

Эталон единиц средней мощности и ослабления оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации

А. И. ГЛАЗОВ*, А. В. ЗОТОВ*, М. Л. КОЗАЧЕНКО*, А. Б. СВЕТИЧНЫЙ*,
С. В. ТИХОМИРОВ*, В. А. ДЛУГУНОВИЧ**, А. В. ИСАЕВИЧ**, С. В. НИКОНЕНКО**

* Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: mkozachenko@vniiofi.ru

** Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,
Беларусь, Минск

Приведены результаты исследования метрологических характеристик созданного эталона, который обеспечивает хранение, воспроизведение и передачу в спектральном диапазоне 0,6—1,7 мкм единицы средней мощности от 0,1 до 5 мВт с относительной расширенной неопределенностью, не превышающей 0,002, и ослабление от 0,05 до 60,00 дБ с расширенной неопределенностью менее 0,2 дБ.

Ключевые слова: эталон, излучение, волоконно-оптическая система связи и передачи информации, средняя мощность, ослабление.

The results of studies of metrological parameters of a new average power and attenuation standard for fiber-optical communication and information transfer systems are presented. The standard provides the storage, reproduction and transfer in the spectral range of 0,6—1,7 μm of average power unit from 0,1 to 5 mW power range with the relative expanded uncertainty less than 0,002 and a attenuation 0,05 dB to 60 dB with expanded uncertainty less than 0,2 dB.

Key words: standard, radiation, fiber-optical communication and information transfer systems, reproduction, unit, average power, attenuation.

Быстрое развитие волоконно-оптических систем связи и передачи информации (ВОСП) находит отражение в регулярном повышении требований к точности измерительной техники, применяемой в этой области. Это, в свою очередь, влечет постоянное развитие государственных, вторичных и рабочих эталонов единиц величин, характеризующих оптическое излучение в ВОСП и обеспечивающих надлежащую высокоточную поверку техники. В процессе решения этих задач в 2011—2012 гг. разработан и изготовлен эталон единиц средней мощности и ослабления для ВОСП, предназначенный для хранения, воспроизведения и передачи единиц величин оптического излучения в республике Беларусь, а также для поверки и калибровки применяемых в этой области средств измерений (СИ).

Созданный эталон состоит из комплекса стабилизированных источников оптического излучения с волоконно-оптическим выходом, эталонной калориметрической системы для воспроизведения и передачи единицы средней мощности оптического излучения (ЭКВВСМ) в ВОСП, комплекса СИ для воспроизведения и передачи единицы ослабления и вспомогательной аппаратуры для обеспечения функционирования эталона и обработки информации.

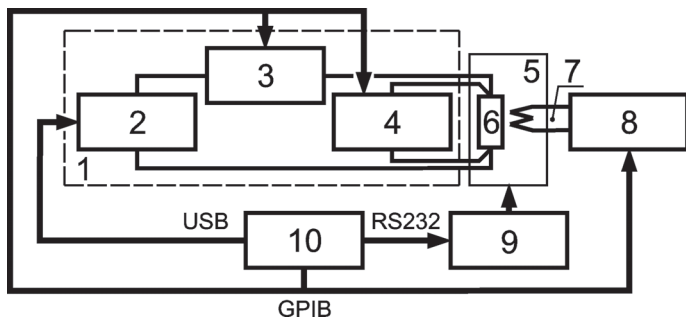
Основные метрологические характеристики ЭКВВСМ:

Спектральный диапазон	600—1700 нм
Диапазон измеряемой средней мощности излучения	10^{-4} — $5 \cdot 10^{-3}$ Вт
Полная угловая апертура расходящегося излучения, не более	25°
Среднее квадратическое отклонение результата измерений средней мощности излучения при 10 независимых наблюдениях при воспроизведении единицы средней мощности излучения, не более	0,07 %
Граница неисключенной систематической погрешности при воспроизведении и хранении единицы средней мощности излучения, не более	0,09 %

В качестве источников излучения используют одно- и многомодовые стабилизированные лазеры с длинами волн 655, 850, 1310, 1490, 1550, 1625 нм. Стабильность выходных характеристик лазерного излучения обеспечивается поддержанием постоянной температуры лазеров с помощью термоэлектрических охладителей и применением специальных схем стабилизации.

ЭКВВСМ представляет комплекс СИ, включающий: эталонный калориметрический преобразователь средней мощности постоянного электрического тока или оптического излучения в ВОСП в пропорциональный выходной электрический сигнал измерительной информации; нановольтметр для измерений выходного сигнала преобразователя; систему электрической калибровки, содержащую источник постоянного тока и мультиметры для измерений напряжения и тока калибровки; метеоскоп для измерений температуры, давления и влажности окружающей среды; персональный компьютер (ПК) для управления работой ЭКВВСМ и обработки результатов измерений (рисунок).

