

КАЛИБРОВКА ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.М. Балабан¹, К.И. Мунтян², Е.П. Тимофеев¹

¹ Національний науковий центр "Інститут метрології", м. Харків, Україна, evgen.timofeev@metrology.kharkov.ua

² Харківський національний університет ім. В.М. Каразіна, Україна, k.i.muntean@karazin.ua

Аннотация

Люминесцентные измерители энергии лазерного излучения относятся к измерителям проходного типа и отличаются рядом уникальных характеристик - высокой устойчивостью к действию мощного оптического излучения, быстродействием, широким динамическим диапазоном измеряемых энергий, большой линейной апертурой. Эти качества обусловили широкое применение люминесцентных измерителей энергии для аттестации различных лазерных систем наземного и бортового базирования.

В статье изложена процедура калибровки модернизированного люминесцентного измерителя энергии лазерного излучения, то есть процесс экспериментального определения конструкторской константы измерителя и величины ее неопределенности.

Калибровка проводилась по методике калибровки МКУ 11-379: 2016 на государственном первичном эталоне единиц средней мощности и энергии лазерного излучения ДЕГУ 11-04-12 с применением дополнительного лазерного излучателя и приемников типа ПВДЦ-2.

Статистической обработкой экспериментальных результатов для модернизированного люминесцентного измерителя энергии определена константа измерителя, величина неопределенности которой при коэффициенте охвата 2 составляет не более 5%.

Ключевые слова: Лазерное излучение; измеритель энергии; калибровка

Введение

Измерение энергии излучения является одним из наиболее востребованных видов измерений параметров лазеров. К настоящему времени разработан большой парк средств измерений, реализующих различные принципы измерений, такие как болометрический, фотоэлектрический, пондеромоторный, калориметрический и т.п.

Люминесцентный измеритель энергии излучения импульсных лазеров выделяется из линейки измерителей других типов рядом уникальных характеристик [1]. В частности, ему присущи:

— высокая стойкость к воздействию мощного лазерного излучения вплоть до $10^8 \dots 10^9$ Вт/см² (в зависимости от типа приемного элемента);

— динамический диапазон до $10^6 \dots 10^8$ (в зависимости от модификации измерителя);

— высокое быстродействие (длительность процесса измерения 20 ... 60 мс в зависимости от модификации измерителя);

— линейная апертура от 20 мм до 500 мм (в зависимости от модификации измерителя);

Эти качества обусловили широкое применение люминесцентных измерителей энергии для аттестации различных лазерных систем наземного и бортового базирования.

Типичная конструкция люминесцентного измерителя энергии включает следующие основные элементы [2]:

— приемный элемент, выполненный из материала, в котором импульс лазерного излучения возбуждает экспоненциально затухающий импульс резонансной люминесценции;

— интегрирующая камера, выполненная из световозвращающего стекла;

— фотоэлектрическое пороговое устройство, преобразующее экспоненциальный импульс люминесценции в прямоугольный электрический импульс;

— измеритель длительности прямоугольных электрических импульсов, прокалиброванный в единицах энергии.

Общий вид оптических головок измерителя энергии излучения приведен на рис. 1.



Рис. 1. Оптические головки люминесцентного измерителя энергии лазерного излучения с апертурами 20 мм и 500 мм

С целью снижения неопределенности результатов измерений как за счет уменьшения влияния отдельных источников погрешностей, так и за счет уменьшения количества функциональных узлов, каждый из которых вносит свой вклад в бюджет неопределенности, измеритель энергии был модернизирован. Базовая конструкция была изменена следующим образом:

— в приемный элемент внесена пространственная диффузно-рассеивающая неоднородность, позволяющая снизить для него лучевую нагрузку;

— сопротивление нагрузки фотоприемного устройства уменьшено на два порядка и имеет величину 1,0 Ом, вследствие чего снижена нелинейность его световой характеристики;

— пороговое устройство и измеритель длительности

ности электрических импульсов заменены на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и компьютер с соответствующим программным обеспечением.

Преимуществом модернизированного измерителя энергии является прямое определение функциональной зависимости интенсивности люминесценции приемного элемента от времени. Знание этой зависимости дает возможность получить за один цикл измерений значительно больше данных, меняя расчетный порог срабатывания фотоприемного устройства и привлекая таким образом больше информации о неопределенности результата измерений, обусловленной различными трудно учитываемыми факторами.

