

Государственный рабочий эталон единицы средней мощности оптического излучения для волоконно-оптических систем и лазеров

А. И. ГЛАЗОВ, М. Л. КОЗАЧЕНКО, С. В. ТИХОМИРОВ, Н. П. ХАТЫРЕВ

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

Обоснована разработка Государственного рабочего эталона единицы средней мощности оптического излучения для волоконно-оптических систем передачи и лазеров в диапазоне 0,05—5 Вт в спектральном диапазоне 0,19—12 мкм с расширенной неопределённостью, не превышающей $0,985 \cdot 10^{-2}$. Рассмотрена методика передачи единицы на уровне 1 мВт непосредственно от Государственного первичного специального эталона единицы длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения ГЭТ 170—2011 для волоконно-оптических систем связи и передачи информации с использованием независимо калибруемого механического ослабителя.

Ключевые слова: эталон, излучение, волоконно-оптическая система передачи, лазер, средняя мощность.

The rationale is provided for the development of the State working standard unit of the average power for fiber-optic systems and lasers radiation in the range of 0,05 to 5 W within the spectral range from 0,19 to 12 μm and an expanded uncertainty not exceeding $0,985 \cdot 10^{-2}$. The method of transfer of the unit of the average optical power at a level of 1 mW, directly from the State primary special standard GET 170—2011, using independently calibrated mechanical attenuator, is considered.

Key words: measurement standard, radiation, fiber-optical, laser, average power.

В настоящее время быстро развиваются волоконно-оптические системы передачи (ВОСП), используемые для переноса информации и других целей. Это объясняет необходимость соответствующего совершенствования системы метрологического обеспечения в данной области, направленного на расширение диапазонов измерений применяемой техники как в сторону больших, так и малых уровней средней мощности оптического излучения и повышение точности аппаратуры. При выборе путей решения поставленных задач необходимо учитывать факторы, связанные не только с поиском наиболее эффективных принципов построения высокоточной эталонной аппаратуры, схемотехнических решений базирующихся на ней систем и алгоритмов ведения измерительных процессов, но и с созданием наиболее рациональных поверочных схем и методов передачи единицы средней мощности оптического излучения. Расширение диапазонов измерений уровней средней мощности на практике обычно достигается увеличением числа занимаемых рабочими эталонами (РЭ) промежуточных ступеней поверочной схемы, располагающихся между воспроизводящим единицу государственным первичным эталоном (ППЭ) и рабочими средствами измерений (РСИ). Однако увеличение числа ступеней приводит к соответствующему возрастанию операций передачи единицы средней мощности между ними. Если учесть, что совокупность погрешностей операций передачи чаще всего вносит наибольший вклад в погрешности поверяемых РСИ, то можно сделать вывод, что следует стремиться к максимальному расширению диапазона измерений каждого отдельного звена поверочной схемы, добиваясь, если не сокращения, то сохранения количества ее ступеней.

Поэтому при создании Государственного рабочего эталона единицы средней мощности оптического излучения в диапазоне 0,05—5 Вт при длинах волн 0,19—12 мкм, была поставлена задача значительного расширения диапазона

измерений средней мощности оптического излучения в сторону больших уровней. Это вызвано тем, что в настоящее время отмечается увеличение уровней средней мощности излучения, передаваемого по волоконно-оптическим световодам. Например, все большее применение находят источники, вывод оптического излучения из которых происходит с помощью таких световодов. Средняя мощность непрерывного и импульсно-периодического излучений подобных источников достигает 200 мВт, а мощность излучения волоконно-оптических лазеров — 30 кВт. Все это необходимо учитывать при выборе путей совершенствования системы метрологического обеспечения ВОСП.

