УДК 621.373.826:315.61 004.056.53
DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.08

И.В. Денисов, Н.В. Лисовский

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К ИЗГИБУ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Представлены результаты системного анализа существующих рекомендаций по волоконным световодам. Проведена систематизация физических параметров и эксплуатационных характеристик стандартизированных волоконных световодов. Выделены четыре информативных параметра для оценки влияния изгибов волоконных световодов на качество ВОЛС и волоконно-оптические датчики. Цель работы – систематизация рекомендаций МСЭ-Т и МЭК, а также оценка влияния изгибов на рассмотренные типы волоконных световодов с точки зрения качества линий связи и волоконно-оптических датчиков физических величин.

Ключевые слова: стандарт МСЭ-Т, стандарт МЭК, волоконно-оптические линии связи, волоконный световод, изгибы волокна, волоконно-оптические датчики.

I.V. Denisov, N.V. Lisovsky

I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

THE SYSTEMATIZATION OF BENDING-SENSITIVE FIBER LIGHT GUIDES

The results of systematic analysis of existing recommendations on fiber light guides. The systematization of physical parameters and operational characteristics of standardized fiber light guides has been carried out. Four informative parameters have been identified to assess the effect of fiber bends on the quality of fiber optic sensors. The purpose of the work is systematization of the ITU–T and IEC recommendations, as well as to assess the influence of bends on the fiber types in terms of the quality of communication lines and fiber-optic sensors of physical quantities.

Keywords: optical fiber, fiber-optical communication lines, macrobending, bending radius, ITU-T, information capture efficiency, fiber-optic sensors.

Актуальность темы

Самой эффективной и быстроразвивающейся средой передачи данных являются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Локальные вычислительные сети (ЛВС), построенные на ВОЛС, имеют неоспоримые преимущества по скорости, плотности и расстояниям передачи информации перед медными и радиоканальными линиями связи. Эти преимущества определяются физическими возможностями

волоконных световодов (ВС), которые являются их основой. Преимущества ВОЛС мотивируют разработку новых кабельных структур с улучшенными эксплуатационными характеристиками и последующим внедрением их в повседневную жизнь. В настоящий момент на телекоммуникационном рынке присутствует множество ВС с различными физическими характеристиками, определяющими их широкие эксплуатационные возможности. В связи с таким многообразием возникла необходимость стандартизации и классификации ВС, которая необходима проектировщикам, поставщикам и потребителям кабельных инфраструктур для подбора совместимого оборудования и определения рамок модернизации оборудования и разработки новых кабельных продуктов. После введения сектора стандартизации Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) с 1984 г. начали разрабатываться рекомендации для создаваемых ВС (первый – для G.652.A, а последний введен в 2020 г. году для G.654.E).

Стандарты вводятся для основных параметров ВС, благодаря чему телекоммуникационному оборудованию гарантируется взаимная совместимость, а производителям ВС и волоконно-оптических кабелей (ВОК) на их основе определяются рамки для модернизации оборудования и разработки новых кабельных продуктов. Однако МСЭ-Т – не единственная организация, которая классифицирует ВС по их назначению и характеристикам. Есть стандарт IEC 60793, разработанный Международной электротехнической комиссией (МЭК), или на английском: International Electrotechnical Commission (IEC). Русский действующий аналог с подобными параметрами – ГОСТ Р МЭК 60793.

При всем таком разнообразии стандартов ВС не все параметры в них пересекаются и транслируются из одного в другой. Более того, как выяснилось в результате поиска и системного анализа информации по ВС и ВОК, они не систематизированы вместе.

С учетом того, что настоящей задачей является выделение информативных признаков, значимых для распространения оптического излучения в ВС, а также оценки потенциальных возможностей кабельной продукции по мощности оптического излучения при изгибах для его учета при разработке различных устройств фотоники, основанных на изгибных эффектах в ВС, важно понимать: каким образом необходимо нормировать параметры, используемые МСЭ-Т и МЭК, и каких значений в них недостает для понимания возможностей

ВОК. К указанным устройствам можно отнести две крайние группы. Первая – это волоконно-оптические датчики физических величин, в принципе действия которых используются модовые потери оптического излучения в ВС при его макро- или микроизгибах [1]. Вторая – ВОЛС, в которых, наоборот, стремятся минимизировать потери на изгибах ВС [2]. В обеих группах, в зависимости от задач, могут применяться как одномодовые, так и многомодовые ВС.

Таким образом видно, что анализ всех стандартов ВС и систематизация рекомендаций для них по параметрам, связанным с изгибами ВС для всех стандартов, являются актуальной задачей, решаемой в настоящей статье.

1. Нормировка стандартов ВС

При всем разнообразии стандартов ВС не все параметры в них пересекаются и транслируются из одного в другой. Более того, как выяснилось в результате поиска и анализа информации по ВС и ВОК, они не систематизированы вместе. С учетом того, что настоящей задачей является выделение информативных признаков, значимых для создания устройств фотоники на основе влияния изгибов на оптическое излучение в ВС, важно понимать, по каким параметрам необходимо их нормировать и каких значений в них недостает.

В первой рекомендации МСЭ-Т G.651.1 ВС являются многомодовыми, а все остальные ВС, представленные в табл. 1, – одномодовые.