Калибровка люминесцентного измерителя энергии лазерного излучения заключается в экспериментальном определении конструкторских констант прибора, а именно, постоянной времени затухания люминесценции приемного элемента и коэффициента пропорциональности между длительностью импульса люминесценции на заданном уровне и логарифмом относительной величины измеряемой энергии излучения.

Целью настоящей работы является оценка точности определения конструкторских констант модернизированного люминесцентного измерителя энергии методом калибровки в нормальных условиях.

Уравнение измерения

Общепризнано, что основой для разработки методик выполнения измерений и анализа точности их результатов является уравнение измерений [3 – 5].

Для получения уравнения измерения построим математическую модель процессов, протекающих в приемном элементе измерителя энергии. Длительность процесса возбуждения активных центров приемного элемента будем считать бесконечно малой. В начальный момент времени $t = 0$ люминесценции еще нет, а количество возбужденных активных центров n_0 максимально. Далее начинается процесс уменьшения количества возбужденных активных центров n вследствие их спонтанного высвечивания. Количество центров, высвечивающихся в текущий момент времени, а стало быть, и количество возникающих фотонов q , прямо пропорционально текущему количеству возбужденных центров и обратно пропорционально времени жизни возбужденного состояния T . Одновременно идет процесс перепоглощения спонтанно излученных фотонов невозбужденными активными центрами. Количество перепоглощенных фотонов прямо пропорционально текущему количеству фотонов, показателю поглощения и скорости распространения излучения в приемном элементе. Кроме того, за счет интегрирующей камеры время жизни фотона Θ в приемном элементе увеличивается, что способствует затягиванию процесса люминесценции.

Указанные явления описываются системой балансных уравнений для концентрации возбужденных активных центров в приемном элементе n и концентрации фотонов в нем q :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n}{T} + \chi \nu q; \quad (1a)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{n}{T} - \chi \nu q - \frac{q}{\Theta}. \quad (1b)$$

где χ – натуральный показатель поглощения материала приемного элемента;

ν – скорость света в нем.

Первые слагаемые в правых частях (1a) и (1b) описывают спонтанные переходы, вторые – вынужденные, происходящие в процессе перепоглощения фотонов, а последнее слагаемое в (1b) учитывает конечность времени жизни фотона в системе "приемный элемент – интегрирующая камера". Будем считать величины n и q усредненными по объему приемного элемента, а показатель поглощения χ независимым от n и q и равным показателю поглощения для невозбужденного приемного элемента.

Дифференцируя (1b) по времени и подставляя в (1a), получаем уравнение для концентрации фотонов в приемном элементе:

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \left(\frac{1}{T} + \chi \nu + \frac{1}{\Theta} \right) \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{T\Theta} q = 0. \quad (2)$$

Исбавляясь от $\partial q / \partial t$ согласно методике [6], приводим уравнение (2) к виду

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{T} + \chi \nu + \frac{1}{\Theta} \right)^2 \left(1 - \frac{4}{T\Theta \left(\frac{1}{T} + \chi \nu + \frac{1}{\Theta} \right)^2} \right) q = 0. \quad (3)$$

Это одномерное уравнение Гельмгольца, решение которого при оговоренных выше начальных условиях

$$q(0) = 0; \quad \frac{\partial q(0)}{\partial t} = \frac{n_0}{T}$$

имеет вид [7]

$$q(t) = \frac{n_0 \Theta}{T(1 + \chi \nu \Theta)} e^{-\frac{t}{T(1 + \chi \nu \Theta)}} \left(1 - e^{-\frac{1 + \chi \nu \Theta}{\Theta} t} \right); \quad (4)$$

Из выражения (4), где опущены члены высших порядков малости, следует, что концентрация фотонов в приемном элементе, а следовательно, и интенсивность его люминесценции, уменьшается с течением времени по закону, близкому к экспоненциальному. Величина

$$e^{-\frac{1 + \chi \nu \Theta}{\Theta} t}$$

характеризует теоретическое относительное отклонение закона затухания от экспоненты.

Преобразуем уравнение (4) в уравнение измерения, пренебрегая экспонентой в скобке и полагая, что излучение люминесценции пространственно изотропно, радиус интегрирующей камеры равен r м, размер светочувствительной площадки фотоприемного устройства и его чувствительность равны, соответственно, s м² и S А/В. Так как в начальный момент времени в приемном элементе поглощается энергия W_0

$$W_0 = W_{rad} \left(1 - e^{-\chi l} \right);$$

то

$$n_0 = \frac{W_{rad} (1 - e^{-\chi l})}{h w V}, \quad (5)$$

где W_{rad} – энергия импульса излучения (radiation), которую необходимо измерить;

l – толщина приемного элемента;

h – постоянная Планка;

w – частота измеряемого излучения;

V – объем приемного элемента.

