

3. **Сташевский С. Ю.** Алгоритм векторизации растровых изображений в общем виде // Автоматизированные системы обработки информации, управления и проектирования: Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУРа), 2004. С. 124—130.

4. **Kumaravel S., Ramkumar T., Gurunnam B., Suresh M.** Quantitative estimation of shoreline changes using remote sensing and GIS: A case study in the parts of Cuddalore district, East coast of Tamil Nadu, India. // Int. J. Environmental Sciences. 2012. V. 2. N. 4. P. 2482—2490.

5. **Tang Yanli.** The Application of GIS and RS for Coastline Change Detection and Risk Assessment to Enhanced Sea Level Rise. Yellow River delta, China.

6. **Armah F. A.** GIS-based Assessment of Short Term Shoreline Changes in the Coastal Erosion-Sensitive Zone of Accre, Ghana // J. Environmental Sciences. 2011. V. 5. N. 7. P. 643—654.

Дата принятия 24.03.2015 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

535.231.63

Метрологическое обеспечение измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах связи и передачи информации

А. И. ГЛАЗОВ, В. С. ИВАНОВ, М. Л. КОЗАЧЕНКО, С. В. ТИХОМИРОВ

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

Рассмотрены развитие метрологического обеспечения в области измерений средней мощности оптического излучения в спектральном диапазоне 0,6—1,7 мкм для волоконно-оптических систем связи и передачи информации, создание Государственного первичного специального эталона единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации ГЭТ 170—2011.

Ключевые слова: эталон, излучение, волоконно-оптические системы передачи информации, средняя мощность, ослабление, длина волны.

The problems associated with the development of the field of metrological assurance of measurements of optical radiation average power in the spectral range of 0,6—1,7 microns for optical fiber communication and information transfer systems, the creation of the State primary standard 170-GET.

Key words: standard, radiation, fiber-optical communication transfer systems, average power, attenuation, wavelength.

В настоящее время область метрологии волоконно-оптических систем связи и передачи информации (ВОСП) продолжает быстро развиваться, что находит отражение не только в расширении динамических диапазонов характеристик передаваемого по световодам излучения, но и в увеличении перечня параметров, характеризующих эти системы. Примером служит разработанный Государственный первичный специальный эталон единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации ГЭТ 170—2011. Такое развитие связано с интенсивным поиском наиболее эффективных решений основных задач, направленных на увеличение объемов, скорости и качества передаваемой информации. Главным являлись измерения амплитудно-частотных (АЧХ) и спек-

тральных характеристик излучения. Естественно, что измерительная аппаратура, оптические схемы, алгоритмы измерительных процессов и методики, применяемые в этой области, широко использовались на практике. В то же время повышение точности измерений средней мощности оптического излучения не являлось решающим, поэтому накопление опыта по измерениям происходило не столь интенсивно. В этом и кроются основные причины недостатков, выявленных при исследовании высокоточных средств измерений (СИ) средней мощности излучения в ВОСП [1]. Например, при проведении различных метрологических работ основное внимание традиционно уделяли быстрдействию измерительной аппаратуры и подавлению факторов, вызывающих искажения АЧХ передаваемого и измеряемого излучений, а оценке потерь излучения на различных участках и эле-

ментах оптических схем и апертурах применяемой аппаратуры, как правило, не придавали особого значения. Такой подход можно считать в определенной степени оправданным при измерениях, например, АЧХ и спектральных характеристик излучения, когда даже значительные потери последнего не вызывают дополнительных погрешностей измерений, поскольку они не являются потерями измеряемого информативного параметра. Однако для высокоточного воспроизведения и последующей передачи единицы средней мощности на уровне высшего звена поверочной схемы аналогичный подход недопустим, так как в этом случае потери излучения являются потерями именно информативного параметра.

Быстрое развитие науки, практическое применение ВОСП и соответствующее повышение требований к СИ параметров передаваемого по оптическому волокну излучения, в том числе средней мощности, относятся к началу 1990-х гг., что потребовало создания и совершенствования соответствующего метрологического обеспечения. Поэтому в 1994 г. перед ВНИИОФИ была поставлена задача разработки эталонного комплекса высшей точности для СИ средней мощности оптического излучения в ВОСП, поверочной схемы, ряда рабочих эталонов (РЭ) и методов, обеспечивающих передачу воспроизводимой на эталонном комплексе единицы рабочим СИ, а также методов и средств метрологической аттестации создаваемых эталонов и проверок рабочих СИ [2].