Основой ЭКВВСМ является эталонный первичный калориметрический преобразователь средней мощности оптического излучения для ВОСП — ПСМ.ПМ 5, аналогичный первичному измерительному преобразователю комплекса СИ для воспроизведения единицы средней мощности в ВОСП на базе калориметрической системы с электрическим замещением Государственного первичного специального эталона единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем передачи информации ГЭТ 170—2011 [1].



Блок-схема ЭКСВМ:

1 — система электрической калибровки ПСМ.ПМ; 2 — калибратор; 3, 4 — мультиметры цифровые прецизионные 3458А в режимах измерений тока и напряжения калибровки, соответственно; 5 — эталонный калориметрический преобразователь средней мощности ПСМ.ПМ, содержащий калибровочный электрический нагреватель 6 приемного элемента и термобатарею; 7 — термобатарея; 8 — нановольтметр 34420А; 9 — метеоскоп; 10 — персональный компьютер

Принцип работы преобразователя построен на методе замещения оптического излучения в ВОСП, средняя мощность которого подлежит измерению в процессе воспроизведения ее единицы, постоянным электрическим током, средняя мощность которого измеряется с высокой точностью в процессе предварительной электрической калибровки. Для достижения высокой точности ПСМ.ПМ реализованные в нем технические решения направлены на достижение высокой эквивалентности замещения, складывающейся из эквивалентности тепловых потерь, передаваемых в окружающую среду конвекцией, теплопроводностью и излучением с поверхности приемного элемента преобразователя, а также эквивалентности тепловых режимов работы термобатареи 7 при оптическом и электрическом воздействиях. Кроме того, достижение высокой эквивалентности замещения требует минимизации прямых и отраженных потерь измеряемого оптического излучения. При этом все виды тепловых потерь с поверхности приемного элемента зависят от его размеров и температуры нагрева. С другой стороны, минимизация потерь измеряемого оптического излучения предполагает исполнение приемного элемента в виде развитой полости, характеризующейся высокой поглощательной способностью и неселективностью. Такую полость представляет приемный элемент преобразователя ПСМ.ПМ, при этом использование волоконно-оптического световода для ввода излучения в полость позволило уменьшить диаметр ее входного окна до 0,8 мм. Это дало возможность минимизировать ее размеры, сохранив при этом высокую поглощательную способность и неселективность. В преобразователе ПСМ.ПМ использован градиентный приемный элемент — теплопровод, связывающий зону интенсивных выделений теплоты при оптическом и электрическом воздействиях с медным термостатом, по большой массе и теплоемкости которого эта теплота интенсивно рассеивается. Сток теплоты позволяет снизить температуру нагрева приемного элемента в зоне очагов тепловыделений при оптическом и электрическом воздействиях, уменьшить отмеченные ранее тепловые потери с его поверхности и повысить эквивалентность замещения. Очаги сосредоточены в одной и той же зоне

приемного элемента — в его дне. Достигается это тем, что со стороны полости на дно нанесено поглощающее покрытие, а с внешней стороны размещен калибровочный электрический нагреватель.

Чтобы исключить прямые тепловые потери с поверхности нагревателя, он отгорожен от окружающей среды тонкостенным медным экраном, имеющим тепловой контакт с цилиндрической стенкой полости градиентного приемного элемента, а через нее и с термостатом. Поэтому тепловые потери с поверхности электронагревателя, перехватываются тепловым экраном, вливаются в русло основного теплового потока и вместе с ним направляются к термостату.

Аналогичная картина наблюдается и с тепловыми потоками, вызванными оптическим воздействием преобразователя ПСМ.ПМ на полостный приемный элемент. Так как кроме дна внутренние стенки его полости выполнены зеркально отражающими, то небольшая доля оптического излучения, отраженная от его черного дна, возвращается на него после переотражений от зеркальных стенок. Таким образом и в случае оптического воздействия практически все излучение преобразуется в тепловой поток в зоне дна и по теплопроводу направляется от него к термостату. Поскольку тепловые потоки, образовавшиеся как при оптическом, так и электрическом воздействиях на приемный элемент преобразователя, протекают от его доньшка к термостату практически по одному и тому же теплопроводу, то и относительные доли их тепловых потерь являются эквивалентными. В преобразователе достигнута эквивалентность воздействия тепловых потоков, протекающих по градиентному приемному элементу, на термобатарею независимо от природы и пространственного характера их источников. Дело в том, что термобатарея реагирует на перепад температуры на небольшом участке теплопровода, расположенном в непосредственной близости к термостату, а следовательно, на достаточно большом удалении от дна полости, являющегося зоной активных тепловыделений. При этом расстояние от дна до термобатареи превышает длину полуокружности сечения полости, вследствие этого время прохождения тепловой волны от очага тепловыделений до термобатареи превышает время, необходимое для ее распространения по сечению теплопровода (при условии изотропии температуропроводности материала полости). Поэтому распределение плотности теплового потока в зоне термобатареи носит автомодельный характер, т. е. теряет отпечаток распределения тепловых источников в зоне дна, что практически полностью исключает погрешность ПСМ.ПМ.