Таблица 1

Классификация ВС в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т*

№ п/п	Наименование категории ВС	ВС с диаметром сердцевины	Применение
1	2	3	4
1	G.651.1	50 мкм с градиентным профилем показателя преломления	Для широкополосного доступа в сетях зданий
2	G.652 (A, B, C, D)	8,6 – 9,5 мкм на длину волны 1310 нм со ступенчатым профилем показателя преломления и несмещенной дисперсией	LAN и MAN, сети доступа и передача при мультиплексировании CWDM
3	G.653 (A, B)	7,8 – 8,5 мкм с длиной волны нулевой дисперсии, смещенной в область 1550 нм, и со специально заданным распределением показателя преломления	Системы передачи на большие расстояния с использованием волоконно-оптических усилителей на основе эрбия (EDFA)

Окончание табл. 1

1	2	3	4
4	G.654 (A, B, C, D, E)	9,5 – 15 мкм с длиной волны нулевой дисперсии около 1310 нм и со смещением отсечки в 1550 нм	Подводные системы с более высокой пропускной способностью
5	G.655 (A, B, C, D, E)	NZDSF 8 – 11 мкм, оптимизировано для 1530–1565 нм с поддержкой до 1652 и 1460 нм	Системы дальней связи, использующие плотную передачу данных (DWDM)
6	G.656	7,0 – 11,0 мкм с ненулевой дисперсией и положительным коэффициентом хроматической дисперсии в диапазоне длин волн 1460–1625 нм	Системы дальней связи, использующие передачу CWDM и DWDM в указанном диапазоне длин волн
7	G.657 (A1, A2, B2, B3)	8,6 – 9,2 мкм с уменьшенными потерями при малых радиусах изгиба	Волоконно-оптические сети до границы жилой площади (FTTH)

*Примечание. В табл. 1 применены следующие сокращения:

локальные сети – Local Area Network (LAN);

городская вычислительная сеть – Metropolitan Area Network (MAN);

системы с разносом более 2,5 *ТГц* – Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM);

волоконно-оптический усилитель на основе эрбия – Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA);

плотное волновое мультиплексирование – Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM);

ВС с ненулевой смещенной дисперсией – Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber (NZDSF);

волоконно-оптические сети – Fiber To The Home (FTTH).

Российский стандарт ГОСТ Р МЭК 60793 в связи с обширностью информации разделен на несколько частей подобно тому, как это сделано в стандарте IEC 60793. Первая часть описывает методы испытаний ВС, вторая – различные его типы. Каждая из частей, в свою очередь, тоже поделена на несколько документов. В результате вид ссылки на отдельный документ стандарта выглядит, например, как IEC 60793-2-60.

В ходе анализа классификационных признаков выявлено, что МСЭ-Т и МЭК в своих данных ссылаются на одни и те же ВС, имеющие одинаковые характеристики, но разные названия. С целью

избегания плеоназма в табл. 2 впервые системно приведено соответствие рекомендаций МСЭ-Т и стандарта IEC 60793 для всех существующих на настоящий момент 22 типов ВС. В качестве общей нормировочной характеристики для сравнительного анализа ВС удобно использовать общий у всех параметр – диаметр модового поля MFD (Mode Field Diameter). Он определяется как часть ВС в поперечном срезе, где передаётся большая часть энергии оптического излучения на определенной длине волны λ. Указанные для ВС длины волн рекомендуются как основные несущие, но не являются ограничивающими. MFD и другие параметры ВС имеют особенности, рассматриваемые ниже. Для понимания волноводных особенностей рассматриваемых ВС следует учитывать соответствующую информацию из табл. 1.