Выполнение указанной задачи было связано, в первую очередь, с поиском принципов построения и технических решений высокоточной эталонной измерительной аппаратуры. Также необходимо было учесть положительный опыт, полученный при разработке эталонной калориметрической системы для Государственного первичного эталона единицы средней мощности лазерного излучения [3]. В результате был разработан эталонный калориметрический измерительный преобразователь (далее — преобразователь) средней мощности оптического излучения ПСМ.ПЭ, принципы построения которого практически аналогичны разработанному ранее эталонному преобразователю СИСМ-С.

В основу принципа работы ПСМ.ПЭ положен метод замещения оптического излучения (его среднюю мощность измеряют в процессе воспроизведения единицы) постоянным электрическим током, средняя мощность которого определяется с высокой точностью в процессе предварительной электрической калибровки преобразователя. Реализованные в ПСМ.ПЭ технические решения направлены на достижение высокой эквивалентности замещения, складывающейся из эквивалентности тепловых потерь в окружающую среду конвекцией, теплопроводностью и излучением с поверхности приемного элемента преобразователя, а также эквивалентности тепловых режимов работы термобатареи при оптическом и электрическом воздействиях. Достижение высокой эквивалентности замещения также требует минимизации прямых и отраженных потерь измеряемого оптического излучения и учета, что все виды тепловых потерь с поверхности приемного элемента зависят от его размеров и температуры нагрева.

Для минимизации потерь измеряемого оптического излучения необходимо придать приемному элементу форму глубокой полости, характеризующейся высокой поглощательной способностью и неселективностью. Именно такая полость реализована в приемном элементе ПСМ.ПЭ. Использо-

вание волоконно-оптического световода для ввода излучения позволило уменьшить диаметр входного окна полости до 0,8 мм, что дало возможность минимизировать размеры полости, сохранив высокую поглощательную способность и неселективность. В преобразователе использован градиентный тип приемного элемента — теплопровод, связывающий зону интенсивных выделений тепловых энергий при оптическом и электрическом воздействиях с медным термостатом, по большой массе и объему которого эта энергия интенсивно рассеивается. Отток теплоты способствует снижению температуры нагрева приемного элемента в зоне очагов тепловыделений при оптическом и электрическом воздействиях, уменьшению тепловых потерь с его поверхности и повышению эквивалентности замещения. Указанные очаги сосредоточены в одной и той же зоне приемного элемента (в донышке), что достигнуто нанесением со стороны полости поглощающего покрытия и размещением с внешней стороны калибровочного электрического нагревателя. Чтобы исключить прямые тепловые потери, нагреватель отгорожен от окружающей среды тонкостенным медным экраном, имеющим тепловой контакт с цилиндрической стенкой полости градиентного приемного элемента, а через нее — и с термостатом. Поэтому теплота, уходящая от поверхности электронагревателя, перехватывается тепловым экраном, вливается в русло основного теплового потока, вместе с ним направляется к термостату и далее к термобатарее. Аналогичная картина наблюдается и с тепловыми потоками, вызванными оптическим воздействием на полостной приемный элемент ПСМ.ПЭ. Поскольку внутренние стенки полости элемента (кроме донышка) зеркально отражающие, то небольшая доля оптического излучения, отраженная от черного донышка, возвращается обратно на него после переотражений от зеркальных стенок. Таким образом, и в случае оптического воздействия практически все излучение преобразуется в тепловой поток в зоне донышка и по теплопроводу направляется к термостату. Так как тепловые потоки, образовавшиеся при оптическом и электрическом воздействиях на приемный элемент преобразователя, проходят от донышка к термостату практически по одному и тому же теплопроводу, то относительные доли их тепловых потерь являются эквивалентными.