Подставляя выражение (5) в (4), получаем уравнение измерения энергии лазерного излучения

$$W_{rad} = C U_{level} e^{-\frac{t_{level}}{\tau}}, \quad (6)$$

где $C = \frac{W_{level} \tau s S}{4 \pi r^2 (1 - e^{-\chi l}) \Theta}$... Дж / В, – нормировочная конструкторская константа;

$\tau = T(1 + \chi v \Theta)$, с, – постоянная времени

затухания люминесценции.

W_{level} , Дж, – пороговый уровень (level) энергии люминесценции, при котором измеряется длительность импульса люминесценции t_{level} .

Константы C и τ подлежат уточнению при калибровке измерителя энергии, так как они зависят от целого ряда факторов, как оговоренных выше, так и неявно участвующих, точный учет которых не представляется возможным.

Структурная модель процесса калибровки

Полученное выше уравнение измерения (6) является уравнением связи между физическими величинами. Процесс же калибровки представляет собой совокупность операций по определению значения физической величины. Так как уравнение измерения не отражает операции процесса калибровки, то для корректной оценки неопределенности измерений необходимо построить структурную модель процесса калибровки.

Известно, что любой процесс калибровки измерительного средства должен содержать следующие операции [8]:

— воспроизведение единицы измеряемой величины;

— масштабирование единицы измеряемой величины (или самой измеряемой величины), либо получение отношения величин;

— преобразование одной физической величины в другую, связанную с исходной физическими законами (в случае необходимости);

— сравнение размерных или безразмерных величин;

— поиск числового отношения измеряемой величины к единице величины, т. е. непосредственно процесс измерения физической величины калибруемым прибором, повторяемый, в случае необходимости, согласно результатам операции сравнения;

— формирование результата измерения путем приписывания полученному числовому отношению соответствующей размерности.

Для упрощения построения структурной модели процесса калибровки рассмотрим структурную блок-схему установки для калибровки люминесцентного измерителя энергии, показанную на рис. 2.

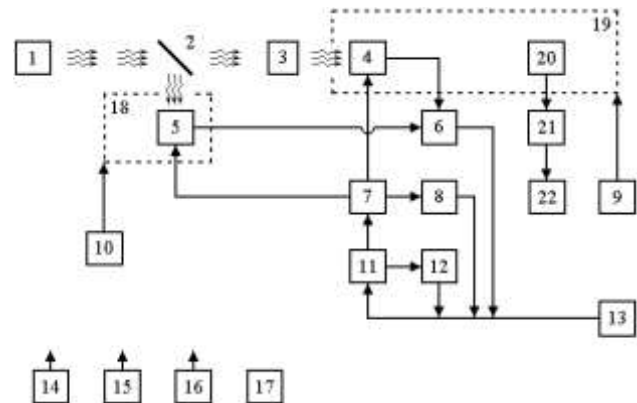


Рис. 2. Блок-схема установки для калибровки измерителя энергии

Цифрами на схеме обозначены следующие составные элементы:

- 1 – импульсный лазер с длиной волны излучения 0,53 мкм, или 0,69 мкм, или 1,06 мкм;
- 2 – делитель потока излучения;
- 3 – набор нейтральных светофильтров;
- 4 – эталонный первичный измерительный преобразователь ЭПИП № 1;
- 5 – эталонный первичный измерительный преобразователь ЭПИП № 2 или ПВДЦ-2;
- 6 – многоканальный блок реализации алгоритма измерения;
- 7 – блок эталонных катушек сопротивления;
- 8 – измеритель тока калибровки ЭПИП № 1 и 2;
- 9 и 10 – терморегуляторы;
- 11 – блок калибровки ЭПИП № 1 и № 2;
- 12 – измерители напряжения калибровки ЭПИП № 1 и № 2;
- 13 – компьютер эталона;
- 14 – система электропитания;
- 15 – система охлаждения;
- 16 – система контроля параметров окружающей среды;
- 17 – система кондиционирования;
- 18 и 19 – термокамеры.
- 20 – оптическая головка калибруемого измерителя энергии;
- 21 – АЦП калибруемого измерителя энергии
- 22 – компьютер калибруемого измерителя энергии

Установка для калибровки создана на базе Государственного специального эталона единиц средней мощности лазерного излучения и энергии импульсного лазерного излучения ДЕТУ 11-04-12 [9]. Государственный первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы энергии лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,3 мкм до 12 мкм. Среднее квадратичное отклонение результата измерений $S_{рв}$ не превышает $0,05 \cdot 10^{-2}$ для уровня $1 \cdot 10^{-3}$ Дж и $0,15 \cdot 10^{-2}$ для уровня $1 \cdot 10^{-5}$ Дж и 3 Дж при 30 независимых наблюдениях.