При создании рассматриваемого РЭ было обращено внимание на некоторое размывание границ между задачами метрологического обеспечения ВОСП и традиционной лазерной техники. При измерении средней мощности оптического излучения стали использовать измерительные установки, в которых на отдельных отрезках открытых лазерных пучков применяли ввод излучения в различные световоды [1, 2], и наоборот, в системах ВОСП на некоторых участках используется вывод излучения с целью проведения тех или иных оптических операций на сформированных открытых пучках [3]. Связано это с тем, что подобные решения расширяют возможности реализации различных алгоритмов ведения измерительных процессов, предусматривающих, например, в системах ВОСП деление и прерывание передаваемого по световодам излучения, избегая при этом периодических выключений источника, нарушающих его рабочий режим и стабильность. В эталонных лазерных системах ввод открытого пучка в световод позволяет четко фиксировать границы сечения лазерного пучка и исключить трудно контролируемые потери слабых потоков излучения, обычно окружающих открытый пучок. Большое значение это имеет при реализации высокоточных эталонных систем, так как даёт возмож-

ность уменьшать входную апертуру приёмника излучения, повышать его поглощательную способность и избегать потерь излучения при вводе в приёмник. В силу этого при эксплуатации и метрологических исследованиях ВОСП и традиционных лазеров часто возникает необходимость использования двух типов измерительной аппаратуры, независимо применяемых в указанных областях. Определённый интерес представляет создание унифицированной измерительной техники, успешно работающей как с открытыми коллимированными лазерными пучками, так и с выходящим из волоконно-оптических световодов расходящимся излучением. Это также было учтено при разработке рассматриваемого государственного РЭ.

Однако достижение унификации разрабатываемого РЭ было связано не только с поиском соответствующих технических решений его аппаратуры, но и с выбором одной из двух действующих поверочных схем, согласно которой должна наиболее эффективно и с перспективой на будущее развитие обеспечиваться передача единицы средней мощности оптического излучения. Одна из схем действует в области ВОСП [4]. Ее возглавляет Государственный специальный эталон единиц длины волны и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения (ГЭТ 170—2011), воспроизводящий единицу средней мощности на уровне до 1 мВт. Другая схема регламентирует поверку СИ для традиционных лазеров [5], ее возглавляет Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения (ГЭТ 28—2013), воспроизводящий данную единицу на уровне до 0,8 Вт. Обе поверочные схемы возглавляются государственными эталонами, которые базируются на высокоточных калориметрических приемниках, калибруемых по методу замещения и имеющих много общих и весьма перспективных и эффективных технических решений, таких как градиентный тип их полостных приемных элементов, работающих в автомоделных тепловых режимах и при этом характеризующихся высокой поглощательной способностью и обес-

печивающих высокую эквивалентность замещения. Тем не менее, высочайшая эквивалентность замещения приемника СИСП-П [4] достигнута, в том числе, и в результате его вакуумирования, что усложнило эксплуатацию. Высокая эквивалентность замещения эталонного калориметрического преобразователя средней мощности ПСМ.ПМ, работающего в системе ВОСП, достигнута без применения вакуума, а главным образом из-за очень узкой входной апертуры приёмного элемента, что позволило минимизировать размеры поверхности теплообмена с окружающей средой полостного приёмного элемента и добиться высочайшей поглощательной способности. Ввод излучения в преобразователь с помощью узкого волоконно-оптического световода позволил не только уменьшить размеры полости, но и полностью исключить потери излучения. Дальнейшее повышение точности эталонной калориметрической системы ВОСП может быть достигнуто, в том числе, в результате вакуумирования.

Основная задача создания РЭ — расширение диапазона измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах до 5 Вт. Для окончательного выбора поверочной схемы необходимо оценить возможность точной передачи соответствующей единицы от действующего в области ВОСП ГПЭ к рассматриваемому РЭ, надёжная работа которого обеспечивается при её уровнях не ниже 20—50 мВт, и избежать введения дополнительной промежуточной ступени поверочной схемы. Постоянная времени приемника ПСМ.ПМ составляет 24 с, что обеспечивает нормальную работу в режиме измерений средней мощности импульсно-периодического излучения. Это, в свою очередь, позволило использовать при воспроизведении и передаче источники оптического излучения мощностью до 150—200 мВт, а для ослабления излучения при воспроизведении на уровне 1 мВт применить, например, 100-кратный механический ослабитель, надёжно калибруемый независимыми методами. При этом вывод ослабителя из оптического тракта на стадии передачи единицы РЭ позволяет повысить уровень средней мощности до соответствующих его диапазону значений 50—100 мВт. Простейшая схема установки для калибровки РЭ в составе действующей в области ВОСП поверочной схемы представлена на рис. 1 [4].