Таблица 2

Таблица соответствия рекомендаций стандартов МСЭ-Т и МЭК

<table>
<tr><th rowspan="2">№ п/п</th><th colspan="2">Тип стандарта</th><th>MFD, мкм</th><th>MFD, мкм</th><th rowspan="2">Рекомендуемая длина волны (nm)</th></tr>
<tr><th>МСЭ-Т</th><th>МЭК</th><th>min</th><th>max</th></tr>
<tr><td>1</td><td>G.651.1</td><td>A1a</td><td>47,5</td><td>52,5</td><td>850</td></tr>
<tr><td>2</td><td>G.652.A</td><td rowspan="2">B1.1</td><td rowspan="4">8,6</td><td rowspan="3">9,5</td><td rowspan="4">1310</td></tr>
<tr><td>3</td><td>G.652.B</td></tr>
<tr><td>4</td><td>G.652.C</td><td rowspan="2">B1.3</td></tr>
<tr><td>5</td><td>G.652.D</td><td>9,2</td></tr>
<tr><td>6</td><td>G.653.A</td><td>B2_a</td><td rowspan="2">7,8</td><td rowspan="2">8,5</td><td rowspan="13">1550</td></tr>
<tr><td>7</td><td>G.653.B</td><td>B2_b</td></tr>
<tr><td>8</td><td>G.654.A</td><td>–</td><td rowspan="3">9,5</td><td>10,5</td></tr>
<tr><td>9</td><td>G.654.B</td><td>B1.2_b</td><td>13,0</td></tr>
<tr><td>10</td><td>G.654.C</td><td>B1.2_c</td><td>10,5</td></tr>
<tr><td>11</td><td>G.654.D</td><td>B1.2_d</td><td rowspan="2">11,5</td><td>15,0</td></tr>
<tr><td>12</td><td>G.654.E</td><td>B1.2_e</td><td>12,5</td></tr>
<tr><td>13</td><td>G.655.A</td><td>–</td><td rowspan="5">8,0</td><td rowspan="6">11,0</td></tr>
<tr><td>14</td><td>G.655.B</td><td>–</td></tr>
<tr><td>15</td><td>G.655.C</td><td>B4_c</td></tr>
<tr><td>16</td><td>G.655.D</td><td>B4_d</td></tr>
<tr><td>17</td><td>G.655.E</td><td>B4_e</td></tr>
<tr><td>18</td><td>G.656</td><td>B5</td><td>7,0</td></tr>
<tr><td>19</td><td>G.657.A1</td><td>B6_a1</td><td rowspan="2">8,6</td><td rowspan="2">9,2</td><td rowspan="4">1310</td></tr>
<tr><td>20</td><td>G.657.A2</td><td>B6_a2</td></tr>
<tr><td>21</td><td>G.657.B2</td><td>B6_b2</td><td rowspan="2">6,3</td><td rowspan="2">9,5</td></tr>
<tr><td>22</td><td>G.657.B3</td><td>B6_b3</td></tr>
</table>

При сходстве этих стандартов отличие в классификации ВС всё-таки есть. Оно касается многомодового ВС с диаметром сердцевины 62,5 мкм типа A1b стандарта IEC 60793-2-60. Эквивалента ему в рекомендациях МСЭ-Т нет, и поэтому в табл. 2 он не приведен. Еще одно замечание касается того, что производители ВС на самом деле выпускают кабельную продукцию лучшего качества, чем регламентируют указанные выше рекомендации. Так, рекомендация МСЭ-Т G.652 ограничивает коэффициент затухания ВС на длине волны 1310 нм в 0,4 дБ/км, а, например, ВС SMF-28e+™ фирмы Corning, которое относится к этой группе, имеет затухание в 0,33 – 0,35 дБ/км. Это относится и к ВС, производимым российскими предприятиями, например, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

Так как при изготовлении кабельной продукции производители более часто используют маркировку МСЭ-Т, то для сравнительного анализа характеристик и параметров ВС целесообразно использовать названия ВС согласно этим рекомендациям. В настоящей работе такой анализ производится с целью выделения паспортных параметров ВС, которые определяют оценки влияния изгибов на соответствующие устройства фотоники.

2. Группы ВС по различиям ВОЛС

Все назначения и сферы применения ВС по приведенным стандартам относительно ВОЛС можно разделить на две основные группы:

– ВОЛС для протяженных участков ЛВС;

– объектовые ЛВС на основе ВОЛС.

Для оценки влияния изгибов на уровень мощности оптического излучения в ВОЛС первой группы следует учитывать то, что в большинстве своём они оснащены системами мониторинга. Современные системы мониторинга ЛВС на основе ВОЛС позволяют обнаружить малейшие изменения состояния канала связи в линиях на любых расстояниях. Однако все импульсные рефлектометры OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), которые лежат в основе систем мониторинга широкого пользования, имеют несколько «слабых» мест в своей работе, большинство из которых решается частотными

(когерентными) рефлектометрами OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometer).

В любом случае система мониторинга позволяет сделать оценки изменений, происходящих в ВС контролируемых ВОЛС. Несложно догадаться, что эти изменения лежат в области погрешностей измерения затухания и длины для каждого параметра рефлектограммы.

В системе мониторинга для этого задаются допускаемые значения абсолютных величин этих погрешностей либо для изменения по сравнению с базовой рефлектограммой – пороговые значения (обычно три уровня) [3]. Анализ этих параметров и их погрешностей привел к выводу, что две из этих погрешностей определяют искомые критерии влияния изгибов на ВС:

1) максимальная погрешность измерения расстояния L, м, с дискретностью отсчетов d, определяемая по формуле:

$$\Delta L = \pm(0,5 + d + 3 \cdot 10^{(-5)} \cdot L), \tag{1}$$

2) максимальная погрешность измерения затухания α, дБ, которая определяется выражением:

$$\Delta\alpha = \pm\left(0,04 \cdot \alpha + 0,05\right). \tag{2}$$

Численные коэффициенты выражений (1) и (2) определены стандартом [3], который устанавливает типовые технические решения по организации систем мониторинга состояния ВОЛС и методики измерений параметров.

Из формулы (1) для регламентированных d = 0,16…15 м на длине волны 1550 нм следует, что первый параметр оценки влияния изгибов на мощность оптического излучения в ВС лежит в следующем диапазоне:

$$0,66 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot L < \Delta L < 15,5 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot L. \tag{3}$$

Таким образом, формула (2) определяет границу изменения затухания на ВС, а формула (3) дает границы искажения расстояния в его рефлектограмме.

