

Научная статья

УДК 681.7.08

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-35-40>

Прослеживаемость измерений энергетических параметров лазерного пучка

Александр Иванович Колпаков^{1✉}, Аркадий Михайлович Райцин², Михаил Владимирович Улановский³

^{1,3} Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

² Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

¹1978fox@mail.ru ✉, ²arcadiyram@rambler.ru, ³ulanovsky1946@mail.ru

Аннотация. Сформулирован концептуальный подход к прослеживаемости измерений энергии (мощности) лазерного пучка при калибровке средств измерений к эталонам, разработаны алгоритмы решения задач прослеживаемости и представлены технические реализации данных решений. Показано, что применение измерительного ослабителя является неотъемлемой частью схемы построения эталона, обеспечивающего прослеживаемость измерений энергии (мощности) лазерного пучка. Рассмотрено функционирование эталона при последовательной, ступенчатой и параллельной схемах его построения, обеспечивающее прослеживаемость к Государственному вторичному эталону единицы энергии импульсного лазерного излучения ГВЭ 2.1.ZZA.0095.2017 и Государственному первичному эталону единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28-2016. Определены особенности построения измерительных делителей для калибровки средств измерений малых и больших уровней энергии (мощности). Приведены алгоритмы комплектной калибровки средств измерений, имеющей преимущество по сравнению с поэлементной калибровкой.

Ключевые слова: метрология, передача единицы энергии (мощности), эталон, измерительный ослабитель, средства измерений, калибровка

Для цитирования: Колпаков А. И., Райцин А. М., Улановский М. В. Прослеживаемость измерений энергетических параметров лазерного пучка // Измерительная техника. 2022. № 1. С. 35–40. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-35-40>

Traceability of energy measurements laser beam parameters

Aleksandr I. Kolpakov^{1✉}, Arkady M. Raitsin², Michael V. Ulanovskii³

^{1,3} All-Russian Research Institute of Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

² Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

¹1978fox@mail.ru ✉, ²arcadiyram@rambler.ru, ³ulanovsky1946@mail.ru

Abstract. A conceptual approach to traceability of measurements of the energy (power) of a laser beam when calibrating measuring instruments to standards is formulated, algorithms for solving traceability problems are developed, and technical implementations of these solutions are presented. It is shown that the use of a measuring attenuator is an integral part of the scheme for constructing a standard that provides traceability of measurements of the energy (power) of the laser beam. The functioning of the standard with sequential, stepwise and parallel schemes of its construction is considered, which ensures traceability to the State secondary standard of the unit of energy of pulsed laser radiation GVE 2.1.ZZA.0095.2017 and the State primary standard of the unit of average power of laser radiation GET 28-2016. The features of the construction of measuring dividers for the calibration of measuring instruments of low and high levels of energy (power) have been determined. Algorithms for complete calibration of measuring instruments, which have an advantage over element-by-element calibration, are presented.

Keywords: metrology, transmission of a unit of energy (power), standard, measuring attenuator, calibration of measuring instruments

Введение. Для решения задач, связанных с различными областями применения лазеров, необходимы измерения энергетических параметров лазерных пучков в широком диапазоне. Рабочий диапазон используемых средств измерений (СИ) энергии (мощности) лазерного излучения превышает диапазон энергий (мощностей) эталонов. Поэтому для получения достоверных результатов измерений необходима их метрологическая прослеживаемость, т. е. полученный результат

должен быть соотнесён с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок СИ. Причём каждая калибровка вносит вклад в неопределённость измерений (ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»).

Прослеживаемость измерений должна обеспечивать возможность согласования уровней энергий (мощностей), определяемых работой СИ и воспроизводимых эталонами.

Цель исследования – разработка алгоритмов прослеживаемости измерений, основанных на применении в эталонах измерительных ослабителей, позволяющих проводить калибровку средств измерений при передаче им единицы энергии (мощности) лазерного излучения малых и больших уровней от Государственного вторичного эталона единицы энергии импульсного лазерного излучения ГВЭ 2.1.ZZA.0095.2017 и Государственного первичного эталона единицы средней мощности ГЭТ 28-2016.