Неопределенность измерений при воспроизведе-

нии единицы энергии лазерного излучения не превышает

По типу А –

$u_A = 0,05 \cdot 10^{-2}$ для уровня энергии $1 \cdot 10^{-3}$ Дж и

$u_A = 0,15 \cdot 10^{-2}$ для уровня энергии $1 \cdot 10^{-5}$ Дж и 3 Дж

По типу В –

$u_B = 0,03 \cdot 10^{-2}$ для уровня энергии $1 \cdot 10^{-3}$ Дж и

$u_B = 0,08 \cdot 10^{-2}$ для уровней энергии $1 \cdot 10^{-5}$ Дж и 3 Дж

Суммарная стандартная неопределенность

$u_C = 0,06 \cdot 10^{-2}$ для уровня энергии $1 \cdot 10^{-3}$ Дж и

$u_C = 0,17 \cdot 10^{-2}$ для уровней энергии $1 \cdot 10^{-5}$ Дж и 3 Дж

Расширенная неопределенность

$U = 0,12 \cdot 10^{-2}$ для уровня энергии $1 \cdot 10^{-3}$ Дж и

$U = 0,34 \cdot 10^{-2}$ для уровней энергии $1 \cdot 10^{-5}$ Дж и 3 Дж с коэффициентом охвата $K = 2$ и доверительной вероятностью $P = 0,95$.

Из анализа блок-схемы следует, что импульсный лазер 1, делитель потока излучения 2 и эталонные первичные измерительные преобразователи 4 и 5 (ЭПИП № 1 и № 2) участвуют в операции воспроизведения единицы физической величины – Джоуля. ЭПИП №2, набор нейтральных светофильтров 3 и ЭПИП № 1 обеспечивают операцию масштабирования. Калибруемый измеритель 20 и ЭПИП № 1 сравниваются методом сличения, причем в обоих измерителях измеряемая физическая величина преобразуется в другую физическую величину, которая может быть прослежена вплоть до государственных первичных эталонов единиц соответствующих величин.

При воспроизведении размера единицы энергии ЭПИП № 1 реализует уравнение измерения [10]

$$W_{\text{ЭПИП}}(t) = \frac{P(t_1) \cdot T \cdot U_{\text{св}}(t)}{U_{\text{св}}(t_1)}, \quad (7)$$

где $W_{\text{ЭПИП}}(t)$ – величина единицы энергии, которая воспроизводится эталоном в момент времени t ; $P(t_1)$ – значение мощности непрерывного излучения, которое измеряется в момент времени t_1 ; T – измеряемое эффективное значение длительности оптического импульса; $U_{\text{св}}(t_1)$ и $U_{\text{св}}(t)$ – результаты обработки показаний приемника-“свидетеля” в процессе измерения мощности $P(t_1)$ ЭПИП и при воспроизведении единицы энергии соответственно. Калибруется ЭПИП методом электрического замещения оптического излучения, что позволяет “привязать” государственный первичный эталон единицы энергии излучения к существующим более точным государственным эталонам единиц вольт и ома.

Калибруемый измеритель энергии реализует приведенное выше уравнение измерения (6), преобразуя измеряемую физическую величину – энергию – в величину времени секунду.

Для выполнения операции сравнения физических величин необходимо полученные в результате измерений значения напряжений и времен преобразовать в значения энергий W_{rad} и $W_{\text{ЭПИП}}$ согласно уравнениям измерений (6) и (7) и оценить их отношение.

Если $W_{\text{rad}} / W_{\text{ЭПИП}} > 1$, следует уменьшить калибровочную константу C в уравнении (6) и скорректировать значение τ по результатам измерений.

Если $W_{\text{rad}} / W_{\text{ЭПИП}} < 1$, следует увеличить калибровочную константу C в уравнении (6) и скорректировать значение τ по результатам измерений.

