СРМБ и вычисления частоты главного максимума СРМБ — бриллюэновского сдвига частоты — БЧС) для всех тестируемых разновидностей ОВ требуются данные из рефлектограмм БОИР [9, 12–14]. Имея набор параметров РМБ (профилей СРМБ) различных видов ОВ, можно классифицировать ОВ в ОК, а так-

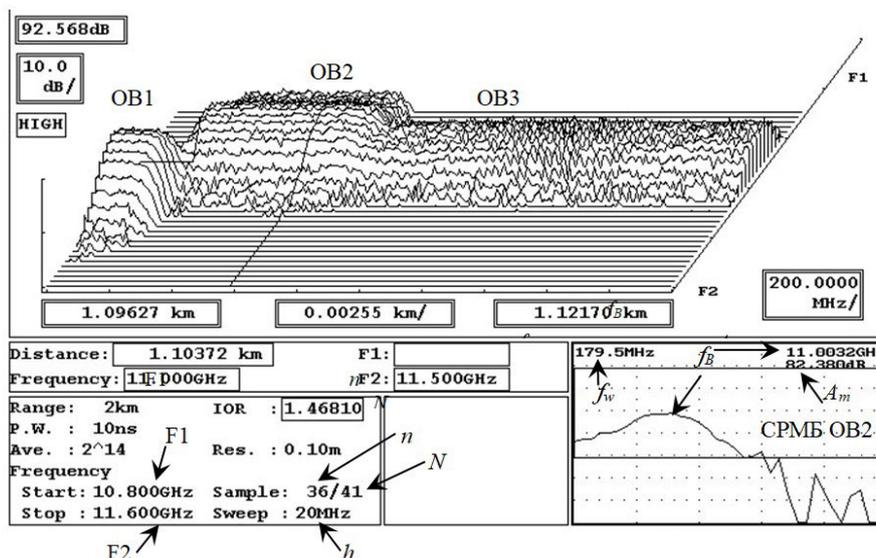


Рис. 1. Пример исходной бриллюэновской рефлектограммы световода

же ускорить выявление потенциально ненадёжных участков ОВ ВОЛС за счёт автоматизирования процесса [13–16].

На рис. 1 представлена рефлектограмма БОИР (распределение СРМБ по длине световода, полученное после обработки результатов измерений в БОИР "Ando AQ 8603"). Световод состоит из ОВ нормализующей катушки (ОВ1 (рекомендация МСЭ–Т G.652) — длина примерно 1 км) и из двух видов ОВ со смещенной длиной волны отсечки (рекомендация МСЭ–Т G.654 — ОВ со смещенной длиной волны отсечки, равной 1530 нм [1, 9]): ОВ2 — ОВ–G.654E "Fujikura" и ОВ3 — ОВ–G.654 "Corning".

В правом нижнем углу показан профиль СРМБ в выбранном поперечном сечении световода (на расстоянии 1103,72 м, где участок световода состоит из ОВ2 — ОВ–G.654E "Fujikura"). Там же указаны БЧС ($f_B = 11,0032$ ГГц), ширина полосы СРМБ ($f_w = 179,5$ МГц) и уровень обратно отражённого сигнала в максимуме ($A_m = A(f_B) = 82,380$ дБ).

В левом нижнем углу приведены данные о предельной дистанции измерений (2 км), показателе преломления (1,46810), длительности зондирующего импульса (10 нс), о количестве усреднений (2^{14}), о представляемом после обработки разрешении по длине световода (0,1 м), а также данные частотных характеристик сканирования (F_1 , F_2 , n , N и h), которые требуются для получения значений в точках сетки по оси частот [13–16].

Для формирования рефлектограммы БОИР (получение СРМБ, а после этого вычисление БЧС и продольного натяжения) проводится частотное сканирование, которое в данном случае начинается с частоты F_1 (для примера на рис. 1 $F_1 = 10,8$ ГГц = $=f_1$) с шагом h ($h = 20$ МГц).

Конечная частота F_2 ($F_2 = 11,6$ ГГц на рис. 1) достигается только при прохождении процесса сканирования по всем точкам сетки частот ($n = N = 41$). Поскольку процесс сканирования при работе БОИР можно останавливать на любом шаге n (на рис. 1 $n = 36$), то частота завершения сканирования в этом случае равна:

$$f_2 = f_1 + h(n - 1). \quad (1)$$

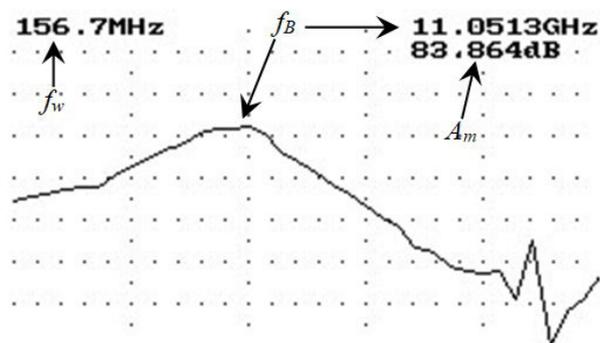


Рис. 2. СРМБ ОВ–G.654E «Corning» (OB3)

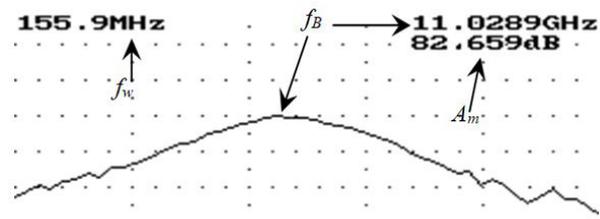


Рис. 3. СРМБ ОВ–G.654E «Саранск»

Например, для рефлектограммы на рис. 1 $f_2 = 11,6$ ГГц.