В преобразователе достигнута эквивалентность воздействия на его термобатарею протекающих по градиентному приемному элементу тепловых потоков независимо от природы и пространственного характера источников потоков. Это обеспечено тем, что термобатарея реагирует на перепад температуры на небольшом участке теплопровода, расположенном в непосредственной близости к термостату и на достаточно большом удалении от донышка полости, являющегося зоной активных тепловыделений. Расстояние от донышка до термобатареи превышает длину полуокружности сечения полости, значит, при условии изотропии температуропроводности материала полости время прохождения тепловой волны от очага тепловыделений до термобатареи превышает время, необходимое для ее распространения по сечению теплопровода. Поэтому распределение плотности теплового потока в зоне термобатареи носит автомодельный характер, т. е. теряет отпечаток распределения тепловых источников в зоне донышка, что практически полностью исключает зонную погрешность ПСМ.ПЭ.

Ввод излучения в полость приемного элемента ПСМ.ПЭ с помощью узкого световода, диаметр волокна которого со-

ставлял 10—50 мкм, а также расположение торца световода в непосредственной близости от входного окна полости позволили значительно уменьшить ее размеры, обеспечив высокую поглощательную способность. В свою очередь, уменьшение размеров полости, а следовательно, и поверхности теплообмена с окружающей средой, снизили неконтролируемые тепловые потери. Позиционирование выходного торца волокна световода на расстоянии 0,7 мм от входного окна полости не только обеспечило беспрепятственный проход в полость выходящего из световода и расходящегося под углом 15—25° излучения, но и позволило согласовать размеры окна с угловой апертурой излучения, достигающей 46°, что значительно уменьшило неучтенные потери информативного параметра. К положительным факторам также следует отнести низкий уровень как оптического, так и электрического энергетического воздействия, отражающееся уменьшением нагрева приемного элемента и неконтролируемых тепловых потерь с его поверхности, размеры которой, как было показано выше, тоже удалось значительно уменьшить. Пассивный термостат преобразователя ПСМ.ПЭ и размещенные в нем рабочий и компенсационный приемные элементы дополнительно защищены от внешних тепловых помех теплоизолирующими и тепловыравнивающими оболочками и корпусом прибора.

В процессе разработки ПСМ.ПЭ рассматривали возможность его вакуумирования в специальной камере. Однако аналитические исследования показали, что и без применения вакуума принятая конструкция обеспечивает достаточно высокую эквивалентность замещения, поэтому для упрощения эксплуатации от вакуумирования пока решили отказаться.

Таким образом, в ПСМ.ПЭ в полной мере реализованы условия, необходимые для достижения высокой эквивалентности замещения, а также, что не менее важно, обеспечена возможность достаточно простой и надежной аналитической оценки замещения.

На базе ПСМ.ПЭ созданы установка высшей точности (УВТ) и эталонный комплекс, который обеспечивал воспроизведение единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП при длинах волн 0,85; 1,3; 1,55 мкм в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ Вт со средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений не более $0,06 \cdot 10^{-2}$ и неисключенной систематической погрешностью (НСП) $0,085 \cdot 10^{-2}$ [2]. Одновременно разработана возглавляемая эталонным комплексом государственная поверочная схема [4].

Для передачи единицы средней мощности по ступеням поверочной схемы созданы РЭ, базирующиеся на полостных ПСМ.ПО и дисковых ПСМ.ДО преобразователях. По конструкции ПСМ.ПО и ПСМ.ПЭ аналогичны. Отличие состоит лишь в том, что ПСМ.ПО не имеет теплового экрана, отделяющего от окружающей среды размещенный на доньшке его полости электрический нагреватель, ПСМ.ДО имеет не полостный, а плоский дисковый приемный элемент, изготовленный из медной фольги диаметром 5 мм, с поглощающим покрытием (эмаль АК-243). Диск наклеен на центральную область дифференциальной термобатареи преобразователя. Отток теплоты с диска к термостату осуществляется по тонкой слюдяной подложке и электродам термобатареи. Со стороны ввода в ПСМ.ДО излучения в медном термостате, окружающем дисковый приемный элемент, выполнена полость в виде полированной полусферы, направляющей расходящееся на выходе световода излучение на черный диск

элемента, а также возвращающая на него первично отраженное излучение. Такой РЭ с коэффициентом преобразования средней мощности 2 В/Вт использовали в качестве эталона—переносчика единицы средней мощности как от УВТ, так и от эталонного комплекса к фотоэлектрическим СИ средней мощности оптического излучения в ВОСП. Основные характеристики ПСМ.ПО и ПСМ.ДО представлены в таблице. Также были проведены международные сличения преобразователя ПСМ.ПЭ с аналогичными национальными эталонами других стран, например с эталоном NIST (США). По результатам сличений выявили расхождения 0,02 и 0,2 % излучения на двух длинах волн (1,3 и 1,55 мкм), что было признано сторонами весьма успешным [5].