Для объектовых ЛВС на основе ВОЛС ситуация по изгибам обстоит иначе. В большинстве своём объектовые сети ВОЛС 2-, 3- и 4-й категорий не имеют аппаратных средств мониторинга. Это связано с особенностью расположения пользователей сети в соответствии с

топологиями «звезда», «дерево» или гибридными сложными топологиями.

Отсюда следует, что круг рассматриваемых задач по влиянию изгибов на излучение в ВОЛС фокусируется главным образом на ВС, эксплуатируемых в системах связи с протяженными участками ЛВС.

3. Анализ ВС по эксплуатационным особенностям

Для более детального определения назначения ВС необходимо провести анализ их эксплуатационных характеристик. В связи большим распространением стандарта МСЭ-Т используется его терминология.

На рис. 1 и 2 пунктирные линии показывают рабочие диапазоны скоростей (см. рис. 1) и дальности (см. рис. 2) передачи информации для различных категорий ВС, а штриховые и сплошные линии ограничивают их верхние и нижние границы соответственно. Анализ рис. 1 и 2 позволяет сделать следующие выводы.

а) ВС стандартов G.652.D и G.654.E имеют скорость передачи до 100 Гбит/с, поэтому их нецелесообразно использовать для объектовых ЛВС, и все телекоммуникационные организации применяют их на дальние расстояния до 3000 км с оптическими усилителями;

б) ВС стандарта G.651.1 являются универсальными по скорости, а значит, такие ВС будут работать практически с любым оконечным оборудованием, но на короткие ВОЛС (до 600 м) объектовых ЛВС;

в) из одномодовых ВС стандарт G.657.B3 имеет самый узкий диапазон дистанций передачи информации (до 40 км), что с учетом скорости передачи от 10 до 40 Гбит/с определяет область построения ЛВС на его основе ВОЛС без ретрансляторов;

г) ВС остальных стандартов имеют одинаковые возможности по скорости передачи информации, но различные расстояния, что позволяет их разделить на две условные группы: шесть стандартов ВС с ограничениями по дальности (G.652.A, C; G.653.A; G.654.A; G.655.A, B) и 14 остальных, имеющих максимально регламентированное расстояние в 3000 км;

д) с учетом формулы (3) и того факта, что длина трасс без усилителей не превышает 50 км, следуют граничные значения для искажений расстояния в рефлектограмме вследствие изгибов ВС от 0,68 до 17 м.

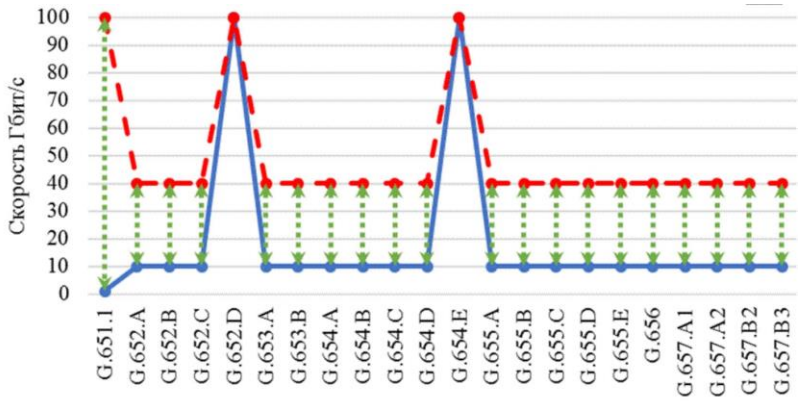

Рис. 1. Скорости передачи информации по категориям ВС:
– минимальное расстояние; – максимальное расстояние

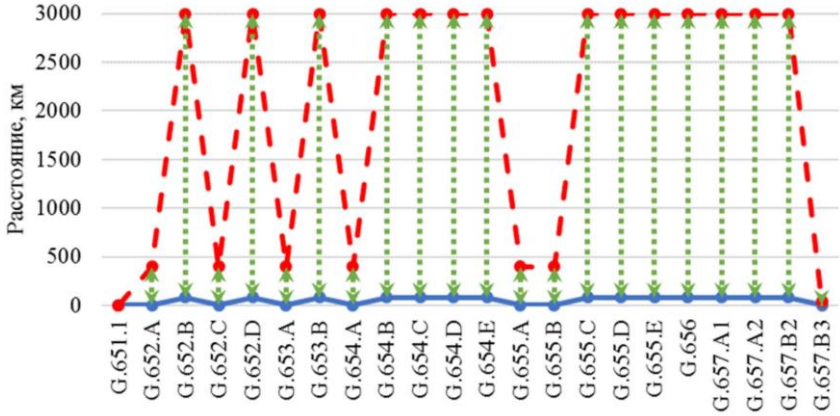

Рис. 2. Дальности передачи информации по ВОЛС для категорий ВС:
– минимальное расстояние; – максимальное расстояние

Выводы последних двух пунктов выделяют ВС стандарта G.651.1 в наиболее уязвимые для изгибов на объектовых ЛВС. ВС стандартов G.652.A, C; G.653.A; G.654.A; G.655.A, B и G.657.B3 имеют ограничения по дальности и могут быть как на объектовых ЛВС, так и на ВОЛС для протяженных участков ЛВС до 400 км. ВС остальных 16 стандартов применяются Ростелекомом на особо протяженных ВОЛС.