Функциональная схема эталона и алгоритм калибровки СИ. Применяемые на практике методы калибровки СИ в большинстве случаев основаны на последовательной или параллельной схеме построения эталона. Важнейшим элементом такой схемы является делитель или ответвитель лазерного излучения. Такой элемент в общем случае представляет собой устройство, в котором поступающее на калибруемое СИ излучение источника может не только перераспределяться, но и ослабляться. Для решения задачи калибровки необходимо знать коэффициенты деления и пропускания (ослабления) с заданной погрешностью. Данное устройство называется измерительным ослабителем (ГОСТ 24453-80). На рис. 1 представлены упрощенные последовательная и параллельная схемы построения эталона с измерительным ослабителем, реализующим и ответвление (деление), и ослабление излучения. Если ослабитель как устройство отсутствует, то будем считать коэффициенты пропускания K_O , K_{O^*} соответственно прямого и отраженного лазерных пучков равными единице (O , O^* – ослабители прямого и отраженных пучков).

Наиболее простой случай имеет место, если эталон и СИ работают в энергетических диапазонах одного порядка. В этом случае дополнительного ослабления излучения не требуется ($K_O = K_{O^*} = 1$) и измерительный ослабитель выполняет только функцию ответвления пучка. Передача единицы может производиться по последовательной схеме с применением измерительного ослабителя и контрольного

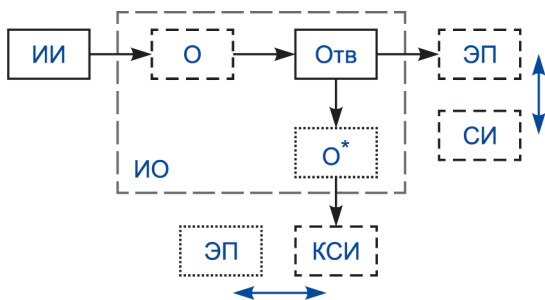


Рис. 1. Последовательная и параллельная схемы калибровки средств измерений с измерительным ослабителем:

ИО – измерительный ослабитель; ИИ – источник излучения; О, O^* – ослабители; Отв – ответвитель; КСИ, СИ – контрольное и калибруемое средства измерений соответственно; ЭП – эталонный преобразователь

Fig. 1. Serial and parallel schemes of calibration of measuring instruments with a measuring attenuator:

RS – radiation source; A, A^* – attenuators; CMI – control measuring instrument; RT – reference transducer; MI – calibrated measuring instrument

СИ (КСИ) [1], к которому на время калибровки СИ переходят функции эталонного преобразователя (ЭП). Работа эталона в такой схеме предусматривает два основных режима: передача единицы энергии (мощности) КСИ от ЭП; калибровка СИ по КСИ. При этом предполагается, что диапазоны измерений ЭП, КСИ и СИ частично перекрываются. Единица энергии (мощности) передаётся в заданных точках линейного участка энергетического диапазона СИ, применяемых при калибровке. Передача единицы по параллельной схеме осуществляется при одновременной подаче оптической энергии (мощности) в ЭП и СИ с использованием измерительного ослабителя [2]. Выбор схемы измерения определяется конкретно решаемой задачей прослеживаемости.

Рассмотрим основные особенности применения обеих схем для случая $K_O = K_{O^*} = 1$. Для последовательной схемы (см. рис. 1) запишем сигналы на выходах СИ, участвующих в процессе передачи единицы в двух сериях из n измерений, ЭП $Q_{ЭП}(i)$, КСИ $u_{КСИ}(i)$, $u_{КСИ}^k(i)$, СИ $u_{СИ}^k(i)$, $i = 1, 2, \dots, n$

$$\left. \begin{aligned} Q_{ЭП}(i) &= Q(i)K_{пр} + \xi_1(i); \\ u_{КСИ}(i) &= Q(i)K_{отр}K_{КСИ} + \xi_2(i); \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

$$\left. \begin{aligned} u_{СИ}^k(i) &= Q^k(i)K_{пр}K_{СИ} + \tilde{\xi}_1(i); \\ u_{КСИ}^k(i) &= Q^k(i)K_{отр}K_{КСИ} + \tilde{\xi}_2(i); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где $Q(i)$ – энергия (мощность) источника излучения в первой серии измерений; $K_{пр}$ – коэффициент пропускания ответвителя; $K_{отр}$ – коэффициент отражения излучения от ответвителя; $K_{КСИ}$ – коэффициент преобразования КСИ; $\xi_1(i)$, $\xi_2(i)$ и $\tilde{\xi}_1(i)$, $\tilde{\xi}_2(i)$ – погрешности измерений в первой и второй сериях измерений соответственно; $Q^k(i)$ – энергия (мощность) источника излучения при калибровке СИ во второй серии измерений; $K_{СИ}$ – коэффициент преобразования СИ.

Таким образом, результатом проведения измерений (энергии) мощности являются четыре массива выходных сигналов (1), (2) $Q_{ЭП}(i)$, $u_{КСИ}(i)$, $u_{КСИ}^k(i)$, $u_{СИ}^k(i)$, $i = 1, 2, \dots, n$.