Установка включает источник оптического излучения 1, к выходу которого подключён входной световод 2 из состава волоконно-оптической скамьи 3. В сформированный скамьей открытый коллимированный пучок излучения введён чёрный вращающийся диск механического ослабителя излучения 4, имеющий узкую угловую прорезь для формирования ослабленного по средней мощности пучка импульсно-периодического излучения. Затем ослабленный пучок направляется скамьей 3 в выходной световод 5 и далее в переходной световод 6, соединённый с эталонной калориметрической системой ГПЭ 10 с помощью стандартного волоконно-оптического разъёма в корпусе преобразователя ПСМ.ПМ 11, сигналы которого обрабатываются измерительной системой ГПЭ 12 и представляются в виде информации об уровне средней мощности P_0 в 100 раз ослабленного излучения источника 1. Затем наконечник световода 6 выводят из преобразователя ПСМ.ПМ и переводят на вход калибруемого РЭ 7, установив перед окном измерительного преобразователя средней мощности излучения 8. Одновременно с этим выводят диск ослабителя 4 из сформированного скамьей 3 открытого пучка излучения и с использованием измерительного блока 9 из состава РЭ оценивают уровень средней мощ-

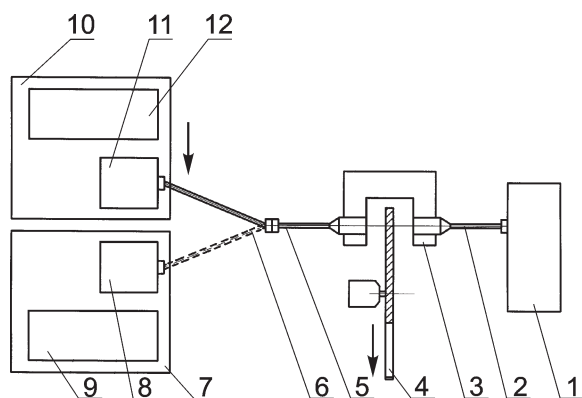


Рис. 1. Схема установки для передачи единицы средней мощности оптического излучения от ГПЭ к РЭ:

1 — источник излучения; 2 — световод; 3 — волоконно-оптическая скамья; 4 — диск ослабителя; 5 — выходной световод скамьи; 6 — переходной световод; 7 — калибруемый РЭ; 8 — преобразователь Градиент-15ГП; 9, 12 — измерительные блоки РЭ и ГПЭ, соответственно; 10 — калориметрическая система ГПЭ; 11 — преобразователь ПСМ.ПМ

ности излучения, усиленного в 100 раз по сравнению с P_0 , и определяют в соответствии с регламентирующими калибровку документами метрологические характеристики РЭ.

При воспроизведении и передаче единицы средней мощности оптического излучения РЭ (см. рис. 1) применяли механический чёрный диск диаметром $D = 199,58$ мм, в котором выполнена угловая прорезь с радиально направленными к центру боковыми кромками, а имеющая форму дуги верхняя кромка отделена от внешнего торца диска в радиальном направлении перемычкой шириной $h = 1,08$ мм. Длина замыкающей дугу хорды составляет $L = 6,22$ мм. При независимой калибровке ослабителя измеряли также максимальное значение радиального биения диска в зоне прорези в створе пучка излучения, которое составило $b = 1,02$ мм. Это позволило оценить реальный радиус R вращения верхней кромки прорези и коэффициент ослабления N , используя зависимости

$$R = 0,5D - h + 0,5b;$$

$$N = 2\pi R/L.$$

При калибровке ослабителя использовали следующие простейшие СИ линейных размеров: для измерений D — штангенциркуль ШЦ-1-200-0,05; h, L — штангенциркуль ШЦ-1-150-0,02; b — многооборотный индикатор 1МИГ-1-0,01 МИК. Погрешностями от замены длины дуги верхней кромки прорези на длину L её хорды, а также отклонениями боковых кромок прорези от радиальности пренебрегали ввиду малости. При использовании названных СИ погрешность ослабителя составила 0,32 % и внесла доминирующий вклад в погрешность созданного РЭ. Поэтому в настоящее время проводится работа по усовершенствованию конструкции ослабителя и методики его калибровки с применением СИ более высокой точности, что позволит снизить его погрешность до уровней, не превышающих 0,1 %.