4. Анализ ВС по погонному затуханию

Вторым параметром ВС, важным для оценки влияния изгибов на оптическое излучение в них, является их собственное погонное

затухание. Оно определяется величиной затухания мощности оптического сигнала на одном километре ВС, дБ/км. Все ВС имеют различные значения погонного затухания в зависимости от длин волн, которые стандартизированы в диапазоне $\lambda = 850\ldots1625$ нм. Причем нет ни одной длины волны, для которой бы во всех стандартах были бы приведены затухания, а также нет ни одного стандарта, для которого были бы приведены затухания на всех регламентированных длинах волн (850, 1310, 1550 и 1625 нм). Более того, в современных ВС и в первых стандартах ВС используются разные материалы и эффекты.

Этот хаос приводит к неадекватной оценке и сложности сравнения всех стандартов между собой.

Для того чтобы привести все стандарты под некоторый общий знаменатель была выбрана наиболее широко представленная длина волны 1550 нм (для восьми стандартов), ниже которой не работают современные системы мониторинга. Для остальных стандартов ВС, которые не имеют регламентированных затуханий, были проведены дополнительные расчеты с помощью моделирования спектрального затухания [4]. В соответствии с ним коэффициент затухания в ВС, распределенный по спектру длин волн, можно рассчитать с помощью характеристической матрицы **M** и вектору **v** по формуле:

$$\mathbf{w} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{v}. \tag{4}$$

Вектор ***v*** содержит измеренные коэффициенты затухания для одной из длин волн (например, 1310 нм), а матрица **M** определяется на статистической основе [4]. Если оценка получена с использованием конкретной матрицы производителя **M**, то никакой корректирующий вектор **e** не требуется. Если она не известна, то производитель ВС предоставляет вектор поправочных коэффициентов, так что прогнозируемое значение затухания принимает поправку: $\mathbf{W} = \mathbf{w} + \mathbf{e}$.

По этому методу были рассчитаны коэффициенты затуханий для остальных 14 стандартов ВС, сведенных с остальными стандартами на гистограмме, представленной на рис. 3. Из нее наглядно видно, что ВС пяти стандартов G.654 имеют самое низкое погонное затухание (0,22–0,23 дБ/км). При таком низком затухании в ВС системы мониторинга работают в более чувствительном диапазоне измерения ВОЛС, следовательно, любая вносимая потеря, характерная при изгибах, будет более ярко выражена. Погрешность определения затухания в ВС

стандартов G.654 по формуле (2) на 50 км ВОЛС (без усилителей) составляет около 2,8 дБ, что делает короткие трассы из таких ВС не критичными к изгибам.

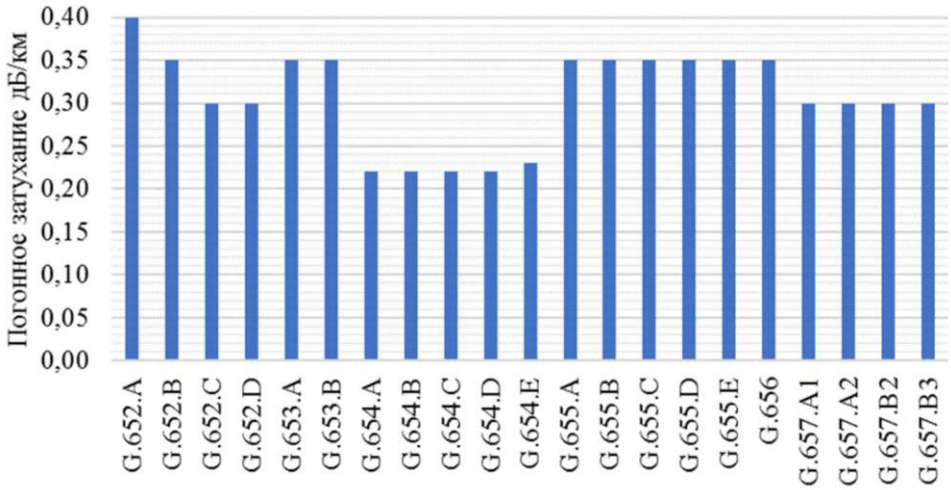

Рис. 3. Естественное затухание в ВС на один километр при длине волны 1550 нм

С другой стороны, из представленной гистограммы видно, что ВС стандартов G.652.A,B; G.653.A,B; G.655.A,B,C,D,E и G.656 имеют регламентированное затухание 0,35 дБ/км и выше. Это означает, что телекоммуникационная аппаратура для этих стандартов ВС, включая системы мониторинга состояний ВОЛС, будет настроена на высокие потери в линиях. Такое ограничение касается и устанавливаемых в соответствующих ВОЛС погрешностей, которые по формуле (2) на 50 км составляют более 3,3 дБ. Отсюда следует, что для этих ВС запас потерь ограничивает потенциально возможные вольности по изгибам при прокладке ВОЛС. Многомодовые ВС относятся сюда априори. Остальные шесть стандартов ВС по затуханию находятся на грани детектирования системами мониторинга и зависят от дальности передачи информации по ВОЛС.

