

УДК 681.586.5

# Применение волоконно-оптических датчиков на основе макроизгиба в системах мониторинга безопасности объектов

**А.О. ЗЕНЕВИЧ,**  
доктор технических наук, профессор, ректор

**Е.В. НОВИКОВ,**  
кандидат технических наук, доцент, директор Института современных технологий связи

**О. М. СОЛИЕВ,**  
кандидат физико-математических наук, декан

**С.В. ЖДАНОВИЧ**  
кандидат технических наук, доцент, заведующий отраслевой лабораторией

**Т.М. ЛУКАШИК,**  
преподаватель

**Г.В. ВАСИЛЕВСКИЙ,**  
научный сотрудник

**А.А. ЛАГУТИК,**  
младший научный сотрудник

Белорусская государственная академия связи

Исследована возможность применения волоконно-оптических датчиков на основе макроизгиба для создания систем мониторинга безопасности объектов. Предложена методика, позволяющая при разработке системы диагностики объектов определять количество датчиков, их характеристики и местоположение на оптическом волокне в зависимости от длины волны оптического излучения и параметров применяемого для обнаружения срабатывания датчиков рефлектометра.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический датчик, макроизгиб, система мониторинга безопасности объектов.

**Введение.** В настоящее время все более часто при создании систем мониторинга безопасности объектов в качестве датчиков находят применение оптические волокна. Это связано с тем, что они обладают рядом преимуществ перед электрическими датчиками: электробезопасность; невосприимчивость к электромагнитным воздействиям; возможность использования в сочетании с теми оптическими волокнами, по которым осуществляется передача данных о состоянии контролируемого объекта.

Для создания таких датчиков можно использовать промышленно изготавливаемые оптические волокна, которые производятся в широком ассортименте, что позволяет значительно уменьшить стоимость систем мониторинга безопасности объектов.

Пример создания достаточно простого в реализации датчика для систем мониторинга безопасности объекта на основе макроизгиба оптического волокна представлен в работе [3]. При использовании таких датчиков их можно подключить к одному оптическому волокну. Однако в настоящее время отсутствует методика, позволяющая определять максимальное количество датчиков с одинаковыми параметрами макроизгибов, которое можно подключить к оптическому волокну с возможностью диагностики их состояния устройствами с

заданными характеристиками. Разработка такой методики является целью проводимых исследований.

**Экспериментальная установка и методика исследования.** В качестве объектов исследования использовались оптические одномодовые волокна G652, G655 и G657. Данные волокна были выбраны в качестве объектов исследования как широко применяемые для передачи данных. Структурная схема установки, на которой выполнялись исследования, представлена на рис. 1. В данной установке были использованы серийно выпускаемые оптические рефлектометры МТР 6000, FX 300 и оптический тестер ОТ-3-1.

Установка работает следующим образом. Оптический коммутатор К1 подключает к оптическому волокну ОВ рефлектометр Р. Во время измерений рефлектограмм коммутатор К2 отключает приемник оптического излучения П от оптического волокна ОВ. Это необходимо, чтобы оптические импульсы, сформированные рефлектометром Р, не попадали на вход приемника оптического излучения П, что может привести к выходу его из строя.

Рефлектометр Р регистрирует рефлектограммы оптического волокна ОВ при отсутствии и наличии макроизгибов, созданных формирователем Ф.

Рефлектограммы представляют собой зависимость затухания оптического излучения в оптическом

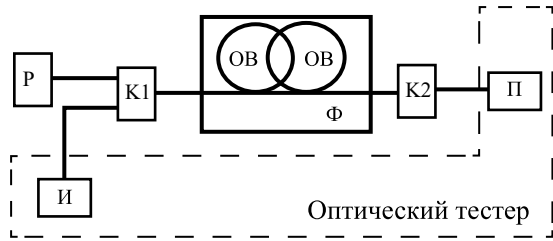


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки  
 Р – оптический рефлектометр; К1 и К2 – оптические коммутаторы;  
 Ф – формирователь макроизгибов; И – источник оптического излучения;  
 П – приемник оптического излучения, ОВ – оптическое волокно

волокне  $\alpha_p(l)$  от расстояния  $l$  от начала оптического волокна. Величина  $\alpha_p(l)$  является отрицательной и определяется по формуле:

$$\alpha_p(l) = 10 \lg \left( \frac{P_l}{P_0} \right),$$

где  $P_0$  – мощность оптического излучения на входе оптического волокна,  $P_l$  – мощность оптического излучения на расстоянии  $l$  от начала оптического волокна.