Наибольшее значение уровня обратно отражённого сигнала (A_m) будет наблюдаться на частоте, равной БЧС (f_B).

На рис. 2 приведён пример профиля СРМБ, взятый при том же измерении на другом участке того же световода. Но на этом участке (OB3) использовано ОВ другого производителя ("Corning"), хотя и той же разновидности (ОВ–G.654). При этом БЧС равен 11,0513 ГГц.

На рис. 3 представлен профиль СРМБ для аналогичной разновидности G.654E ОАО "Волоконно-оптические системы" (Саранск) при нормальных условиях [1]. БЧС в этом случае равен 11,0289 ГГц.

Сравнивая профили СРМБ, представленные на рис. 1–3, можно заметить их отличия, которые можно использовать для выявления типов ОВ.

Проанализируем алгоритмы, используемые для определения типа ОБ при наличии образцов бриллиантовых рефлектограмм (шаблонов) ранее изученных ОБ. Ранее в работах [8, 9, 14–16] уже были рассмотрены некоторые алгоритмы, которые на основе корреляционной оценки совпадения загруженного изображения СРМБ с шаблонами из базы рефлектограмм, в том числе по критерию г-Пирсона.

Данные загруженного графика заносятся в одномерный массив, после чего происходит сравнение его с уже заранее загруженными в программу шаблонами графиков; для определения типа рефлектограмм используются специальные алгоритмы.

Корреляционная оценка загруженного изображения по сравнению с шаблонами производится по следующему алгоритму:

1. Находится сумма всех координат по оси «у».
2. Находится среднее значение координат.
3. Значение каждого элемента массива изменяется на полученную в пункте 2 величину в меньшую сторону. В итоге получается, что среднее значение нового массива равно нулю («центрирование»).

4. Если по модулю математическое ожидание появления очередной координаты получается разным для каждого шаблона, то производится корректировка вычислений по отношению $\{M_g\}/\{M_0\}$, где $\{M_g\}$ — математическое ожидание, взятое по модулю у образца исследуемой рефлектограммы, а $\{M_0\}$ — математическое ожидание, взятое по модулю у каждого из остальных образцов-шаблонов.

1. Корреляционная оценка рассчитывается по следующей формуле:

$$K_r = \sum_{i=1}^N (k_0 \cdot k_g), \quad (2)$$

где K_r — корреляционная оценка, k_0 — координата «образца» (шаблона), k_g — координата из загруженного графика [14–16].

Суммирование в (2) происходит по всему массиву координат графика.

Анализ показал [1, 9], что с учётом специфики процесса обработки данных результатов измерений в БОИР (бриллиантовых рефлектограмм), корреляционную оценку (K_r) по критерию г-Пирсона удобно переписать в следующей форме:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - A_A)(A_i^1 - A_A^1)}{\sum_{i=1}^N \sqrt{(A_i - A_A)^2} \sum_{i=1}^N \sqrt{(A_i^1 - A_A^1)^2}}, \quad (3)$$

где A_i — значение ординат в i -м узле сетки частот (абсцисс) загруженного массива, A_A — среднее арифметическое значение ординат загруженного массива, A_i^1 — значение ординат в i -м узле сетки частот оцениваемого шаблона, A_A^1 — среднее арифметическое значение ординат оцениваемого шаблона, N — количество координат диапазона частот для анализа [14–16].

Процесс вычисления K_r проводится для всех образцов из базы рефлектограмм ОБ, и в результате выбирается «образец» с максимальным значением K_r .

При совпадении частотных диапазонов (или после приведения в соответствие графиков по частоте) оценку совпадения рефлектограмм следует проводить по такой формуле:

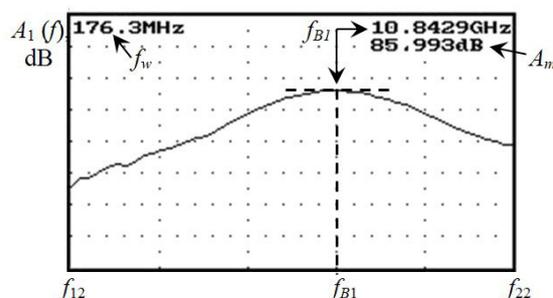
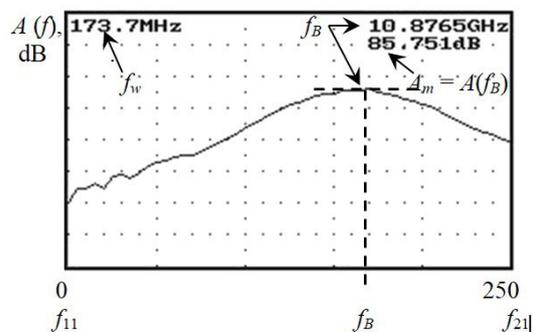


Рис. 4. Масштабирование профилей СРМБ исследуемого ОБ и шаблона

$$K_r = \sum_{i=1}^N (A_i - A_i^1)^2 \cdot k_i(A_i) / N, \quad (4)$$

где k_i — коэффициент «важности» i -го отсчёта.

«Образец» с минимальным значением K_r по формуле (4) будет считаться как шаблон, имеющий наилучшее совпадение [15].

Если данные по оси ординат (i -тое значение в массиве частот — f_i) отличаются от сетки ординат шаблона, то необходимо сделать интерполяцию по соседним значениям. Так как профиль СРМБ в области максимума имеет параболическую форму, то удобно применить интерполяцию второго порядка. Для сокращения вычислений при обработке массивов следующих шаблонов следует сохранять результаты дополнительных вычислений для исследуемого массива. (Это позволит избежать повторных вычислений, а также сделать возможные последующие интерполяции более точными.)