Из результатов анализа по погонному затуханию видно, что ВС стандартов G.654 менее уязвимы для изгибов к ВОЛС протяженных участков ЛВС, а ВС остальных стандартов определяют внешние границы научно-технических исследований по условиям организации ВОЛС.

5. Анализ ВС по потерям при макроизгибах

Макроизгибный эффект потери оптической мощности является основным способом для разработки амплитудных волоконно-оптических датчиков, так как он наиболее простой в технической реализации. Такой способ известен благодаря ряду работ, включая [1, 5], где представлены математические модели и описания сопутствующих процессов. Однако в этих и других работах ВС рассматриваются только для примеров, оценочных расчетов или вообще не указано, на каких ВС проводились исследования. Обобщить многие выводы таких работ на выделенные выше стандарты ВС сложно или не представляется возможным. Это связано как с тем, что формирование вытекающих мод на разных ВС протекает по-разному, так и с тем, что круг стандартов предметной области исследования был не определен.

С целью объективной сравнительной оценки ВС всех стандартов на предмет макроизгибного детектирования необходимо провести анализ потенциальных потерь для предусмотренной длины волны (в настоящей работе – для обоснованной выше λ = 1550 нм). В связи с тем, что в разных стандартах приводятся результаты по испытаниям на разных радиусах изгиба (от 5 до 30 мм) и количествах витков (от 1 до 100), то были проведены дополнительные аппроксимации и нормировки указанных потерь на один оборот для одинакового максимального радиуса изгиба в 30 мм.

Правомерность этого определяется тем, что для одномодовых ВС с увеличением числа витков затухание возрастает по линейному закону, а при уменьшении радиуса изгиба оно увеличивается экспоненциально. Однако четыре стандарта G.657 для современных ВС с уменьшенными потерями на изгибах определяют эти затухания только для малых и разных радиусов изгибов в диапазоне 5 – 15 мм. Поэтому для приведения значений их затуханий к изгибу 30 мм потребовалось провести аппроксимацию зависимостей, приведенных на рис. 4. Полученные результаты ($\alpha_{G.657.A1} = 1\cdot10^{-6}$ дБ/об., $\alpha_{G.657.A2,B2} = 0{,}1\cdot10^{-6}$ дБ/об. и $\alpha_{G.657.B3} = 45\cdot10^{-6}$ дБ/об.,) были использованы для построения общей картины по потерям на макроизгибах для ВС всех стандартов (рис. 5). Кроме того, из рис. 4 можно сделать дополнительные выводы по составу ВС стандартов G.657. Первое – это одинаково высокая чувствительность к макроизгибу у ВС стандартов G.657.A1, G.657.A2

и G.657.B2, отличающаяся от чувствительности ВС стандарта G.657.B3 в два раза, причем эта закономерность обратна к закономерности изменения значений затухания этих ВС при макроизгибе на 30 мм. Второе – это возрастающая возможность согнуть ВС на меньший радиус изгиба от ВС старых стандартов (G.657.A1) к новым (G.657.B3).

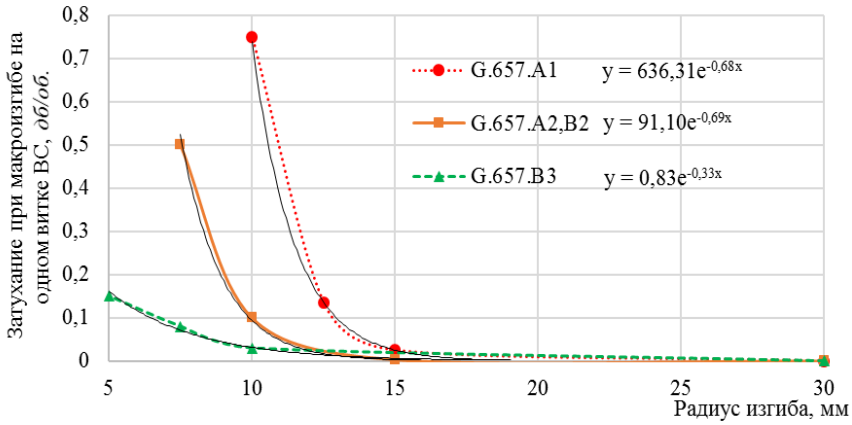

Рис. 4. Нормированное затухание на макроизгибе в ВС на длине волны 1550 нм

Представленные на рис. 5 результаты дают понимание того, что для ВС стандартов G.657 изгибы практически не влияют на потери в них, хотя при более крутых изгибах (менее 10 мм) они будут уже существенно терять мощность своего оптического излучения. Однако справедливо заметить, что эти ВС имеют очень высокую стоимость и эксплуатируются в основном в тех ВОЛС, где предполагается много вставок и изгибы уже не играют роли.