К началу 2000-х г. назрела необходимость дальнейшего совершенствования всей системы метрологического обеспечения области ВОСП, связанная с возникновением новых, характеризующих оптическое излучение, величин. В результате для воспроизведения единиц этих величин были разработаны Государственный первичный специальный эталон, поверочная схема и комплекс РЭ, а также методы и средства их метрологической аттестации и поверок. Так, в 2006 г. во ВНИИОФИ был создан Государственный специальный эталон единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем передачи информации ГЭТ 170—2006, в котором для воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения использована установка измерений средней мощности (УИСМ), где в качестве основного звена применен ПСМ.ПЭ [6].

Усовершенствованный эталон ГЭТ 170—2011 возглавил Государственную поверочную схему для СИ [7]. В эталоне, в частности, был модернизирован ПСМ.ПЭ и его более совершенная модель получила название ПСМ.ПМ, в которой изменен узел ввода излучения в полостный приемный элемент, а также усилена защита от негативных внешних воздействий. Как следствие повысилась точность эталона в части воспроизведения единицы средней мощности излучения: при длинах волн 0,85; 1,3; 1,55 мкм в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ Вт СКО составило не более $0,02 \cdot 10^{-2}$, а НСП — $0,03 \cdot 10^{-2}$. Во ВНИИОФИ для Института физики Республики Беларусь был разработан эталон единиц средней мощности и ослабления оптического излучения в ВОСП, в котором также использовали ПСМ.ПМ, аналогичный примененному в ГЭТ 170—2011 [8].

Рассмотрим принципы построения и технические решения созданных эталонов. В ГЭТ 170—2006 реализована двухканальная оптическая схема с контролем нестабильности оптического излучения в процессе передачи единицы средней мощности поверяемым РЭ [9]. В эталоне для Беларуси опробована и успешно применена одноканальная оптическая схема, основанная на стабильности средней мощности излучения в процессе передачи единицы средней мощности поверяемым РЭ, исключаяющая необходимость применения контрольных СИ средней мощности излучения. Следует отметить, что данная схема была предварительно опробована в ГЭТ 170—2011, где использованы оба варианта оптических схем.

Как показал опыт эксплуатации созданных эталонов, применение в их составе точной измерительной аппаратуры еще не гарантирует достижения высокой точности эталонной системы в целом, потому что на работу подобных систем и ее отдельных элементов может оказывать существенное не-

гитивное влияние ряд факторов. Для наиболее полного учета и нейтрализации указанных факторов требуется: достаточно точная и корректная оценка параметров, характеризующих эти факторы в конкретные моменты времени; исследование влияния каждого фактора на результаты измерений, выявление соответствующих зависимостей и определение поправочных коэффициентов. Эффективное решение подобных задач применительно к работе высокоточных эталонных систем, погрешности которых в настоящее время равны 0,1 % и менее, требует тщательных исследований.

В справедливости утверждений можно убедиться на примере оценки влияния на работу ПСМ.ПМ такого фактора, как температура окружающей среды. Подробное описание преобразователя приведено в [2, 6]. Коэффициент преобразования средней мощности у него составляет 250 мкВ/мВт, а температурная чувствительность термобатареи — 5 мВ/°С. Как показал накопленный опыт эксплуатации эталонных систем при проведении метрологических работ, самые востребованные уровни энергетического воздействия на эталонный преобразователь близки к 1 мВт. При таком уровне выходной сигнал преобразователя будет 250 мкВ, что соответствует реакции термобатареи на изменение температуры всего лишь на 0,05 °С. Если исходить из того, что относительная погрешность эталонных систем составляет 10^{-3} , то соответствующие ей изменения температуры спаев термобатареи будут равны $5 \cdot 10^{-5}$ °С. Аналогичным образом можно провести приблизительную оценку температурного режима работы термобатареи ПСМ.ПМ в процессе электрической калибровки. Например, если реализуемое на практике СКО результатов измерений коэффициента преобразования средней мощности постоянного электрического тока составляет 10^{-5} , то соответствующие ему изменения температуры спаев термобатареи оцениваются на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ °С.