Если $W_{\text{rad}} / W_{\text{ЭПИП}} = 1$, следует зафиксировать значения C и τ , масштабировать воспроизводимую единицу и перейти к калибровке измерителя на другом уровне энергии.

Последней операцией калибровки является приписывание полученным калибровочным значениям соответствующей размерности единиц.

На основании изложенного строим структурную модель процесса калибровки, общий вид которой показан на рис. 3.

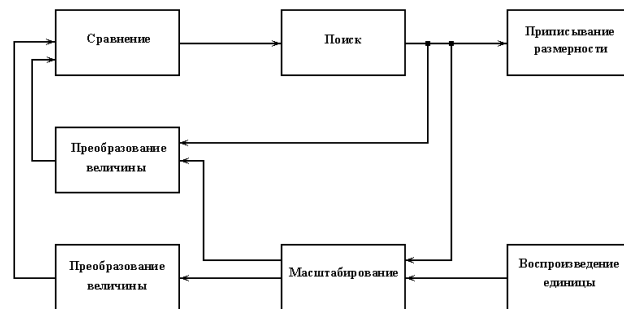


Рис. 3. Структурная модель процесса калибровки люминесцентного измерителя энергии

Отметим, что структурная модель показывает наличие отрицательной обратной связи между калибровочными операциями, что свидетельствует о правильности методики калибровки.

Измерительные операции процесса калибровки

Из уравнения измерения энергии излучения (6) следуют уравнения измерения конструкторских констант при калибровке измерителя энергии

Оба уравнения реализуются одной измерительной операцией – регистрацией интенсивности люминесценции приемного элемента как функции времени.

Поскольку метрологические характеристики эталона даны для 30 независимых наблюдений, принимаем такое же количество необходимых операций регистрации процесса затухания люминесценции.

Обработка данных

Обработка данных состоит в построении в среде Microsoft Excel графика зависимости логарифма относительной интенсивности люминесценции от времени и вычислении уравнения его линейного тренда.

Коэффициент наклона линии тренда равен обратной величине постоянной времени τ затухания люминесценции, а свободный член уравнения – натуральному логарифму произведения CU_{level} .

Оценка неопределенности измерителя энергии

Для оценки стандартной неопределенности измерения энергии модернизированным измерителем учитываем следующие составляющие:

1. Методическая неопределенность обусловлена отличием выражения в круглой скобке уравнения (4) от единицы. Типичная постоянная времени затухания люминесценции для разных приемных элементов с

Таблица 1

Составляющие неопределенности АЦП

Система	Источник	Неопределенность
Выборка и хранение	Нелинейность	10^{-4}
	Усиление	10^{-4}
Преобразователь	Шум питания	10^{-5}
	Смещение U	$8 \cdot 10^{-5}$
	Шум питания	$6 \cdot 10^{-5}$
	Нелинейность	$1,2 \cdot 10^{-4}$
	Квантование	$6 \cdot 10^{-5}$
	Усиление	$3 \cdot 10^{-4}$
	Сдвиг нуля	$3 \cdot 10^{-4}$

С учетом этих составляющих расширенная неопределенность измерителя энергии при коэффициенте охвата 2 не превышает 5 % .

Заключение

Из вышеизложенного следует, что модернизация базовой конструкции прибора позволила существенно упростить и ускорить процедуру калибровки. Взамен долгой и трудоемкой поточечной регистрации процесса затухания люминесценции стала возможной его автоматическая фиксация, что в свою очередь уменьшило достижимую неопределенность оценки конструкторских констант измерителя энергии.

разными интегрирующими камерами в 1,5 ... 1,8 раз превышает время жизни возбужденного состояния центров поглощения. В этом случае время жизни фотона в камере оценивается как $\sim 10^{-10}$ с и выражение в скобке отличается от единицы менее, чем на $5 \cdot 10^{-5}$.

2. Неопределенность воспроизведения единицы энергии – Джоуля – соответствует декларируемым метрологическим характеристикам эталона.

3. Неопределенность масштабирования (передачи) единицы энергии определяем как удвоенные метрологические характеристики эталона, поскольку единица энергии воспроизводится методом приемника, а в определении коэффициента масштабирования участвуют два ЭПИП.

4. Для оценки составляющей неопределенности, обусловленной типичным 14-разрядным аналого-цифровым преобразователем используем данные из литературы [11], приведенные в Таблице 1.