Рефлектометром Р проводились измерения рефлектограмм на следующих длинах волн оптического излучения: 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. Данные длины волн соответствовали окнам прозрачности исследуемых оптических волокон. При этом длительность оптических импульсов могла быть задана одним из следующих значений: 3, 10 и 1000 нс.

После окончания измерения рефлектограмм при помощи коммутатора К1 рефлектометр Р отключался от оптического волокна ОВ и к нему подключался источник оптического излучения. Одновременно с этим коммутатором К2 осуществлялось подключение приемника оптического излучения П к оптическому волокну ОВ. В этом случае на тех же длинах волн, на которых рефлектометром Р выполнялись измерения рефлектограмм, выполнялось измерение коэффициента затухания оптического волокна ОВ при наличии и отсутствии макроизгибов, созданных формирователем Ф.

Для определения величины затухания в оптическом волокне  $\alpha$  использовался оптический тестер. Он включает в себя источник оптического излучения И, а также приемник оптического излучения П (рис. 1). Затухание определялось по следующей формуле:

$$\alpha = 10 \lg \left( \frac{P_0}{P} \right),$$

где  $P_0$  – мощность оптического излучения на входе оптического волокна,  $P$  – мощность оптического излучения на выходе оптического волокна.

При помощи формирователя Ф создавались макроизгибы оптического волокна с радиусом в диапазоне от 2,5 до 30,0 мм. Формирователь Ф позволял создавать от одного до нескольких макроизгибов одинакового радиуса в виде дуг окружности. Длина дуги

окружности могла принимать следующие значения: полная окружность, половина и четверть окружности.

При проведении измерений использовался отрезок оптического волокна длиной  $L = 1,6$  км. Все измерения проводились при комнатной температуре  $T = 293$  К.

По рефлектограммам определялось минимальное расстояние  $\Delta L$ , при котором можно было различить между собой два ближайших макроизгиба с учетом длины мертвой зоны по затуханию. Также определялась сумма длин мертвых зон в начале и конце рефлектограммы  $L_m$ . Методики определения длин мертвых зон приведены в работе [4]. На основании этих величин определяют максимальное количество датчиков  $N$ , которые можно подключить к оптическому волокну, по формуле:

$$N = \frac{L - L_m}{\Delta L}. \quad (1)$$

На основании величины динамического диапазона рефлектометра  $D$  и определенного по формуле (1) значения количества датчиков  $N$  находят затухание оптического излучения  $\alpha_m$ , приходящееся на один макроизгиб:

$$\alpha_m = \frac{D}{N} = \frac{D \Delta L}{L - L_m}. \quad (2)$$

Полученное значение  $\alpha_m$  сравнивают с минимальной величиной затухания на одном макроизгибе  $\alpha_0$ , которое позволяет выявить рефлектометр. Если  $\alpha_m \geq \alpha_0$ , то считается, что на одном волокне можно разместить  $N$  датчиков. В случае если  $\alpha_m < \alpha_0$ , то для определения количества датчиков необходимо воспользоваться следующим отношением:

$$N = \frac{D}{\alpha_0}. \quad (3)$$

Подбирают радиус дуги макроизгиба, для которой  $\alpha_m = \alpha_0$ .

Подбор радиуса дуги макроизгиба с необходимой величиной затухания можно осуществить, основываясь на зависимости затухания оптического излучения  $\alpha$  от радиуса макроизгиба оптического волокна  $R$  для одного полного макроизгиба (окружности). Аналогичным образом это можно сделать по зависимостям для половины или четверти дуги окружности. Таким образом можно определить радиус макроизгиба для волоконно-оптического датчика.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** На рис. 2 представлен фрагмент рефлектограммы, на которой наблюдаются восемь «ступенек», образованных восемью макроизгибами оптического волокна, каждый из которых представлял собой один полный виток (окружность). Исследуемые

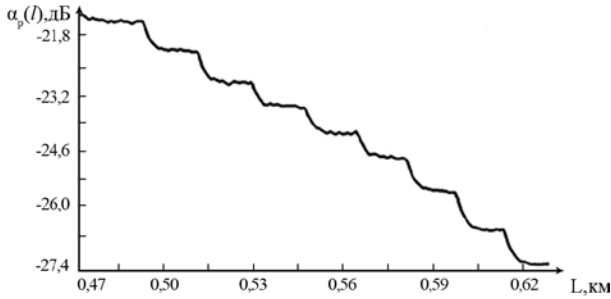


Рисунок 2 – Фрагмент рефлектограммы для оптического волокна G655 с макроизгибами

макроизгибы располагались на расстоянии около 0,5 км от начала оптического волокна.