Описанные примеры позволяют составить представление о температурных режимах, характеризующих работу приемного и чувствительного элементов преобразователя в процессе воспроизведения единицы средней мощности излучения, а также сделать вывод о необходимости их защиты от разных видов внешних тепловых помех. Как следует из технического решения ПСМ.ПМ, такая защита реализована в его конструкции, что позволило добиться значительного ослабления как колебаний, так и скорости постоянных медленных изменений температуры приемных элементов преобразователя, а также скорости дрейфа их выходных сигналов, приводящее к значительному уменьшению связанных с этими факторами случайных погрешностей.

Другое негативное влияние связано с температурной зависимостью коэффициента преобразования средней мощности, вызванной аналогичной зависимостью теплопроводности материала градиентного приемного элемента преобразователя и чувствительностью термобатареи. Для ПСМ.ПМ выявлена характерная относительная чувствительность коэффициента преобразования средней мощности к изменению температуры окружающей среды на 1 °С, составившая 0,0003. Следовательно, при реализации эталонных систем эффективное подавление температурной составляющей

погрешности связано с необходимостью контроля изменений температуры приемного элемента преобразователя с разрешением не более 0,1 °С. Дело в том, что при воспроизведении единицы средней мощности могут наблюдаться некоторые изменения температуры в помещении за время, отделяющее операции электрической калибровки преобразователя от последующих оптических измерений, которые могут быть вызваны разными факторами, в том числе и суточным изменением температуры в конкретном помещении.

При работе эталонного преобразователя влияние температуры может проявляться также в виде зависимости коэффициента преобразования средней мощности от уровня электрического тока и излучения. Несмотря на то, что процесс воспроизведения единицы средней мощности предусматривает проведение электрической калибровки преобразователя при уровне средней мощности постоянного электрического тока, максимально приближенном к уровню средней мощности последующего оптического воздействия, их значения обычно отличаются. Этот фактор нужно учитывать во время измерений.

Температура может оказывать влияние не только на работу рассмотренного эталонного преобразователя, но и на другую аппаратуру из состава системы — на электрические и оптические источники, нановольтметры, мультиметры и фотоэлектрические приемники излучения. Особенно важен учет влияния этого фактора на работу мультиметров, так как единица средней мощности оптического излучения в созданных эталонных системах воспроизводится по методу замещения с использованием именно электрических стандартов.

Зная многообразие факторов, способных оказывать негативное влияние на измерительные процессы при воспроизведении единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП, приходим к выводу, что учет и наиболее эффективную нейтрализацию этого влияния можно добиться только путем четкой организации всего измерительного процесса с точным фиксированием показаний всей входящей в состав эталонной системы аппаратуры в точно заданные моменты времени. Все сказанное нашло отражение в реализованных на практике алгоритмах целого ряда последовательных измерительных операций, совокупность которых обеспечила полноту и завершенность процесса воспроизведения единицы с помощью созданных эталонных систем [9].

Поскольку эталонные системы базируются на calorиметрических преобразователях, имеющих значительную инерционность, при разработке алгоритмов должно быть уделено внимание выбору динамических режимов проводимых измерительных процессов. При этом исходили из того, что постоянная времени ПСМ.ПМ $\tau = 24$ с, а нарастание и релаксация выходных сигналов термобатареи носит экспоненциальный характер. Поэтому достаточно полное завершение переходных процессов при нагреве или остывании приемного элемента преобразователя после начала или прекращения энергетического воздействия обеспечивается за 5 мин, что соответствует интервалу времени более 12 τ . К концу ука-

занного промежутка времени выходной сигнал преобразователя будет отличаться от теоретического максимума или минимума на кривой релаксации менее, чем на $6 \cdot 10^{-6}$, т. е. может быть отнесен к разряду пренебрежимо малых отклонений.