В соответствии с методикой, изложенной в [3], можно показать, что наиболее вероятная оценка определения $\hat{K}_{СИ}$, являющаяся результатом калибровки СИ в последовательной схеме, приводит к выражению

$$\hat{K}_{СИ} = \hat{K}_0 \left(\hat{U}_{СИ}^k / \hat{U}_{КСИ}^k \right); \quad (3)$$

$$\hat{K}_0 = (K_{КСИ} / K_d) = \left(\hat{U}_{КСИ} / \hat{Q}_{ЭП} \right); \quad K_d = K_{пр} / K_{отр};$$

$$\hat{U}_{СИ}^k = n^{-1} \sum_{i=1}^n u_{СИ}^k(i); \quad \hat{U}_{КСИ}^k = n^{-1} \sum_{i=1}^n u_{КСИ}^k(i);$$

$$\hat{U}_{КСИ} = n^{-1} \sum_{i=1}^n u_{КСИ}(i); \quad \hat{Q}_{ЭП} = n^{-1} \sum_{i=1}^n Q_{ЭП}(i),$$

где K_d – коэффициент деления ответвителя.

Из (3) следует прослеживаемость измерений от СИ к ЭП через оценку коэффициента $\hat{K}_0 = \hat{U}_{КСИ} / \hat{Q}_{ЭП}$, представляющего результат работы первого режима эталона при передаче единицы от ЭП к КСИ.

Для параллельной схемы (см. рис. 1), в которой ЭП расположен на пути отражённого от ответвителя излучения, также можно записать сигналы на выходах средств измерений, участвующих в процессе передачи единицы в одной серии из n измерений ЭП и СИ соответственно

$$\left. \begin{aligned} Q_{ЭП}^k(i) &= Q^k(i) K_{отр} + \xi_1(i); \\ u_{СИ}^k(i) &= Q^k(i) K_{пр} K_{СИ} + \xi_2(i); \\ i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Из (4) следует равенство

$$\hat{K}_{СИ} = K_d^{-1} (\hat{U}_{СИ}^k / \hat{Q}_{ЭП}^k), \quad (5)$$

где $\hat{Q}_{ЭП}^k = n^{-1} \sum_{i=1}^n Q_{ЭП}^k(i)$.

Согласно выражению (5) применение параллельной схемы в отличие от последовательной схемы (см. (3)) требует самостоятельного определения неизвестного коэффициента деления.

Рассмотрим случай существенного отличия диапазонов измерений эталона и СИ, тогда измерительный ослабитель должен содержать дополнительный ослабитель излучения O или O^* (см. рис. 1). При этом в измерительном процессе калибровки необходимо учитывать или определять коэффициент ослабления. Введение измерительного ослабителя в схему передачи единицы энергии (мощности) является основой для прослеживаемости измерений от СИ к эталонам, а учёт или определение значения коэффициента ослабления – необходимое условие того, чтобы ослабитель можно было отнести к классу измерительных. Так, в [4] рекомендовано применять расчётные ослабители, но, как показывает практика, их изготовление может привести к жёстким технологическим ограничениям, нарушение которых изменяет расчётные соотношения. Существуют различные ослабители лазерного излучения, их классификация приведена в [4]. Для того чтобы ослабитель из состава эталона принадлежал к классу измерительных, необходима методика его калибровки. В [5] описана калибровка СИ параметров лазерного излучения в широких пределах с набором ослабителей, при которой необходимо определять коэффициент пропускания каждого используемого ослабителя, что усложняет алгоритм работы и является источником погрешностей.

Более перспективным решением является комплектная калибровка ЭП в составе эталона, позволяющая рассматривать измерительный ослабитель и ЭП как единое целое. При таком подходе не требуется отдельно учитывать составляющие суммарной погрешности измерений, вносимые отдельными элементами эталона – ослабителем мощности, ЭП, средством регистрации сигнала. При калибровке используется последовательно-параллельная (ступенчатая схема) ослабления излучения, применяемая в случаях, когда одна ступень ослабления не позволяет получить

необходимый результат [2, 6, 7]. Однако в упомянутых работах отсутствует обоснование прослеживаемости измерений малых или больших уровней энергии (мощности) от СИ к эталону.