Представленная на рис. 2 рефлектограмма получена для длины волны оптического излучения 1310 нм и радиуса витков 11,2 мм. Как видно из рис. 2, затухание  $\alpha_m$  оптического излучения на одном макроизгибе приблизительно постоянно и его средняя величина составляет 0,7 дБ. При этом разброс  $\alpha_m$  не превышал 0,2 дБ, что составляло 30 % от среднего значения. Макроизгибы находились на расстоянии 15 м друг от друга. Минимальное расстояние между макроизгибами, которое удалось различить на рефлектограмме, составляло  $\Delta L = 6$  м и наблюдалось для длительности оптического импульса рефлектометра  $\tau = 3$  нс. При меньших расстояниях все ступеньки сливаются в одну. Увеличение длительности оптических импульсов рефлектометра приводило к росту величины  $\Delta L$ . Так, для значений  $\tau = 10$  нс минимальное расстояние между макроизгибами составляло 11 м, поэтому далее в исследованиях нами использовалась длительность оптического импульса 3 нс. Проведенные исследования затухания оптического излучения на макроизгибах волокна показали, что для используемых рефлектометров величина  $\alpha_0 = 0,1$  дБ.

В таблице представлены значения длин волн, мертвых зон, динамического диапазона рефлектометра для длительности оптического импульса 3 нс, а также количества датчиков, которые можно установить на оптическое волокно длиной  $L = 1,6$  км.

Как видно из представленных в таблице данных, величина динамического диапазона рефлектометра может отличаться для различных длин волн оптического излучения. Однако для исследуемых длин волн отличие значений динамического диапазона составило не более 2 дБ, что связано в основном

с погрешностью метода, используемого для определения динамического диапазона [4]. По нашим оценкам, относительная погрешность этого метода не превышает 12 %. Увеличение длительности оптического импульса приводит к расширению динамического диапазона. Так, при  $\tau = 1000$  нс динамический диапазон принимает значения  $41 \div 43$  дБ для исследуемых длин волн оптического излучения. Однако, как было отмечено выше, увеличение величины  $\tau$  приводит к росту значения  $\Delta L$ .

Необходимо отметить, что для длительности оптического импульса рефлектометра  $\tau = 3$  нс наблюдалось наименьшее значение длины мертвых зон.

Выполненная по формуле (2) оценка затухания оптического излучения, приходящегося на один макроизгиб, для всех исследуемых длин волн показала, что  $\alpha_m \leq 0,065$  дБ. Поскольку полученные значения  $\alpha_m < \alpha_0$ , то максимальное количество датчиков для всех длин волн оптического излучения определяется по формуле (3).

Для полученных значений количества датчиков (см. таблицу) была выполнена оценка расстояния между двумя соседними датчиками при равномерном распределении их по оптическому волокну вне мертвых зон. Такое расстояние занесено в колонку таблицы «Среднее расстояние между двумя датчиками». Как видно из представленных данных, это расстояние для всех исследуемых длин волн находится в интервале от 9,3 до 10,4 м.

Увеличение длины волны оптического излучения приводило к росту значения радиуса одного полного витка макроизгиба, при котором наблюдается  $\alpha_m = \alpha_0$  для всех исследуемых оптических волокон (см. таблицу). Отметим, что причины, приводящие к появлению такой зависимости, описаны в работе [5]. Также для одной и той же длины волны оптического излучения радиусы макроизгиба, при котором  $\alpha_m = \alpha_0$ , отличались для различных оптических волокон (см. таблицу). На всех исследуемых длинах волн оптического излучения наименьшие значения радиусы макроизгибов принимали для оптического волокна G657, а наибольшие – для оптического волокна G655. Такое отличие связано с тем, что данные волокна имеют различную внутреннюю структуру и, следовательно, различную восприимчивость к макроизгибу. Под восприимчивостью

Таблица – Характеристики рефлектометра и волоконно-оптических датчиков

Длина волны оптического излучения, нм	Динамический диапазон, дБ	Сумма длин мертвых зон $\Delta L$ , м	Максимальное количество датчиков	Среднее расстояние между двумя датчиками, м	Оптическое волокно		
					G652	G655	G657
					Радиус одного полного витка макроизгиба, мм		
1310	15,4	6,1	154	10,4	8,5	12,5	6,8
1490	17,1		171	9,3	9,2	13,2	7,3
1550	16,1		161	9,9	11,1	14,5	8,5
1625	15,4		154	10,4	12,0	15,8	10,2

понимается зависимость  $\alpha_m$  от радиуса и длины дуги макроизгиба оптического волокна.