Разработанные алгоритмы проведения измерительных процессов (например, электрической калибровки эталонных калориметров), представляющих серии многократных измерений входных параметров электрического тока и напряжения и аддитивных выходных электрических сигналов измерительной информации, позволяли исключать из каждого i -го в серии из n значений аддитивных сигналов работающего под электрической нагрузкой преобразователя его нулевую составляющую и оценить таким образом чистое приращение сигнала, вызванное лишь воздействием электрического тока [9]. Об эффективности выбранного режима электрической калибровки преобразователя свидетельствуют многочисленные результаты серий измерений коэффициента преобразования средней мощности постоянного электрического тока, оценка СКО среднего значения которого при 10 наблюдениях в серии при жестком контроле состояния окружающей среды в эталонном помещении достигала 0,0009—0,001 %, а в более свободном режиме превышала 0,004—0,006 %. Однако оценка отражала не только погрешности преобразователя, но и случайные погрешности всей используемой при электрической калибровке аппаратуры, а также вызванные внешними факторами.

Заключение. Внедрение рассмотренных технических решений высокоточной эталонной аппаратуры, базирующейся на эффективной реализации автомодельных тепловых режимов работы, в совокупности с автоматизацией процессов управления, а также разработанных методов измерений и обработки получаемой информации в соответствии с реализованными алгоритмами работы, позволило уменьшить погрешность до 0,1 % и одновременно повысить надежность, эффективность и производительность метрологических работ, значительно снизив их трудоемкость.

В дальнейшем необходимо проводить работы по термостабилизации аппаратуры эталонов, использованию частичной роботизации проводимых на эталонном стенде механических операций, размещению эталонного преобразователя в вакуумной камере и др.

Л и т е р а т у р а

1. Глазов А. И., Козаченко М. Л., Светличный А. Б., Тихомиров С. В. Погрешности высокоточных измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи информации и пути их минимизации // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 12—15.

Основные характеристики эталонных преобразователей

Наименование	Наименование или измеряемый параметр	Рабочий диапазон, Вт	Погрешность Δ , %
ПСМ-ПЭ	Воспроизведение единицы средней мощности в составе УВТ ВОСП, ГЭТ 170—2006	0,001—0,01	<0,1
ПСМ-ПО	Средняя мощность в ВОСП	0,001—0,01	<0,1
ПСМ-ДО	Средняя мощность в ВОСП	0,0001—0,001	0,1
ПСМ-ПМ	Воспроизведение единицы средней мощности в составе ГЭТ 170—2011	0,001—0,01	<<0,1

2. Глазов А. И., Козаченко М. Л., Тихомиров С. В., Светличный А. Б. Обеспечение единства измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи // Метрология и измерительная техника в связи. 1999. № 4. С. 20—24.

3. ГОСТ 8.275—78. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений средней мощности лазерного излучения в диапазоне длин волн 0,3—12,0 мкм.

4. МИ 2558—99. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передач.

5. Tikhomirov S. V., Glasov A. I., Kozatchenko M. L., Kravtsov V. E., Svetlichny A. B., Vayshenker I., Scott T. R., Franzen D. I. Comparison of reference standards for measurements of optical-fibre // Metrologia. 2000. V. 37. P. 347—348.

6. Глазов А. И., Козаченко М. Л., Тихомиров С. В., Светличный А. Б. Обеспечение единства измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи // Измерительная техника. 2000. № 8. С. 31—40.

7. ГОСТ 8.585—2013. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации.

8. Глазов А. И., Зотов А. В., Козаченко М. Л., Светличный А. Б., Тихомиров С. В., Длунгович В. А., Исаевич А. В., Никоненко С. В. Эталон единиц средней мощности и ослабления оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации // Измерительная техника. 2014. № 11. С. 15—17.

9. Глазов А. И., Зотов А. В., Козаченко М. Л., Светличный А. Б., Тихомиров С. В. Повышение точности воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи информации путем совершенствования алгоритмов и автоматизации измерительных процессов // Измерительная техника. 2014. № 7. С. 19—23.

Дата принятия 23.09.2014 г.