Так как значимость отсчётов (значений ординат) при удалении от максимального значения уменьшается, можно повысить эффективность оценок, выбрав значение k адаптивным (зависящим от величины уменьшения уровня по отношению к значению в максимуме). Например, принять в (4) $k = 0,97$ для значений A_i , отличающихся от максимального на $-2... -4$ дБ, а для значений с уровнем $-4... -7$ дБ от уровня максимума — $k = 0,95$ — и т. п.

На рис. 4 приведён пример возможного «центрирования» сравниваемых профилей СРМБ и определения общего диапазона частот из бриллиантовых рефлектограмм для двух ОБ-G.652 разных производителей при нормальных условиях. По осям абсцисс отложены номера отсчётов.

$$f_{11} = 10,5 \text{ ГГц}, f_{21} = 11,0 \text{ ГГц}, f_{12} = 10,6 \text{ ГГц}, f_{22} = 11,1 \text{ ГГц}.$$

Для более точной классификации типа ОБ алгоритм оценки подобия следует усовершенствовать. При оценке степени совпадения рефлектограмм необходимо сделать единым масштаб графиков по осям абсцисс и ординат.

Перед сравнением исследуемых графиков СРМБ следует выделять совпадающую часть частотно-

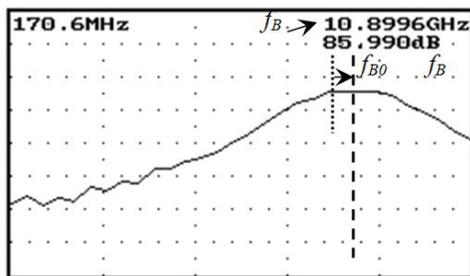


Рис. 5. Оценка изменения БЧС для нагретого OV-G.652

го диапазона (в примере, представленном на рис. 4, для анализа выделена полоса частот от 10,6 ГГц до 11,0 ГГц).

Так как натяжение и температура исследуемого ОВ могут отличаться от аналогичных характеристик «образцового» ОВ, то в этом случае возможна ошибочная классификация (будет выбран неправильный шаблон). В этом случае будет целесообразно перед сравнением массивов данных выровнять положение основных максимумов и привести оси в единый масштаб. Для этого потребуются пересчитать для шаблона масштаб и координаты по оси абсцисс. Также можно сдвинуть все точки по оси ординат на величину разности значений в максимумах, что приведёт к их одинаковым значениям.

Профиль СРМБ первого OV-G.652, рассмотренного выше, но нагретого до температуры $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, представлен на рис. 5. В этом случае $f_1 = 10,5\text{ ГГц}$, $f_2 = 11,1\text{ ГГц}$, $f_B = 10,9\text{ ГГц}$.

После анализа данных загруженного массива можно определить величину смещения БЧС (отличие f_B от f_{B0}) и изменение уровня сигнала обратного отражения в области максимума СРМБ [13]. Это позволяет определить изменения натяжения ОВ при воздействии различных внешних факторов [13].

Для обработки данных рефлектограмм БОИР, автоматизации вычислений и классификации факторов, вызвавших изменения БЧС и продольного натяжения, в Омском государственном техниче-

ском университете (ОмГТУ) были созданы программы [17, 18], работа которых кратко описана ниже.

Пример экрана программы, используемой для классификации разновидности ОВ (ОВ – G.655 – NZDSF), представлен на рис. 6.

После запуска программы необходимо загрузить файл выходной рефлектограммы БОИР. На рис. 6 в левом верхнем углу показана загруженная мультирефлектограмма с указанием характерных участков и БЧС. В ней приведены зависимости натяжения, ширины СРМБ, уровня сигнала и профиль СРМБ. (Может использоваться любая другая разновидность рефлектограмм БОИР, которая содержит характеристики СРМБ.) После этого запускается процесс выделения данных, соответствующий графику СРМБ. Этот график СРМБ выводится справа от изображения мультирефлектограммы (рис. 6), а после него следует график нормированного массива, который будет сравниваться с базой шаблонов.

После проведённого анализа (в данном примере — на основе формулы (3)) «образец» (шаблон), который по итоговым оценкам получил наилучшую оценку совпадения с анализируемым изображением (максимальное значение оценки по формуле (3)), подсвечивается программой зелёным цветом (на рис. 6 отмечен стрелкой, как и исходный график СРМБ). «Образцы» с меньшей (но близкой) степенью подобия подсвечиваются жёлтым цветом (приведены на рис. 6 ниже рассмотренных выше изображений) [17].

В последующих версиях программы были добавлены функции определения натяжения ОВ и дополнительные корректирующие действия [16, 18].

Пример экрана программы после завершения процесса выделения профиля СРМБ из файла рефлектограммы, классификации типа (в этом примере — ОВ "LEAF", нагретое до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$) и вычисления значений изменения БЧС (в МГц) и продольного натяжения (в %) показан на рис. 7. На первом этапе программа автоматически определяет данные о частотном диапазоне, максимальной амплитуде и т. п. Пользователь может получить доступ к гра-