Функциональная схема эталона и алгоритм калибровки СИ малых уровней энергии (мощности). Особенностью калибровки СИ мощности (энергии) малых уровней является необходимость устанавливать ослабитель (O) на пути излучения, поступающего в СИ, а алгоритм калибровки должен обеспечивать прослеживаемость к эталону. При калибровке таких СИ удобно применять ступенчатую схему передачи единицы, где число N ступеней зависит от числа необходимых диапазонов ослабления. При этом предполагается, что каждый диапазон измерений находится в области линейности применяемых СИ. В работе [7] упомянута, но не обоснована ступенчатая схема калибровки. Рассмотрим схему такой калибровки для малых уровней энергии (мощности) на примере трёх ступеней ослабления (рис. 2, а). Работа эталона, как описано выше, также имеет два режима. В диапазоне 0 (см. рис. 2, б) алгоритм калибровки повторяет описанную выше схему. Сначала излучение от источника через ослабитель O_j , $j=0$, т.е. ослабитель O_0 (что соответствует полному пропусканию излучения) подаётся на ЭП, а отражённая от ответвителя часть излучения поступает на КСИ0 (см. рис. 2, а). Проводят серию измерений энергии (мощности) на входе ЭП и электрических сигналов на выходе КСИ0. Далее ЭП заменяют на СИ и по результатам измерений КСИ0 и СИ определяют коэффициент преобразования последнего, что соответствует его работе в диапазоне 0. Результат калибровки определяется оценкой (3).

В диапазоне I работы СИ диапазоны линейности измерений ЭП и КСИ1 до (диапазон 0) и после (диапазон I) ослабителя должны частично перекрываться (см. рис. 2, б). Проходящее излучение от источника через ослабитель O_1 поступает на ЭП, а отражённая от ответвителя часть излучения – на КСИ1. Производится серия измерений энергии (мощности) на входе ЭП и электрических сигналов на выходе КСИ1. После установки СИ на место ЭП осуществляется новая серия измерений электрических сигналов на выходах КСИ1 и СИ.

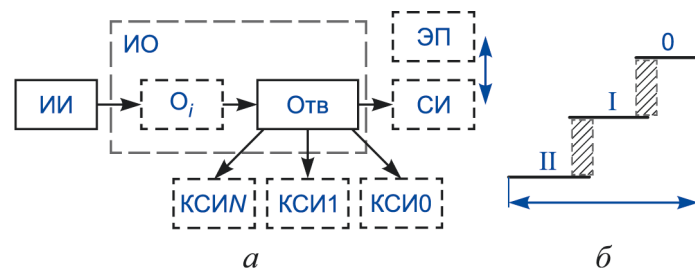


Рис. 2. Ступенчатая схема калибровки средств измерений (а) и диапазоны измерений при ступенчатой калибровке (б): 0, I, II – диапазоны измерений соответственно без ослабителя и с ослабителями O_1 , O_2 ; остальные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 2. Step scheme for calibration of measuring instruments (a) and measuring ranges for step calibration (b): 0 – measurement range without an attenuator; I – measurement range with an A_1 attenuator; II – a range with an A_2 attenuator; the other designations are the same as in Fig. 1

В диапазоне II работы СИ диапазоны линейности измерений КСИ1, КСИ2 до (диапазон I) и после (диапазон II) ослабителя должны частично перекрываться. Отражённая от ответвителя часть излучения источника, проходящего через ослабитель O_2 , поступает на КСИ1 и КСИ2. Производится серия измерений энергии (мощности) электрических сигналов на выходах КСИ1 и КСИ2. После установки СИ на место ЭП осуществляется новая серия измерений электрических сигналов на выходах КСИ2 и СИ и производится калибровка СИ.

Для диапазона I выражения (1), (2) можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} Q_{ЭП}^I(i) &= Q_I(i) K_{O_1} K_{пр} + \xi_1^I(i); \\ u_{КСИ1}^I(i) &= Q_I(i) K_{O_1} K_{отр} K_{КСИ1} + \xi_2^I(i); \\ i &= 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{СИ}^K(i) &= Q_I^K(i) K_{O_1} K_{пр} K_{СИ} + \tilde{\xi}_1^I(i); \\ u_{КСИ1}^K(i) &= Q_I^K(i) K_{O_1} K_{отр} K_{КСИ1} + \tilde{\xi}_2^I(i); \\ i &= 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $Q_I(i)$, $Q_I^K(i)$ – энергия (мощность) источника излучения соответственно при работе эталона и при калибровке СИ в диапазоне I; K_{O_1} – коэффициент пропускания ослабителя в диапазоне I; $K_{КСИ1}$ – коэффициент преобразования КСИ1; $\xi_1^I(i)$, $\xi_2^I(i)$ и $\tilde{\xi}_1^I(i)$, $\tilde{\xi}_2^I(i)$ – погрешности измерений соответственно в первой и второй сериях в диапазоне I.