Наряду с этим из рис. 5 следует, что ВС стандартов: G.653.A; G.654.A,B,C; G.655.A,B,C; G.656 и в существенно большей степени – G.654.D (и G.651.1) наиболее уязвимы. Это обусловлено тем, что если они имеют высокие потери при макроизгибе 30 мм на одном витке, то при уменьшении радиуса и увеличении количества витков потери еще увеличатся. Следовательно, для этих ВС увеличится мощность светового потока на изгибе. При этом стоит отметить, что ВС стандартов G.654.A, B, C предназначены для создания подводных систем связи (см. табл. 1), и в связи с этим и их конструктивными особенностями (специальные материалы и броня) осуществить в них изгибы довольно

проблематично. Кроме того, этот вывод подтверждает учет того, что эти ВС имеют самое низкое погонное затухание (см. рис. 3). Отсюда следует, что круг ВС, для которых существенны изгибы, сужается до ВС стандартов G.653.A; G.654.D; G.655.A,B,C и G.656.

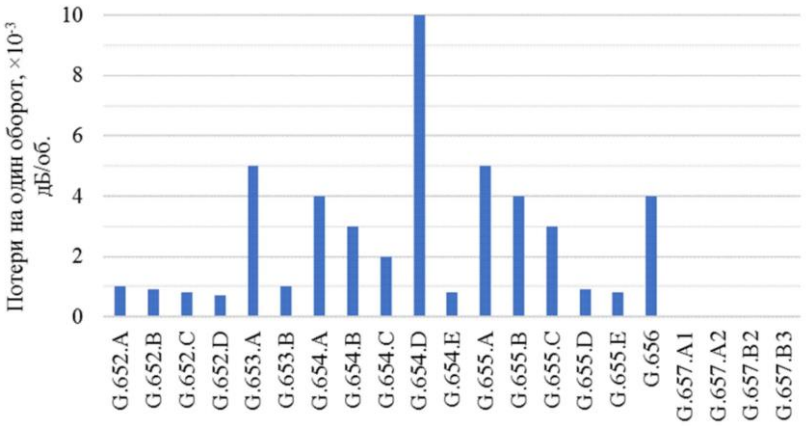

Рис. 5. Потери на макроизгибе ВС

6. Анализ ВС по диаметру модового поля

Параметр модового поля MFD характеризует физические размеры той части ВС, где передаётся большая часть энергии света: сердцевины и некоторой части оболочки. ВС с большими MFD менее чувствительны к боковым отклонениям на соединениях, но более чувствительны к потерям на изгибах волокна в кабельных муфтах и кроссах. Это связано с тем, что при большем MFD к внешней стороне изгиба смещается существенная его часть и излучение выходит через образующиеся оболочечные моды (в которые «перекачивается» энергия при таком изгибе).

Проведенный анализ параметра MFD по стандартам ВС для минимальных и максимальных значений представлен на гистограммах рис. 6, а среднее его значение показано соединяющей линией. Из этого рисунка видно, что минимальный MFD имеют ВС стандартов G.653.A,B и G.657.B2,B3, а максимальные значения, помимо G.651.1 – стандарты G.654 и G.655. Остальные принимают промежуточные значения.

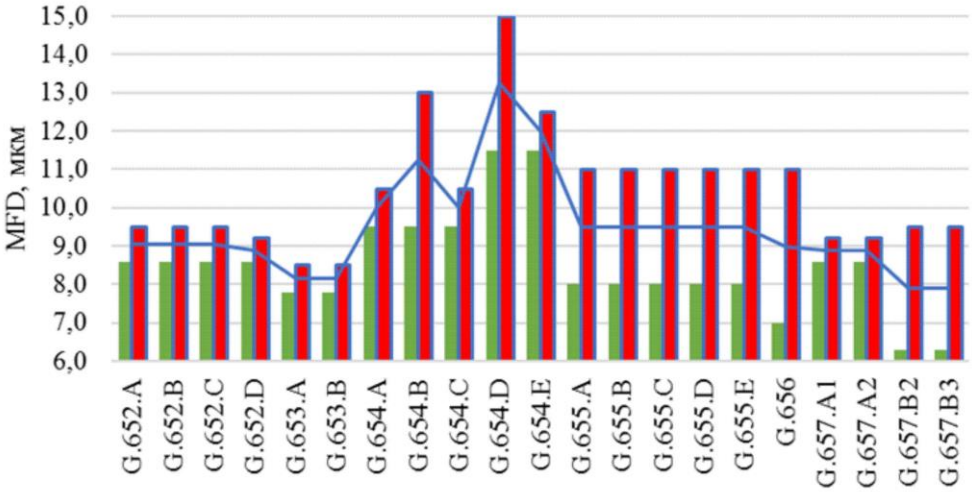

Рис. 6. MFD по стандартам ВС

С учетом изложенного выше из анализа этого параметра следует, что с точки зрения ВОЛС изгиб влияет на все ВС, кроме стандартов G.653.A,B и G.657.B2,B3. С точки зрения волоконно-оптических датчиков все в точности наоборот, так как любые внешние физические воздействия на указанные ВС будут приводить к существенной потере мощности оптического излучения, распространяющегося по ним.

Выводы

Проведенный многосторонний анализ уязвимости современных ВС на предмет формирования у них вытекающих мод при изгибах показал, что в большей степени этому подвержены ВОЛС про-тяженных участков ЛВС, чем объектовых ЛВС. При этом наилучшей устойчивостью к изгибам обладают ВС следующих стандартов по проанализированным параметрам:

– по погонному затуханию: G.654.A,B,C,D;

– по потерям на макроизгибах: G.657.A2,B2,B3;

– по диаметру модового поля: G.653.A,B и G.657.B2,B3.