Таким образом, в преобразователе ПСМ.ПМ реализованы все названные ранее условия, необходимые для достижения высокой эквивалентности замещения, а также, что не менее важно, обеспечивается возможность ее достаточно простой и надежной аналитической оценки.

Для электрической калибровки эталонного преобразователя ПСМ.ПМ используют измерительную систему 1, включающую стабилизированный источник электрического тока — калибратор 2, амперметр 3 и вольтметр 4 для измерений тока I и напряжения U калибровки. При электрической калибровке в приемном элементе преобразователя ПСМ.ПМ происходит последовательное преобразование сначала

выделяемой в его электрическом нагревателе мощности электрического тока P_3 в тепловой поток, а затем (в его термобатарею) в аналоговый выходной электрический сигнал V_3 , пропорциональный средней мощности образованного теплового потока. Этот сигнал измеряют нановольтметром 8 и определяют текущее значение коэффициента преобразования средней мощности электрического тока K_3 :

$$K_3 = V_3 / P_3 = V_3 / (UI).$$

После завершения процесса электрической калибровки преобразователя ПСМ.ПМ в него подают излучение от оптического источника. В приемном элементе преобразователя это излучение поглощается и преобразуется в тепловой поток, средняя мощность которого пропорциональна средней мощности излучения. В результате этого, как и при электрическом воздействии, термобатарея 7 реагирует на тепловое воздействие и вырабатывает выходной электрический сигнал V_0 , пропорциональный мощности этого воздействия, а следовательно, и средней мощности оптического излучения P_0 . Это позволяет проводить с помощью ЭКСВСМ косвенные измерения средней мощности оптического излучения в ВОСП и воспроизводить эту единицу:

$$P_0 = V_0 / (K_3 K_{33}),$$

где K_{33} — расчетный коэффициент эквивалентности замещения.

Все составные части ЭКСВСМ могут работать как автономно, так и под управлением ПК 10. Программа работы ЭКСВСМ обеспечивает несколько алгоритмов проведения измерительных операций с использованием различных оптических систем. Разработка этих алгоритмов была направлена, в частности, на повышение точности измерений приращений выходных сигналов работающего под оптической или электрической нагрузкой калориметрического преобразователя ПСМ.ПМ исключением из аддитивного выходного сигнала его нулевой составляющей [2, 3]. Необходимость разработки алгоритмов связана с тем, что работа калориметрического преобразователя, как правило, сопровождается уходом нулевого уровня его выходного сигнала в течение достаточно продолжительных многократных измерений. Однако его прямой контроль с помощью измерительной аппаратуры при работе ПСМ.ПМ под нагрузкой становится невозможным. Разработанные алгоритмы позволяют при проведении многократных измерений аналитически оценивать и учитывать дрейф нулевого уровня выходного сигнала преобразователя, отнесенный к каждому конкретному моменту изме-

рений рабочего аддитивного сигнала. Это позволяет выделить из аддитивного сигнала полезную составляющую, пропорциональную уровню средней мощности оптического или электрического воздействия.

Воспроизведение и передачу единицы ослабления рабочим эталонам проводят нормированием их градуировочных характеристик, а мерам затухания (оптическим аттенуаторам) — методом прямых измерений с использованием фотоэлектрического ваттметра с широким динамическим диапазоном и известной градуировочной характеристикой. Нормируют градуировочную характеристику методом сложения световых потоков.

Комплекс СИ для воспроизведения единицы ослабления в ВОСП состоит из перестраиваемых одномодовых FVA-3150-B-EI-EUI-89 и многомодовых FVA-3150-C-EI-EUI-89 аттенуаторов, фотоэлектрических ваттметров с широким динамическим диапазоном ОЭП-2 и установки для измерения нелинейности градуировочной характеристики приемников оптического излучения.

Вывод. Проведенные метрологические исследования показали, что эталон обеспечивает хранение, воспроизведение и передачу в спектральном диапазоне 0,6—1,7 мкм единицы средней мощности от 0,1 до 5 мВт с относительной расширенной неопределенностью, не превышающей 0,2 %, и единицы ослабления в диапазоне 0,05—60,00 дБ с расширенной неопределенностью менее 0,2 дБ.

Л и т е р а т у р а

1. Глазов А. И. и др. Обеспечение единства измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи // Измерительная техника. 2000. № 8. С. 31—35; Glazov A. I. et al. Unification of measurements of the average power of optical radiation in fiber-optic transmission systems // Measurement Techniques. 2000. V. 43. N. 8. P. 679—687.
2. Глазов А. И. и др. Повышение точности воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП путем совершенствования алгоритмов и автоматизации измерительных процессов // Измерительная техника. 2014. № 7. С. 19—23.
3. Tikhomirov S. V. et al. Comparison of reference standards for measurements of optical-fibre // Metrologia. 2000. V. 37. P. 347—348.

Дата принятия 28.04.2014 г.