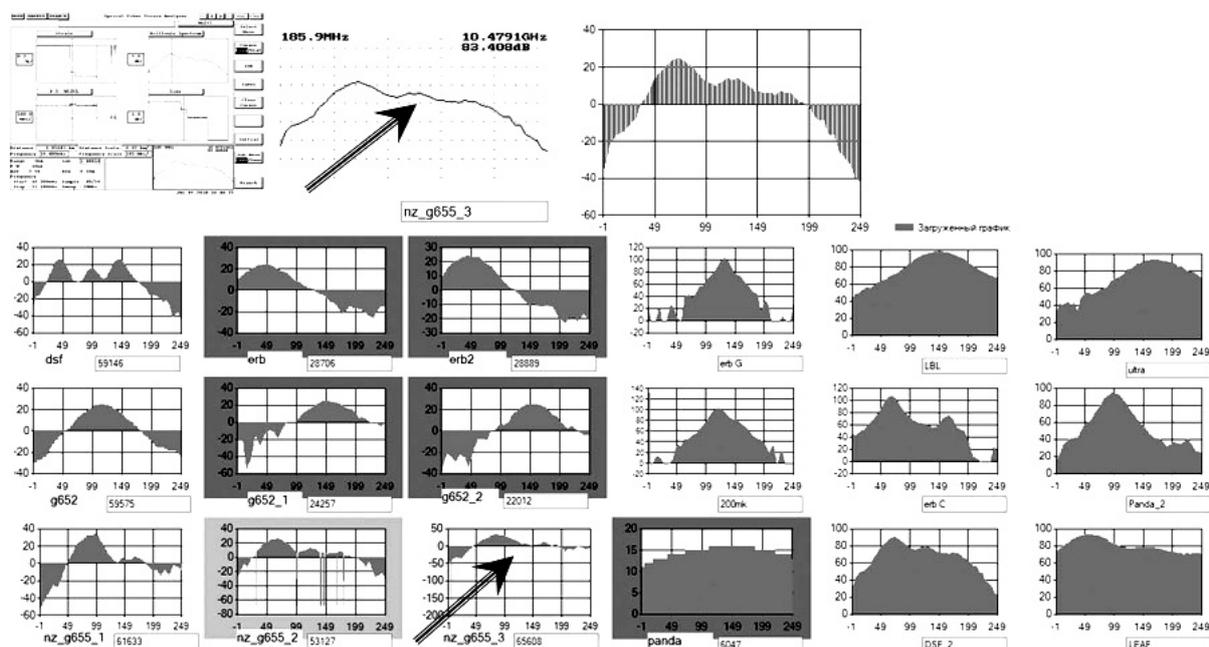


Рис. 6. Скриншот экрана программы при классификации типа ОВ

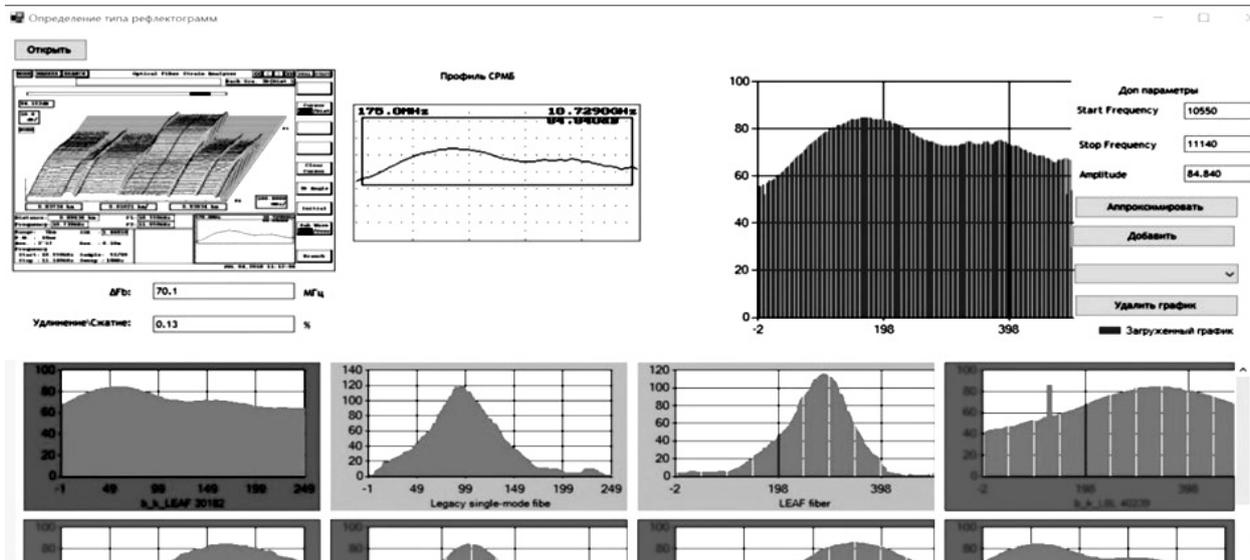


Рис. 7. Выявление разновидности ОВ, БЧС и уровня натяжения

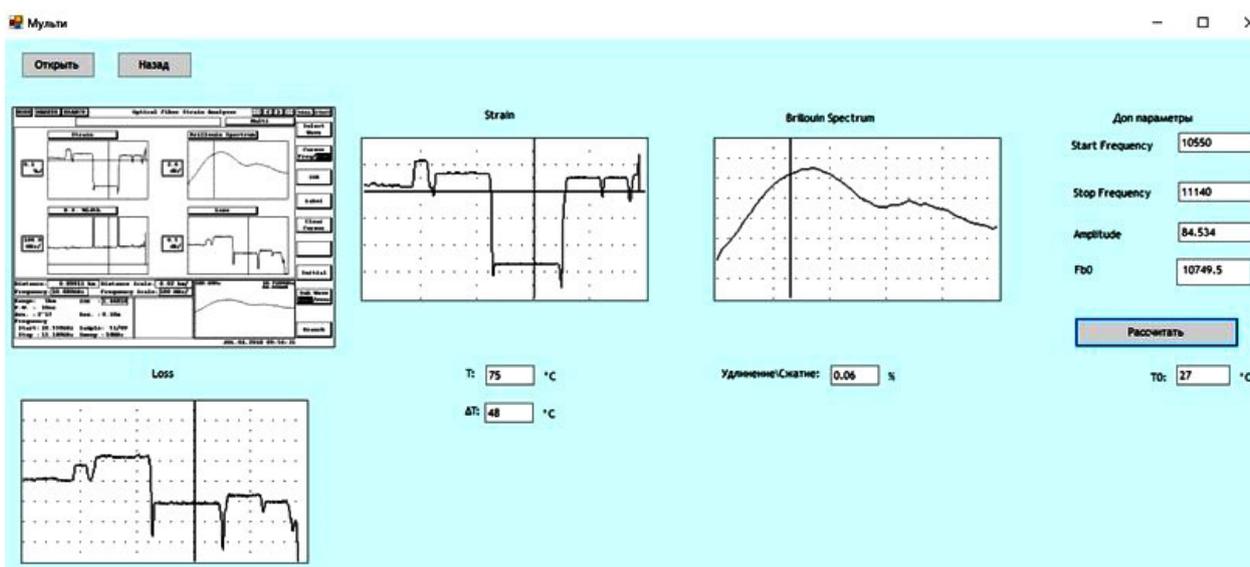


Рис. 8. Пример вычисления параметров ОВ

фическим изображениям всех «образцов» из базы рефлектограмм.