В результате в качестве эталонного первичного измерительного преобразователя для РЭ был выбран калориметрический градиентный преобразователь средней мощности оптического излучения Градиент-15ГП [6], так его рабочий диапазон 0,05—5 Вт обеспечивал возможность приёма этой единицы от ГПЭ согласно схеме рис. 1 с использованием 100-кратного ослабителя излучения. При практической реализации этой схемы использовали источник излучения NKT Potonics Koeras ADJUSTIRhf 1, работающий в диапазоне средней мощности 20—200 мВт при длине волны 1,55 мкм, и оптическая скамья 3 Fixed V-bench с рабочей длиной волны излучения 1,55 мкм. Для минимизации оптического взаимодействия преобразователя 8, имеющего входное окно диаметром 15 мм, с переходным световодом 6, его выходной участок заключают в узкую полированную трубку из нержавеющей стали, заканчивающуюся посадочным стержнем от стандартного оптического разъёма диаметром 2,5 мм.

В процессе калибровок РЭ экспериментально показано, что при работе с излучением на уровне 20 мВт средние квадратические отклонения результатов измерений средних значений коэффициентов преобразования средней мощности оптического излучения и постоянного электрического тока при 10 независимых наблюдениях не превышали соответственно 0,14 и 0,08 % и обеспечивали требуемую точность измерений. Последнее было достигнуто, в том числе, и в результате применения в составе РЭ высокоточной элект-

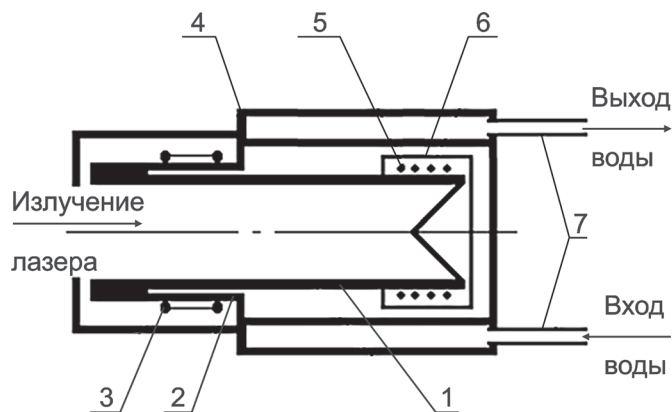


Рис. 2. Преобразователь Градиент-15ГП:

1 — поглощающая полость; 2 — теплопровод; 3 — термобатарея; 4 — корпус; 5 — электронагреватель; 6 — экран; 7 — штуцеры

роизмерительной аппаратуры, проведения измерительных процессов в соответствии с алгоритмами, учитывающими негативное влияние многочисленных факторов [3], а также реализации технических решений преобразователя Градиент-15ГП, базирующихся на упомянутых ранее принципах построения высокоточных преобразователей из состава государственных эталонов, возглавляющих поверочные схемы для СИ, работающих в области ВОСП [4] и лазеров [5].

Принципиальное решение калориметрического преобразователя средней мощности оптического излучения Градиент-15ГП поясняет рис. 2. Преобразователь имеет цилиндрическую поглощающую полость 1 с доньшком, выполненным в виде обратного конуса. В качестве материала приёмного элемента выбран рекристаллизованный графит марки «Ректим», получаемый методом термомеханической обработки при большом давлении и температуре и обладающий высокой стойкостью к излучению, высокой поглощательной способностью и стабильностью оптических характеристик. Теплопроводность указанного графита, ориентированная в осевом и радиальном направлениях приёмного элемента, близка соответственно к теплопроводности алюминия и меди, а температуропроводность превышает значения последних. При этом графитовая поверхность доньшка приёмного элемента характеризуется высокой зеркальной составляющей отражаемого от неё потока излучения, а на цилиндрические боковые поверхности нанесено поглощающее покрытие из эмали АК-243. Приёмный элемент с поглощающей полостью 1 запрессован в алюминиевый трубчатый теплопровод 2 с размещённой на нём дифференциальной термобатареей 3, за которой теплопровод переходит в корпус 4 преобразователя, омываемый и термостатируемый проточной жидкостью, поступающей от циркуляционного термостата. Преобразователь снабжён константовым электрическим нагревателем 5, расположенным вблизи доньшка приёмного элемента 1 и закрытым снаружи тепловым экраном 6. Приёмный элемент преобразователя защищён от внешних тепловых помех, возникающих в окружающей среде, с помощью термостатируемого корпуса 4 и концентрически расположенными вокруг него теплоизолирующей пенопластовой и прочной металлической оболочками.