Для диапазона II выражения (1), (2) примут вид

$$\left. \begin{aligned} u_{КСИ2}^{II}(i) &= Q_{II}(i) K_{O_2} K_{отр} K_{КСИ2} + \xi_1^{II}(i); \\ u_{КСИ1}^{II}(i) &= Q_{II}(i) K_{O_2} K_{отр} K_{КСИ1} + \xi_2^{II}(i); \\ i &= 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{СИ}^K(i) &= Q_{II}^K(i) K_{O_2} K_{пр} K_{СИ} + \tilde{\xi}_1^{II}(i); \\ u_{КСИ2}^K(i) &= Q_{II}^K(i) K_{O_2} K_{отр} K_{КСИ2} + \tilde{\xi}_2^{II}(i); \\ i &= 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $Q_{II}(i)$, $Q_{II}^K(i)$ – энергия (мощность) источника излучения соответственно при работе эталона и при калибровке СИ в диапазоне II; K_{O_2} – коэффициент пропускания ослабителя в диапазоне II; $K_{КСИ2}$ – коэффициент преобразования КСИ2; $\xi_1^{II}(i)$, $\xi_2^{II}(i)$ и $\tilde{\xi}_1^{II}(i)$, $\tilde{\xi}_2^{II}(i)$ – погрешности измерений соответственно в первой и второй сериях в диапазоне II.

С учётом выражений (6)–(9) запишем оптимальные оценки коэффициентов преобразования калибруемых СИ в диапазонах I, II:

$$\begin{aligned} \hat{K}_{СИ}^I &= \hat{K}_1 (\hat{U}_{СИ}^K / \hat{U}_{КСИ1}^K); \quad \hat{K}_{СИ}^{II} = \hat{K}_2 \hat{K}_1 (\hat{U}_{СИ}^K / \hat{U}_{КСИ2}^K); \\ \hat{K}_1 &= \hat{U}_{КСИ1}^I / \hat{Q}_{ЭП}^I; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\hat{K}_2 = \hat{U}_{КСИ2}^{II} / \hat{U}_{КСИ1}^{II}, \quad (11)$$

где $\hat{K}_1$, $\hat{K}_2$ представляют результаты передач единицы от ЭП к КСИ1 в диапазоне I и от КСИ1 к КСИ2 в диапазоне II соответственно (см. рис. 2);

$$\hat{U}_{КСИ1,2}^K = n^{-1} \sum_{i=1}^n u_{КСИ1,2}^K(i); \quad \hat{U}_{КСИ1}^I = n^{-1} \sum_{i=1}^n u_{КСИ1}^I(i);$$

$$\hat{U}_{КСИ2}^{II} = n^{-1} \sum_{i=1}^n u_{КСИ2}^{II}(i); \quad \hat{U}_{КСИ1}^{II} = n^{-1} \sum_{i=1}^n u_{КСИ1}^{II}(i);$$

$$\hat{Q}_{ЭП}^I = n^{-1} \sum_{i=1}^n Q_{ЭП}^I(i).$$

Таким образом, прослеживаемость измерений к эталону в диапазонах I, II определяются коэффициентами $\hat{K}_1$ и произведением $\hat{K}_2 \hat{K}_1$ соответственно.

Данная методика может быть распространена на большее число ступеней ослабления, определяемое чувствительностью и линейностью применяемых СИ. Оценка коэффициента преобразования СИ в диапазоне N определяется выражением

$$\hat{K}_{СИ} = \hat{K}_N \hat{K}_{N-1} \dots \hat{K}_S \dots \hat{K}_2 \hat{K}_1 (\hat{U}_{СИ}^K / \hat{U}_{КСИН}^K),$$

где $\hat{U}_{КСИН}^K = n^{-1} \sum_{i=1}^n u_{КСИН}^K(i)$; значения $\hat{K}_S$, $S = 1, 2, \dots, N$, получаются обобщением выражений (10), (11) на N ступеней ослабления.

Таким образом, в рамках предложенной методики можно калибровать СИ без определения коэффициентов пропускания отдельных ослабителей, входящих в состав эталона, вследствие первого режима работы эталона (передаче единицы энергии (мощности) контрольным средствам измерений эталона от ЭП). Другими словами, первый режим работы эталона может рассматриваться как комплектная калибровка измерительного ослабителя в составе эталона, т. е. в полном комплекте составных частей эталона без нарушения взаимосвязи между ними. Погрешности, которые при этом определяют, рассматривают как погрешности, свойственные эталонному СИ как единому целому. В [8] приведена функциональная схема вторичного эталона для калибровки СИ, обеспечивающего работу на четырёх ступенях ослабления на базе фотоприёмных устройств в диапазоне 10^{-12} – $5 \cdot 10^{-1}$ Дж.