С другой стороны, к ВС, параметры которых наиболее критичны к изгибам на линиях, относятся следующие стандарты:

– по погонному затуханию: G.651.1; G.652.A,B,C,D; G.653.A,B; G.655.A,B,C,D,E; G.656; G.657.A1,A2,B2,B3;

– по потерям на макроизгибах: G.651.1; G.652.A,B,C; G.653.A,B; G.654.A,B,C,D,E; G.655.A,B,C,D,E; G.656;

– по диаметру модового поля: G.651.1; G.652.A,B,C,D; G.654.A,B,C,D,E; G.655.A,B,C,D,E; G.656; G.657.A1,A2.

Пересечение множеств этих стандартов с учетом верхнего исключающего множества окончательно определяет следующие 12 стандартов, которые требуется прокладывать без изгибов или использовать для волоконно-оптических изгибных датчиков: G.651.1; G.652.A,B,C; G.654.E; G.655.A,B,C,D,E; G.656; G.657.A1.

Полученные выводы по стандартам ВС могут быть распространены на кабельную продукцию многих производителей, особенно тех, кто следует рекомендациям рассмотренных выше организаций МСЭ-Т и МЭК, например, указанных выше Corning и ПАО «ПНППК». Кроме того, следует учитывать, что одна из основных телекоммуникационных организаций – Ростелеком в настоящее время широко эксплуатируют ВС стандартов G.651.1, G.652.D, G.655, G.657.A1,A2. Сравнение их с выделенными выше стандартами дает понимание того, что все они, кроме последнего, подвержены изгибам.

Список литературы

1. Кульчин Ю.Н. Распределённые волоконно-оптические измерительные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 272 с.

2. Рекомендации МСЭ-Т G.657.A2. – 2016.

3. СТО 56947007-33.180.10.211-2016. Технологическая связь. Типовые технические решения по организации системы мониторинга состояния оптических волокон ВОЛС-ВЛ / ПАО «ФСК-ЕЭС». – 17.02.2016 № 50. – 43 с.

4. ITU-T G.650.1. Series G – Transmission systems and media, digital systems and networks, 10/2020. – Printed in Switzerland, Geneva, 2021.

5. Расчет параметров макроизгибного отвода оптического излучения из волоконных световодов / И.В. Денисов, Н.В. Лисовский [и др.] // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 2. – С. 18–26.

References

1. Kul'chin Iu.N. Raspredelennye volokonno-opticheskie izmeritel'nye seti [Distributed fiber optic measurement networks]. Moscow: Fizmatlit, 2001, 272 p.

2. Rekomendatsii MSE-T G.657.A2 [Recommendations MSE-T G.657.A2], 2016.

3. STO 56947007-33.180.10.211-2016. Tekhnologicheskaia sviaz'. Tipovye tekhnicheskie resheniia po organizatsii sistemy monitoringa sostoianiia opticheskikh volokon VOLS-VL [STO 56947007-33.180.10.211-2016. Technological connection. Typical technical solutions for organizing a system for monitoring the condition of optical fibers of FOCL-VL]. Publichnoe aktsionernoe obshchestvo “Federal'naia setevaia kompaniia Edinoi energeticheskoi sistemy”, 17.02.2016 no. 50, 43 p.

4. ITU-T G.650.1. Series G - Transmission systems and media, digital systems and networks, 10/2020. Printed in Switzerland, Geneva, 2021.

5. Denisov I.V., Lisovskii N.V. et al. Raschet parametrov makroizgibnogo otvoda opticheskogo izlucheniia iz volokonnykh svetovodov [Calculation of parameters of macrobending extraction of optical radiation from optical fibers]. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 2, pp. 18-26.

Сведения об авторах

ДЕНИСОВ Игорь Викторович
e-mail: *igordenisov@inbox.ru*

Профессор, доктор технических наук, доцент, Институт физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта (пос. Переславское, Россия)

ЛИСОВСКИЙ Никита Викторович
e-mail: *pro100fox@list.ru*

Аспирант, Институт физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта (пос. Переславское, Россия)

About the authors

DENISOV Igor Viktorovich
e-mail: *igordenisov@inbox.ru*

Professor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies of the Baltic Federal University named after I.I. I. Kant, (settlement Pereslavskoe, Russia)

LISOVSKY Nikita Viktorovich
e-mail: *pro100fox@list.ru*

Postgraduate student Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies of the Baltic Federal University named after I.I. I. Kant, (settlement Pereslavskoe, Russia)

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 20.01.2023

Одобрена: 26.01.2023
Принята к публикации: 01.02.2023
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.
Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.
Received: 20/01/2023
Approved: 26/01/2023
Accepted for publication: 01/02/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Денисов, И.В. Систематизация чувствительных к изгибу волоконных световодов / И.В. Денисов, Н.В. Лисовский // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 131–148.

Please cite this article in English as: Denisov I.V., Lisovsky N.V. The systematization of bending-sensitive fiber light guides // Applied photonics, 2023, no. 1, pp. 131-148.