Для создания датчиков применяется не только полный виток оптического волокна, но и дуги, соответствующие половине или четверти длины дуги витка. Поэтому на рис. 3 представлены зависимости величины затухания мощности оптического излучения от радиуса макроизгиба оптического волокна для случаев одного полного витка макроизгиба, половины и четверти витка. Данные зависимости были получены для оптического волокна G655 и длины волны оптического излучения 1310 нм. Для

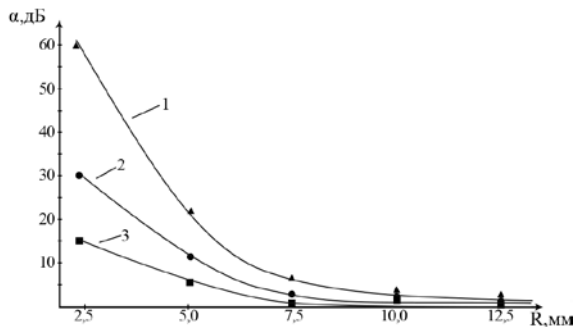


Рисунок 3 – Типичная зависимость затухания мощности оптического излучения от радиуса макроизгиба 1 – одного полного витка макроизгиба; 2 – половины витка; 3 – четверти витка

других длин волн и типов оптических волокон такие зависимости были аналогичными.

Как видно из представленных на рис. 3 зависимостей, уменьшение радиуса макроизгиба приводит к увеличению  $\alpha$ . Также к уменьшению затухания при одинаковом радиусе макроизгиба приводит уменьшение длины дуги макроизгиба. Так, для полного витка макроизгиба наблюдается наибольшее значение коэффициента затухания мощности оптического излучения, а для четверти витка – наименьшее. Отметим, что при значениях  $R \geq 11,0$  мм половиной или четвертью витка макроизгиба дополнительное затухание не вносится. Для этого случая  $\alpha_m \approx 0$  для всех исследуемых волокон.

Для исследуемых оптических волокон зависимости между длиной дуги макроизгиба и  $\alpha$  при постоянном значении R были близки к линейным. Наиболее близкой к линейной является зависимость, наблюдаемая для оптического волокна G655. Для этого волокна при длине волны оптического излучения 1310 нм и  $R = 5,0$  мм значения затухания были следующими:  $\alpha_m = 24$  дБ для полного витка макроизгиба;  $\alpha_m = 12$  дБ для половины витка макроизгиба;  $\alpha_m = 6$  дБ для четверти витка макроизгиба.

**Заключение.** Предложена методика, позволяющая при разработке системы мониторинга безопасности объектов определять количество датчиков, их характеристики и местоположение на оптическом

волокне в зависимости от длины волны оптического излучения и параметров применяемого для обнаружения срабатывания датчиков рефлектометра.

Получено, что минимальное расстояние между двумя макроизгибами оптического волокна, которое удалось различить на рефлектограмме при длительности оптического импульса рефлектометра 3 нс, составляет 6 м.

Установлено, что зависимости между длиной дуги макроизгиба и коэффициентом затухания оптического волокна при постоянном значении радиуса макроизгиба близки к линейным.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по договору Т20М-082 «Однофотонные источники оптического излучения для квантовых криптографических систем».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волоконно-оптическая система охранной сигнализации: пат. 2311687 Российская Федерация, МПК G08B 13/186 / В.А. Яцев; заявл. 27.11.2004; опубл. 27.11.2007 // Официальный бюллетень / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации. – 2007. – № 33. – С. 8.
2. Куликов, А.В. Обзор волоконно-оптических систем охраны периметра / А.В. Куликов, А.В. Игнатъев // Алгоритмы безопасности. – № 4. – 2010. – С. 56–61.
3. Зеневич, А.О. Датчик обнаружения проникновения на основе макроизгиба одномодового оптического волокна / А.О. Зеневич, Т.М. Лукашик, Е.В. Новиков, С.В. Жданович, Г.В. Василевский, А.А. Лагуттик // Веснік сувязі. – № 1(159). – 2020. – С. 56–59.
4. Листвин, А.В. Рефлектометрия оптических волокон / А.В. Листвин, В.Н. Листвин. – М.: ЛЕСА-Рарт, 2005. – 208 с.
5. Василевский, Г.В. Исследование характеристик отраженного излучения в оптическом волокне как основы для создания волоконно-оптических датчиков / Г.В. Василевский, А.О. Зеневич, А.А. Лагуттик, Т.М. Лукашик, Е.В. Новиков // Зв'язок. – № 1. – 2019. – С. 40–44.

*Studies have been carried out on the possibility of using fiber-optic sensors based on a macrobend to create safety monitoring systems for objects. A technique is proposed that allows one to determine the number of sensors with their characteristics and location on the optical fiber when developing a system for diagnosing objects depending on the wavelength of optical radiation and the parameters used by the OTDR to detect sensor operation.*

Получено 25.07.2020.