В процессе работы преобразователя пучок коллимированного оптического излучения традиционного лазера или расходящийся пучок излучения, выходящий из торца световода, проходит через входное окно в полость приёмного элемента 1. Большая часть излучения попадает в область конического доньшка полости. Минимальная поглощательная способность графитовой поверхности доньшка, свойственная длинноволновому участку спектрального диапазона РЭ, составляет 84 %, поэтому 16 % воздействующего на доньшко излучения отражаются от него и рассеиваются по боковой цилиндрической поверхности полости 1, покрытой эмалью АК-243, поглощательная способность которой во всем рабочем спектральном диапазоне РЭ практически неизменна и составляет 0,98. Таким образом, доля излучения, отраженного уже от чернёной цилиндрической поверхности полости 1, даже без учёта его последующих переотражений и поглощений стенками, не превысит 0,32 %. При работе с расходящимися пучками излучения их слабые периферийные потоки, первоначально попадающие на цилиндрические стенки полости, также интенсивно поглощаются. Это позволило добиться поглощательной способности полости на уровне, близком 0,997, и обеспечить высокую стабильность оптических характеристик преобразователя в результате стойкости к интенсивному излучению графитового материала конического доньшка.

Тепловой поток, образующийся при поглощении излучения в зоне доньшка, направляется по трубчатым стенкам приемного элемента и корпуса 4 к его поверхности, омываемой термостатированной жидкостью, и уносится потоком последней. В результате термобатарея 3 реагирует на возникающий градиент температуры на охваченном ею участке теплопровода и вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный перепаду температуры на этом участке, вызванному протекающим по нему от доньшка к корпусу 4 тепловому потоку, а следовательно, и средней мощности воздействующего на преобразователь излучения.

Константовый электрический нагреватель 5 на наружной поверхности поглощающей полости вблизи доньшка позволяет проводить электрическую калибровку преобразователя методом замещения. В процессе калибровки мощность электрического тока преобразуется в нагревателе в тепловой поток, который затем направляется к корпусу 4. Тепловой экран 6 отгораживает от окружающей среды поверхности электрического нагревателя 5 и имеет хороший тепловой контакт с приёмным элементом, поэтому тепловые потери с поверхности электронагревателя перехватываются экраном и возвращаются в приёмный элемент. В результате при калибровке преобразователя практически вся электрическая энергия преобразуется в тепловую в зоне доньшка, т. е. в той же зоне, в которой происходит тепловое преобразование оптического излучения в процессе измерения его средней мощности. При этом порожденные электрическим и оптическим воздействиями тепловые потоки в полости приёмного элемента перетекают от доньшка к корпусу по единому теплопроводу, характеризующемуся высокой теплопроводностью. Это обеспечивает минимальный

нагрев приёмного элемента даже в наиболее удаленной его зоне (в зоне его доньшка) и, как следствие, минимизацию тепловых потерь с его поверхности через воздушный зазор в окружающую среду, даже несмотря на достаточно большую протяжённость теплопровода, определяемую выбранной глубиной поглощающей полости. При этом именно последний фактор, обеспечивший возможность увеличения расстояния от доньшка до охваченной термобатареей 3 зоны теплопровода, а также отмеченная ранее анизотропия и выбранная пространственная ориентация теплопроводности графитового материала «Ректим», эффективно способствуют достижению в этой зоне однородности плотности мощности по его сечению независимо от характера распределения тепловых источников по доньшку полости. В результате выходной сигнал термобатареи остается пропорциональным средней мощности разного вида энергетического воздействия при любом распределении тепловых источников по доньшку полости.