В усовершенствованной версии программы [18] после определения SRMB определяются также параметры РМБ и оценивается величина продольного натяжения вдоль ОВ.

При анализе мультирефлектограмм БОИР можно выявлять участки с изменённой температурой и проводить коррекцию значений БЧС и продольного натяжения на основе выделения и компенсации изменений, которые были обусловлены только температурными воздействиями. В результате вычисляется величина продольного натяжения ОВ, которое было вызвано продольными силовыми нагрузками.

Пример работы программы в таком режиме («Мульти») представлен на рис. 8.

Кроме определения БЧС (и его возможного изменения относительно начального значения), рассчитывается величина натяжения ОВ, а также находится температура анализируемого ОВ и её изменения (« ΔT ») относительно начальной (« T_0 »).

По рефлектограмме уровня обратного сигнала («Loss») с помощью алгоритма, подробно описан-

ного в [13, 18], можно определить изменение БЧС, которое вызвано исключительно температурными воздействиями.

На рис. 9 приведена копия экрана при расчете БЧС, температуры и натяжения, на котором в правом нижнем углу отображается график изменений БЧС из-за температурных воздействий.

После нажатия кнопки «Компенсировать» в правом нижнем углу экрана будет сделана соответствующая компенсация изменений степени продольного натяжения из-за изменений температуры [18].

Для сравнения результатов оценок подобию, полученных различными способами, была разработана специальная разновидность представленных программ, в которой все полученные оценки были сведены вместе в единые результирующие таблицы (рис. 10).

В левом нижнем углу (область «1») представлена таблица корреляции между данными с каждого шаблона из БД и исходным изображением в соответствии с выбранной формулой и режимом. Данные в таблице отсортированы в порядке убывания для оценок по первым двум способам или для третьего способа (формула (3)) — в порядке возрастания.

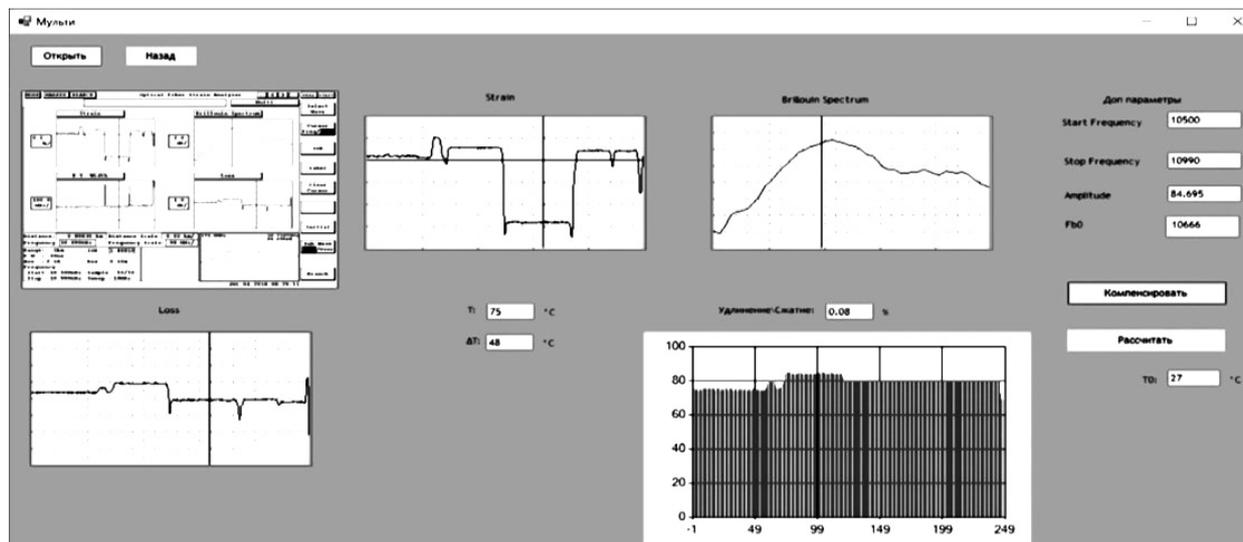


Рис. 9. Пример экрана работающей программы после компенсации изменений степени натяжения из-за повышения температуры