Функциональная схема вторичного эталона и алгоритм калибровки СИ больших уровней мощности. Особенностью калибровки СИ энергии (мощности) больших уровней является необходимость устанавливать ослабитель O^* на пути излучения, отражённого от ответвителя и поступающего на ЭП (см. рис. 1). При этом алгоритм калибровки должен обеспечивать прослеживаемость измерений к эталону.

Существующий ГЭТ 28-2016 обеспечивает воспроизведение и передачу вторичному эталону единицы мощности лазерного излучения в диапазоне мощностей только от $1 \cdot 10^{-3}$ до 2 Вт. Для решения задач, связанных с различными современными применениями лазеров, необходимо существенно повысить верхнюю границу воспроизводимой

и передаваемой СИ мощности от вторичного эталона. Как показывает практика, верхняя граница диапазона измерения мощности отражённого излучения, поступающего на ЭП, должна составлять не менее 20 Вт.

Во вторичном эталоне применяется термоэлектрический преобразователь излучения и мощность излучения, поступающего на него, также не может превышать 2 Вт. Последнее определяется необходимостью обеспечения малой погрешности измерений мощности преобразователем излучения с сохранением высокой степени линейности его функции преобразования в рабочем диапазоне до 2 Вт. Также необходимо согласование верхнего предела измерений с верхней границей мощности, воспроизводимой ГЭТ 28-2016 (2 Вт), осуществляющего передачу преобразователю единицы мощности.

Существующие методы передачи единицы мощности, предназначенные для метрологической аттестации эталонов, поверочных установок и калибровок СИ, основанные на рассмотренных выше последовательной или параллельной схемах, приводят к положительным результатам при сравнительно невысоких уровнях мощности излучения, но не позволяют передавать единицу мощности больших уровней. Требуется либо разработка нового ЭП, которая при высокоинтенсивном излучении сопряжена с трудностями по сохранению его метрологических характеристик и получения единицы мощности от ГЭТ 28-2016, либо создание алгоритма прослеживаемости измерений в существующей поверочной схеме.

Решение последней задачи может быть осуществлено в параллельной схеме передачи единицы мощности (рис. 3). Применение измерительного ослабителя и разработка специального алгоритма комплектной калибровки позволяет обеспечить прослеживаемость измерений к первичному эталону. Для определения коэффициента преобразования СИ при параллельной схеме построения эталона справедливо выражение (5), дополненное множителем – неизвестным коэффициентом ослабления $\mu_{O^*} = K_{O^*}^{-1}$ ослабителя O^*

$$\hat{K}_{СИ} = (\mu_{O^*} K_d)^{-1} (\hat{U}_{СИ}^k / \hat{Q}_{ЭП}^k).$$

Алгоритм калибровки должен дать оценку величине $\mu_{O^*} K_d$.

Одним из решений задачи является поэлементная калибровка измерительного ослабителя в составе эталона. Так, в [9] в качестве измерительного ослабителя мощности в эталоне предлагается использовать механический модулятор, который содержит два соосных диска с отверстиями, вращаемых электродвигателем. Ослабитель рассматривается как самостоятельный блок, входящий в эталон, и для определения коэффициента пропускания (ослабления) калибруется независимо и отдельно от измерительного преобразователя излучения. Это приводит к существенной погрешности калибровки, связанной с неточностью изготовления отверстий диска, и как следствие, – к большой суммарной погрешности измерений.

В упрощённой функциональной схеме вторичного эталона средней мощности излучения с измерительным ослабителем,

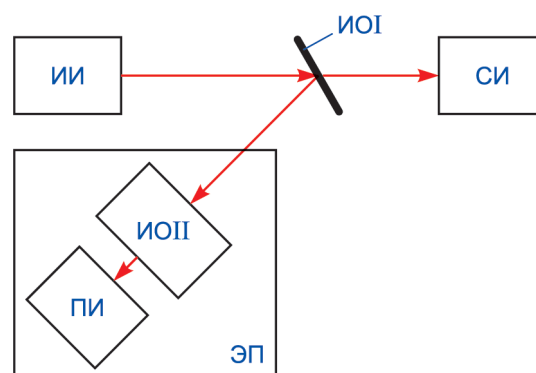


Рис. 3. Функциональная схема вторичного эталона единицы средней мощности излучения больших уровней с измерительными ослабителями: *ИОИ*, *ИОИИ* – измерительные ослабители первой и второй ступеней соответственно; *ПИ* – преобразователь излучения; остальные обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 3. Functional diagram of the secondary standard for the unit of average radiation power of high levels with measuring attenuators:

MAI – measuring attenuator of the first stage; *MAII* – measuring attenuator of the second stage; *RC* – radiation converter; the other designations are the same as in Fig. 1

позволяющим ослабить излучение в $\mu_{O^*} K_d \approx 1000 \dots 1500$ раз и обеспечить прослеживаемость измерений к ГЭТ 28-2016, есть две ступени ослабления (см. рис. 3). С помощью измерительного ослабителя первой ступени *ИОИ* (конструктивно выполненного в виде оптического клина) по сравнительно небольшой мощности излучения, отражённого от просветлённой поверхности передней грани клина, определяют мощность поступающего на *СИ* излучения. Коэффициент деления первой ступени K_d составляет около 100–150, его определение подробно описано в [3]. В состав *ЭП* вторичного эталона включён оптико-механический измерительный ослабитель второй ступени *ИОИИ*. Данный ослабитель с коэффициентом ослабления около 10 выполнен в виде вращающегося диска с варьируемым по ширине проходным окном и содержит термоэлектрический преобразователь излучения. Таким образом *ЭП* представляет собой цельную конструкцию ослабителя и преобразователя излучения.

Рассмотрим способ комплектной калибровки такого *ЭП* (см. рис. 3). *ИОИИ* имеет рабочий и нерабочий режимы функционирования. В нерабочем состоянии питание на электродвигатель *ИОИИ* не подаётся, проходное окно находится на оптической оси излучения и ослабления не происходит. В рабочем режиме подаётся питание на электродвигатель *ИОИИ*, диск вращается с постоянной скоростью – излучение ослабляется. В нерабочем режиме *ИОИИ* диапазон работы *ЭП* полностью определяется диапазоном работы термоэлектрического преобразователя излучения (от $1 \cdot 10^{-3}$ до 2 Вт), а в рабочем – может быть расширен до 20 Вт. Для этого *ЭП* предварительно калибруют с помощью ГЭТ 28-2016. В нерабочем режиме *ИОИИ* (при выключенном электродвигателе) от ГЭТ 28-2016 на *ЭП* в выбранной точке диапазона измерений мощности $1 \cdot 10^{-3} \dots 2$ Вт подают оптическое излучение мощностью $P_{ЭП}(i)$ и n раз измеряют соответствующие сигналы $U_{ЭП}(i)$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Средние значения результатов измерений $U_{ЭП}(i)$ и $P_{ЭП}(i)$ связаны соотношением

$$n^{-1} \sum_{i=1}^n U_{ЭП}(i) = n^{-1} K_{ЭП} \sum_{i=1}^n P_{ЭП}(i), \quad (12)$$

где $K_{ЭП}$ – коэффициент преобразования ЭП по оптическому излучению.

В рабочем режиме ИОИИ от ГЭТ 28-2016 на ЭП подают оптическое излучение $P_{ЭП}(i)$ той же мощности (в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ –2 Вт) и измеряют соответствующие выходные сигналы $U_{ЭП}^*(i)$, $i=1, 2, \dots, n$. В рабочем и нерабочем режимах ИОИИ устанавливают прямые показания мощности на выходе ЭП в ваттах.

Средние значения результатов измерений $U_{ЭП}^*(i)$ и $P_{ЭП}(i)$ связаны соотношением

$$n^{-1} \sum_{i=1}^n U_{ЭП}^*(i) = n^{-1} K_{ЭП} K_{O^*} \sum_{i=1}^n P_{ЭП}(i). \quad (13)$$

Из (12), (13) получим усреднённую оценку коэффициента ослабления ИОИИ $\hat{\mu}_{O^*}$, вычисляемую по результатам измерений сигналов на выходе ЭП в его нерабочем и рабочем режимах:

$$\hat{\mu}_{O^*} = \sum_{i=1}^n U_{ЭП}(i) / \sum_{i=1}^n U_{ЭП}^*(i).$$

Параметры регулируемого ослабления ИОИИ за счёт варьируемого по ширине проходного окна диска выбирают так, чтобы мощность на входе преобразователя после ослабления излучения находилась в интервале $1 \cdot 10^{-3}$ –0,2 Вт. Затем ЭП помещают в схему вторичного эталона единицы мощности. Непосредственно в ходе калибровки на вторичный эталон в рабочем режиме ИОИИ подают высокоинтенсивное излучение источника ИИ. Одна часть излучения проходя через ИОИ попадает на калибруемое СИ, другая часть (мощностью до 20 Вт) отражается от ИОИ на ЭП и измеряется преобразователем излучения ПИ $P'_{ЭП}$. Мощность излучения, поступающего на вход ЭП, определяется как $P_{ЭП} = \hat{\mu}_{O^*} P'_{ЭП}$, а мощность излучения на входе калибруемого СИ составляет $P_{вх} = P'_{ЭП} \hat{\mu}_{O^*} K_d$, что решает задачу калибровки.