Таким образом, рассмотренная конструкция преобразователя обеспечила, во-первых, минимизацию неконтролируемых термобатареями тепловых потерь с поверхности его приёмного элемента в окружающую среду теплопроводностью, конвекцией и излучением, и, во-вторых, достижение высокой эквивалентности этих минимизированных потерь при оптическом и электрическом воздействиях на преобразователь. В результате это позволило для всех преобразователей типа Градиент-15ГП свести значение коэффициента эквивалентности замещения средней мощности оптического излучения известной мощностью постоянного электрического тока до уровней, не превышающих 1,005. Тем не менее, при каждой очередной поверке РЭ на стенде ГПЭ проводится оценка текущего значения коэффициента эквивалентности замещения как отношения определяемых в процессе поверки экспериментальным путем значений коэффициентов преобразования средней мощности излучения и электрического тока. Полученное значение заносится в очередное свидетельство о поверке в составе основных метрологических характеристик РЭ, а значения коэффициентов преобразования средней мощности излучения и электрического тока — в качестве справочных величин.

Рассматриваемый РЭ представляет комплекс СИ: эталонный преобразователь Градиент-15ГП; нановольтметр 34420А для измерений выходного сигнала преобразователя; система электрической калибровки преобразователя, состоящая из источника постоянного тока в виде прибора для калибровки вольтметров В1-13 и двух мультиметров 3458А для измерений напряжения и тока калибровки; циркуляционный термостат LOIP LT-124b для охлаждения и термостабилизации преобразователя; метеоскоп МЭС-200А для измерений температуры, давления и влажности окружающей среды, а также персональный компьютер для управления работой РЭ и обработки результатов измерений согласно заданной программе с автоматической выдачей соответствующих протоколов.

Заложенный в компьютерную программу управления работой РЭ алгоритм ведения измерительного процесса направлен в том числе и на повышение точности измерений

приращений выходных сигналов работающего под оптической или электрической нагрузкой преобразователя Градиент-15ГП путём очистки его аддитивного выходного сигнала от начальной (нулевой) составляющей [3]. Необходимость этого связана с тем, что работа калориметрического преобразователя, как правило, сопровождается дрейфом нулевого уровня выходного сигнала, особенно в процессе многократных измерений, а его прямой контроль с помощью измерительной аппаратуры при работе под нагрузкой становится невозможным. Тем не менее, такой контроль необходим и разработанный алгоритм позволяет при проведении многократных измерений аналитически оценивать и учитывать дрейф нулевого уровня выходного сигнала преобразователя, отнесённый к каждому конкретному моменту измерений каждого из его рабочих аддитивных сигналов. Это позволяет для каждого из многократных измерений выделить из этого сигнала его полезную составляющую, пропорциональную уровню средней мощности соответственно оптического или электрического воздействия. Алгоритмы ведения подобных измерительных процессов более подробно были рассмотрены в [3, 7].

Метрологические характеристики созданного РЭ представлены в таблице.

Метрологические характеристики РЭ

Характеристика	Значение
Средняя мощность оптического излучения, Вт	0,05—5,00
Длина волны излучения, нм	0,19—12,00
Длина волны калибровки измерителя, мкм	1,55
Погрешность Δ при $P = 0,95$, %	± 1
Расширенная неопределенность измерений $U(0,95)$, %	± 1
Постоянная времени измерителя, с, не более	25

Л и т е р а т у р а

1. Берман А. Ш., Весельницкий И. М., Козаченко М. Л., Кормаков А. А., Котюк А. Ф., Либерман А. А., Фромберг А. Б. Эталонный первичный измерительный преобразователь средней мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 1979. № 11. С. 38—39.

2. Козаченко М. Л. Повышение точности относительных измерений зонной характеристики широкоапертурных средств измерений энергетических параметров лазерного излучения // Метрология. 2005. № 11. С. 9—18.

3. Глазов А. И., Зотов А. В., Козаченко М. Л., Светличный А. Б., Тихомиров С. В. Одноканальная эталонная калориметрическая система для воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП // Метрология. 2015. № 3. С. 25—34.

4. 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.

5. ГОСТ 8.275—2007. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений энергии и средней мощности лазерного излучения.

6. Козаченко М. Л., Тихомиров С. В., Хатырев Н. П. Неселективный эталонный измеритель средней мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 2005. № 2. С. 32—38.

7. Глазов А. И., Зотов А. В., Козаченко М. Л., Светличный А. Б., Тихомиров С. В. Повышение точности воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП путём совершенствования алгоритмов и автоматизации измерительных процессов // Измерительная техника. 2014. № 7. С. 19—23.

Дата принятия 09.09.2015 г.