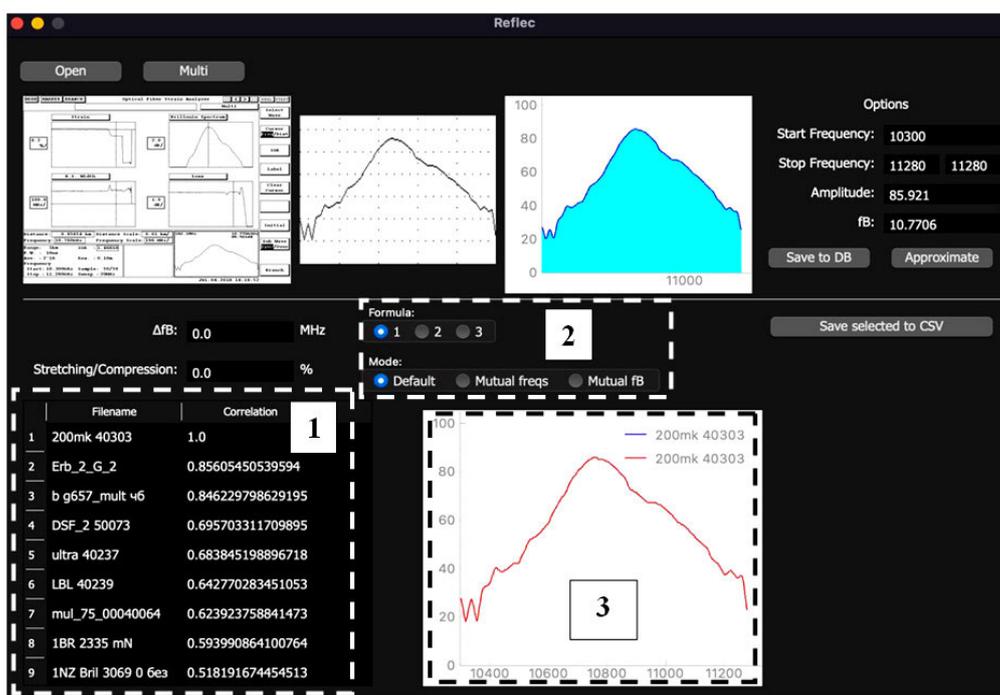


Рис. 10. Скриншот сравнения оценок данных БОИР, полученных различными вариантами

Режимы располагаются в разделе "Mode" (область «2»):

1. "Default" — не производится никаких изменений, в выбранную формулу передаются все значения координат по порядку с каждого из изображений.

2. "Mutual freqs" — выбирается общий диапазон частот с обоих изображений (а также производится линейная интерполяция). Это необходимо для того, чтобы получить значения координат шаблона из базы данных по тем же значениям частот, что и в исходном изображении. Далее эти значения координат — из исходного изображения и интерполированное с шаблона из БД передаются в выбранную формулу.

3. "Mutual fb" — производится тот же самый процесс, что и в режиме "Mutual freqs", за исключением того, что перед передачей данных в формулу производится «выравнивание» положений макси-

мумов и «отсечение» лишних координат, не имеющих соответствия.

Значение « Δf_B » вычисляется как разность модуля БЧС (fb) исходного изображения и БЧС шаблона, имеющего наилучшее значение корреляционной оценки в соответствии с выбранным режимом и формулой. Значение "Stretching/Compression" вычисляется как модуль отношения БЧС исходного изображения к БЧС шаблона, имеющего наилучшее значение корреляции, с переводом в проценты.

По нажатию на любую строку таблицы рядом на одной плоскости отображаются два графика — с исходного изображения и с выбранного шаблона (область «3»). При отображении учитывается выбранный режим в разделе "Mode". (Для "Mutual freqs" — используется общий диапазон частот, для "Mutual fb" — дополнительно выравниваются максимумы). Примеры представлены на рис. 11.

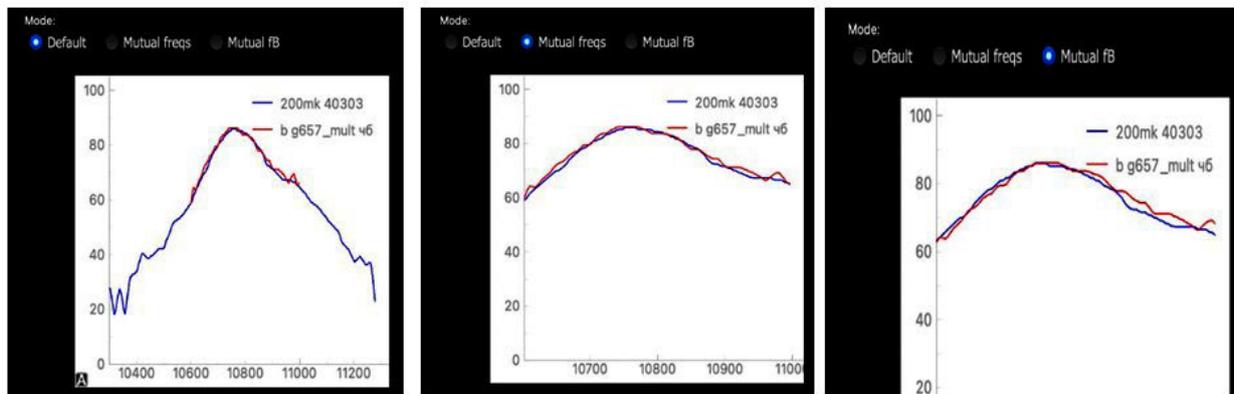


Рис. 11. Скриншот оценок подобию, полученных различными вариантами

Анализ показал, что первый (2) и третий (4) из рассмотренных алгоритмов дают схожие оценки.

Одной из проблем, которая была выявлена в результате анализа большого количества экспериментальных рефлектограмм БОИР, является классификация ОВ для разновидностей с единственным «пиком», имеющих близкие значения БЧС. Так как сдвиги СРМБ могут быть вызваны механическими и температурными воздействиями, это может вызывать ошибки классификации в таких случаях. Для повышения точности оценок степени подобию графиков СРМБ следует перед вычислениями совместить эти графики в области максимумов. При оценке степени подобию графиков СРМБ ОВ с единственным «пиком», имеющих близкие значения БЧС, меньшее количество ошибок классификации обнаружилось при оценках по второму алгоритму (3). Коррекция коэффициентов важности в (4) позволяет улучшить точность третьего алгоритма.

Выводы. Таким образом, представленные программы позволяют по рефлектограммам БОИР классифицировать ОВ, рассчитать характеристики БЧС и степени продольного натяжения, а также выявить фактор воздействия на ОВ и компенсировать влияние температурных воздействий.