Закключение. Показано, что неотъемлемой составляющей эталонов единиц энергии (мощности) лазерного пучка является измерительный ослабитель, который с представленными алгоритмами комплектной калибровки СИ обеспечивает прослеживаемость измерений к эталонам в широком диапазоне энергии (мощности). Применение ступенчатой или параллельной схемы калибровки позволяет расширить диапазон измерений соответственно малых или больших уровней энергии (мощности).

Список источников

1. Иванов В. С., Золотаревский Ю. М., Котюк А. Ф. и др. Основы оптической радиометрии / Под ред. проф. А. Ф. Котюка. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 542 с.
2. Тимофеев Е. И. Новая структура государственного первичного эталона единиц средней мощности и энергии лазерного

излучения // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Метрология и измерительная техника» (Метрология 2014), Харьков, 15–17 октября 2014. С. 272–278.

3. Колпаков А. И., Райцин А. М., Улановский М. В. Метрологические характеристики измерительного делителя мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 2020. № 9. С. 24–30. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-9-24-30>

4. Воронков Г. Л. Ослабители оптического излучения. Л.: Машиностроение, 1980. 158 с.

5. Кувалдин Э. В., Шульга А. А. Калибровка измерителей мощности оптического излучения в широких пределах // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 12. С. 15–20. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-15-20>

6. Мальцева Н. К. Разработка и исследование ослабителей оптического излучения: автореф. дис. канд. техн. наук (ИТМО, СПб, 2005).

7. Dagang Xu, Sihua Mao, Metrological Guarantee for Laser Safety, *Intern. Sump. On the Safe Application of Laser Beams. ISSA-Section Electricity*, Beijing, 10–14 May, 1988, pp. 21–23.

8. Вторичный эталон единицы энергии лазерного излучения для калибровки и поверки лазерных джоульметров: пат. RU 2626064 С1 / А. М. Райцин, М. В. Улановский // Изобретения. Полезные модели. 2017. № 21.

9. Котюк А. Ф., Загорский Я. Т., Кузнецов А. А., Улановский М. В. Образцовое средство измерений средней мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 1983. № 9. С. 49–51.

References

1. Ivanov V. S., Zolotarevskii Yu. M., Kotyuk A. F., et. al., *Osnovy opticheskoi radiometrii*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 542 p. (In Russ.)
2. Timofeev E. I., *Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference "Metrologiya i izmeritel'nayatekhnika" (Metrologiya 2014)*, Khar'kov, 15–17 October 2014, pp. 272–278. (In Russ.)
3. Kolpakov A. I., Raitsin A. M., Ulanovskii M. V., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 9, pp. 700–707. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01842-3>
4. Voronkov G. L., *Oslabiteli opticheskogo izlucheniya*, Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980, 158 p. (In Russ.)
5. Kuvaldin E. V., Shulga A. A., Wide-range calibration of optical radiation power meters, *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, no. 12, pp. 15–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-15-20>
6. Mal'tseva N. K., Extended abstract of candidate's dissertation in Technical Sciences (ITMO, SPb., 2005).
7. Dagang Xu, Sihua Mao, Metrological Guarantee for Laser Safety, *Intern. Sump. On the Safe Application of Laser Beams. ISSA-Section Electricity*, Beijing, 10–14 May, 1988, pp. 21–23.
8. Raitsin A. M., Ulanovskii M. V., Patent RU 2626064 C1, *Byull. Izobret.*, no. 21 (2017). (In Russ.)
9. Kotyuk A. F., Zagorskii Ya. T., Kuznetsov A. A., Ulanovskii M. V., *Measurement Techniques*, 1983, vol. 26, no. 9, pp. 753–756. <https://doi.org/10.1007/BF00832417>

Статья поступила в редакцию 20.09.2021; одобрена после рецензирования 17.12.2021; принята к публикации 20.12.2021.
The article was submitted 20.09.2021; approved after reviewing 17.12.2021; accepted for publication 20.12.2021.