Различия в частотных зависимостях РМБ позволяют выявлять тип ОВ.

Дальнейшее совершенствование программ автоматизированной обработки рефлектограмм БОИР связано с проведением дополнительных оценок, связанных с совмещением исследуемых графиков по положениям максимумов СРМБ.

Библиографический список

1. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Determination of the Mandelstam–Brillouin scatter frequency characteristic in optical fibers of various types // *Journal of Physics*. 2022. Vol. 2182. P. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012089.
2. Андреев В., Бурдин В., Нижгородов А. Сценарии прогноза срока службы оптического волокна в КАС // *Первая мила*. 2020. № 4. С. 34–43. DOI: 10.22184/2070-8963.2020.89.4.34.43.
3. Belokrylov M. E., Claude D., Konstantinov Y. A. [et al.]. Method for increasing the signal-to-noise ratio of Rayleigh back-scattered radiation registered by a frequency domain optical reflectometer using two-stage erbium amplification // *Instrum Exp Tech*. 2023. Vol. 66. P. 761–768. DOI: 10.1134/S0020441223050172.
4. Шувалов В. П., Зеленцов Б. П., Квиткова И. Г. Модель надёжности волоконно-оптической линии связи при недопустимом прогнозирующем контроле // *Вестник СибГУТИ*. 2020. № 4. С. 66–77. EDN: JICJMJ.
5. Gorshkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A. [et al.]. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-Art review and perspective // *Sensors* 2022. Vol. 22, № 1033. DOI: 10.3390/s22031033.
6. Barkov F. L., Konstantinov Y. A., Krivosheev A. I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain reflectometry // *Fibers*. 2020. Vol. 8, № 9. P. 1–11. DOI: 10.3390/FIB8090060.
7. Krivosheev A. I., Barkov F. L., Konstantinov Y. A. [et al.]. State-of-the-Art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing // *Instruments and Experimental Techniques*. 2022. Vol. 65 (5). P. 687–710. DOI: 10.1134/S0020441222050268.
8. Bogachkov I. V. Research of the features of Mandelstam–Brillouin backscattering in optical fibers of various types // *T-comm*. 2019. Vol. 13, № 1. P. 60–65. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10216. EDN: YWFXSX.
9. Богачков И. В., Горлов Н. И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах различных видов // *Приборы и техника эксперимента*, 2023. № 5. С. 70–77. DOI: 10.31857/S0032816223050063.
10. Ruffin A. B., Li M.-J., Chen X. [et al.]. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30 (23). P. 3123–3125. DOI: 10.1364/OL.30.003123
11. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S. [et al.]. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 2004. Vol. 22 (2). P. 631–639. DOI: 10.1109/JLT.2003.822007.
12. Krivosheev A. I., Konstantinov Y. A., Barkov F. L. [et al.]. Comparative analysis of the Brillouin frequency shift determining accuracy in extremely noised spectra by various correlation methods // *Instruments and Experimental Techniques*. 2021. Vol. 64 (5). P. 715–719. DOI: 10.1134/S0020441221050067.
13. Bogachkov I. V. Classification of the factors causing the change of the optical fiber strain on the basis of Brillouin reflectograms // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012038.
14. Bogachkov I. V. Automated determination of types and characteristics of the optical fibers state located in the laid cables // *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1546. P. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012044.
15. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. The basics of automated processing of optical fiber reflectograms for evaluating characteristics of the Mandelstam–Brillouin backscatter // *Conference: 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166114.
16. Bogachkov I. V. Principles of automated data processing of Mandelstam–Brillouin backscatter characteristics for evaluating the state of optical fibers // *T-comm*. 2020. Vol. 14, № 8. P. 47–52. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-8-47-52.

17. Программа для классификации разновидностей оптических волокон по бриллюэновским рефлектограммам: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610752 / Богачков И. В. № 2018662391; заявл. 07.11.2018.; опубл. 18.01.2019.

18. Программа для выявления типа воздействия на оптические волокна и определения их натяжения: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667360 / Богачков И. В. № 2019666447/69; заявл. 13.12.2019; опубл. 23.12.2019.

БОГАЧКОВ Игорь Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 7115-6052
AuthorID (РИНЦ) 276415
ORCID: 0000-0002-7019-1784
AuthorID (SCOPUS) 3699775670
ResearcherID: A-7770-2015
Адрес для переписки: bogachkov@mail.ru

Для цитирования

Богачков И. В. Определение разновидностей оптических волокон и ранняя диагностика их физического состояния на основе анализа характеристик рассеяния Манделъштама–Бриллюэна // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 107–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-107-116.

Статья поступила в редакцию 11.12.2023 г.

© И. В. Богачков

DETERMINATION OF OPTICAL FIBER VARIETIES AND EARLY DIAGNOSIS OF THEIR PHYSICAL CONDITION BASED ON THE ANALYSIS OF MANDELSTAM — BRILLOUIN BACKSCATTER PARAMETERS

Research results into the automating the processing of measurement data obtained from the Brillouin optical reflectometer, light guides containing various types of optical fibers are presented in this paper. By analyzing the parameters of the Mandelstam — Brillouin scatter obtained from Brillouin reflectograms, we can classify optical fibers in the studied telecommunication optical cables. This makes it possible to evaluate the change of the Brillouin frequency shift and determine the longitudinal fiber tension. The initial values of the Brillouin frequency shift and the profile of the Mandelstam — Brillouin scatter spectrum are different for each fiber type. The programs for automated processing of Brillouin reflectogram data are discussed. Estimation of the level of the back-reflected signal allows you to identify the factor, that had a predominant effect on the parameters of the Mandelstam — Brillouin scatter signal in the studied sections of optical fibers, and to compensate for the influence of temperature changes in the longitudinal strain distribution graphs. After that, we can plot a graph of the distribution of longitudinal strain along the fiber, caused precisely by mechanical influences on optical fibers. Conclusions about the accuracy of the estimates obtained by various algorithms, based on the accumulated experience in working with the presented programs are drawn.

Keywords: optical fiber, fiber strain, Brillouin reflectometry, Mandelstam — Brillouin backscatter spectrum, Brillouin spectrum profile.

References

1. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Determination of the Mandelstam — Brillouin scatter frequency characteristic in optical fibers of various types // *Journal of Physics*. 2022. Vol. 2182. P. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012089. (In Engl.).
2. Andreev V., Burdin V., Nizhgorodov A. Stsenarii prognoza sroka sluzhby opticheskogo volokna v KLS [Scenarios of prediction optical fiber lifetime in cable lines] // *Pervaya milya. Last Mile*. 2020. No. 4. P. 34–43. DOI: 10.22184/2070-8963.2020.89.4.34.43. (In Russ.).
3. Belokrylov M. E., Claude D., Konstantinov Y. A. [et al.]. Method for increasing the signal-to-noise ratio of Rayleigh back-scattered radiation registered by a frequency domain optical reflectometer using two-stage erbium amplification // *Instrum Exp Tech*. 2023. Vol. 66. P. 761–768. DOI: 10.1134/S0020441223050172. (In Engl.).
4. Shuvalov V. P., Zelentsov B. P., Kvitkova I. G. Model' nadezhnosti volokonno-opticheskoy linii svyazi pri nedostovernom prognoziryuyushchem kontrole [Reliability model of a fiber-optic communication line with unreliable predictive control] // *Bulletin of SibGUTI. The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2020. No. 4. P. 66–77. EDN: JICCJM. (In Russ.).
5. Gorshkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A. [et al.]. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-Art review and perspective // *Sensors* 2022. Vol. 22, no. 1033. DOI: 10.3390/s22031033. (In Engl.).
6. Barkov F. L., Konstantinov Y. A., Krivosheev A. I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain reflectometry // *Fibers*. 2020. Vol. 8, no. 9. P. 1–11. DOI: 10.3390/FIB8090060. (In Engl.).
7. Krivosheev A. I., Barkov F. L., Konstantinov Y. A. [et al.]. State-of-the-Art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing // *Instruments and Experimental Techniques*. 2022. Vol. 65 (5). P. 687–710. DOI: 10.1134/S0020441222050268. (In Engl.).
8. Bogachkov I. V. Research of the features of Mandelstam — Brillouin backscattering in optical fibers of various types // *T-comm*. 2019. Vol. 13, no. 1. P. 60–65. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10216. EDN: YWFXSX. (In Engl.).
9. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Eksperimental'nyye issledovaniya kharakteristik rasseyaniya Mandel'shtama — Brillouena v odnomodovykh opticheskikh voloknakh razlichnykh vidov [Experimental investigations into characteristics of Mandelstam — Brillouin scattering in single-mode optical fiber of various types] // *Pribory i tekhnika eksperimenta. Instruments and Experimental Techniques*. 2023. Vol. 66, no. 5. P. 775–781. DOI: 10.1134/S0020441223050068. (In Russ.).
10. Ruffin A. B., Li M.-J., Chen X. [et al.]. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30 (23). P. 3123–3125. DOI: 10.1364/OL.30.003123. (In Engl.).
11. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S. [et al.]. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 2004. Vol. 22 (2). P. 631–639. DOI: 10.1109/JLT.2003.822007. (In Engl.).

12. Krivosheev A. I., Konstantinov Y. A., Barkov F. L. [et al.]. Comparative analysis of the Brillouin frequency shift determining accuracy in extremely noised spectra by various correlation methods // *Instruments and Experimental Techniques*. 2021. Vol. 64 (5). P. 715–719. DOI: 10.1134/S0020441221050067. (In Engl.).

13. Bogachkov I. V. Classification of the factors causing the change of the optical fiber strain on the basis of Brillouin reflectograms // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012038. (In Engl.).

14. Bogachkov I. V. Automated determination of types and characteristics of the optical fibers state located in the laid cables // *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1546. P. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012044. (In Engl.).

15. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. The basics of automated processing of optical fiber reflectograms for evaluating characteristics of the Mandelstam — Brillouin backscatter // *Conference: 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166114. (In Engl.).

16. Bogachkov I. V. Principles of automated data processing of Mandelstam — Brillouin backscatter characteristics for evaluating the state of optical fibers // *T-comm*. 2020. Vol. 14, no. 8. P. 47–52. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-8-47-52. (In Engl.).

17. Programma dlya klassifikatsii raznovidnostey opticheskikh volokon po brilluenovskim reflektogrammam: cvidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019610752 [A program for classifying varieties of optical fibers according to Brillouin reflectograms: Certificate of the state computer program registration № 2019610752] / Bogachkov I. V. No. 2018662391; filed 07.11.2018; published 18.01.2019. (In Russ.).

18. Programma dlya vyyavleniya tipa vozdeystviya na opticheskiye volokna i opredeleniya ikh natyazheniya: cvidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019667360 [A program for identifying the type of impact on optical fibers and determining their tension: Certificate of the state computer program registration No. 2019667360] / Bogachkov I. V. No. 2019666447/69; filed 13.12.2019; published 23.12.2019. (In Russ.).

BOGACHKOV Igor Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Communications and Information Security Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7115-6052

AuthorID (RSCI): 276415

ORCID: 0000-0002-7019-1784

AuthorID (SCOPUS) 3699775670

ResearcherID: A-7770-2015

Correspondence address: bogachkov@mail.ru

For citations

Bogachkov I. V. Determination of optical fiber varieties and early diagnosis of their physical condition based on the analysis of Mandelstam — Brillouin backscatter parameters // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 107–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-107-116.

Received December 11, 2023.

© I. V. Bogachkov