5. Неопределенность вычисления постоянной времени затухания люминесценции при среднеквадратическом разбросе экспериментальных точек 100 ... 125 мкс и $\tau = (4,5 \dots 5,5)$ мс не превышает $2,3 \cdot 10^{-2}$.

Суммарная стандартная неопределенность АЦП, полученная как корень квадратный из суммы квадратов, составляет $1,1 \cdot 10^{-3}$

Abstract

Fluorescent energy meters of pulsed laser radiation are meters of throughput type and have a number of unique characteristics - high resistance to powerful optical radiation, speed, a wide dynamic range of measured energies, a large linear aperture. These qualities have led to the widespread use of fluorescent energy meters for the certification of various laser systems ground and airborne.

The article describes the procedure for calibration of an upgraded fluorescent laser energy meter, i.e. the process of experimental determination of the design constant of the meter and the magnitude of its uncertainty.

Calibration was performed according to the calibration method MKU 11-375: 2016 on the state primary standard of units of average power and energy of laser radiation DETU 11-04-12 using an additional pulsed laser emitter and receivers type PVDC-2, which is part of the standard.

Statistical processing of experimental results for an upgraded fluorescent energy meter determined the constant of the meter, the uncertainty of which at a coverage factor of 2 is not more than 5%.

Key words: Laser radiation; energy meter; calibration

Анотація

Люмінесцентні вимірювачі енергії імпульсного лазерного випромінювання відносяться до вимірювачів прохідного типу і відрізняються рядом унікальних характеристик - високою стійкістю до дії потужного оптичного випромінювання, швидкістю, широким динамічним діапазоном вимірюваних енергій, великою лінійною апертурою. Ці якості зумовили широке застосування люмінесцентних вимірювачів енергії для атестації різних лазерних систем наземного і бортового базування.

У статті викладено процедуру калібрування модернізованого люмінесцентного вимірювача енергії лазерного випромінювання, тобто процес експериментального визначення конструкторської константи вимірювача і величини її невизначеності.

Калібрування проводилось згідно методики калібрування MKU 11-375:2016 на державному первинному еталоні одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання ДЕТУ 11-04-12 з застосуванням додаткового імпульсного лазерного випромінювача та приймачів типу ПВДЦ-2,

Статистичною обробкою експериментальних результатів для модернізованого люмінесцентного вимірювача енергії визначена константа вимірювача, величина невизначеності якої при коефіцієнті охоплення 2 становить не більше 5%.

Ключові слова: Лазерне випромінювання; вимірювач енергії; калібрування

Список літератури

1. Лейкин А.Я., Мунтян К.И., Рубинштейн Б.И., Соловьев В.С. Использование резонансной люминесценции и методы ее регистрации с целью измерения энергии импульсных ОКГ. “Радиотехника”. Сб. статей, в. 21, 1972 г., изд. ХГУ, Харьков, с. 181-185
2. Мунтян К.И., Рубинштейн Б.И., Соловьев В.С. Устройство для измерения энергии излучения ОКГ с модулированной добротностью. А.с. СССР № 505063 от 26.06.1972
3. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. GUM 1995 with minor corrections. JCGM 100:2008 (First edition 2008. Corrected version 2010)
4. K.D. Sommer, B.R.L., Siebert. Systematic approach to the modeling of measurements for uncertainty evaluation. Metrologia. - 2006. - v. 43. - No 4. pp. S200-S210
5. А.В. Прокопов, И.П. Захаров, О.А. Боцюра. Основные проблемы обоснования модельного уравнения при оценивании неопределенности измерений. Украинский метрологический журнал. 2016, № 3, с. 19–22
6. Э. Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Изд. "Наука", М., 1976 г. – 576 с.
7. Свешников А.Г., Боголюбов А.Н., Кравцов В.В. Лекции по математической физике.–М.: Изд-во МГУ, 1993.– 352 с.
8. Г.П. Шлыков. Теория измерений: уравнения, модели, оценивание точности. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. – 100 с.
9. Тимофеев Е.П. Исследование государственного первичного эталона средней мощности и энергии лазерного излучения//Український метрологічний журнал. - 2012. -Вип. 3. -С. 35–39.
10. Грищенко Л.В., Соловйов В.С., Тимофеев С.П. Державний спеціальний еталон одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання //Український метрологічний журнал. -1998. -Вип. 3. -С. 36–41.
11. <https://controlengrussia.com/programmnye-sredstva/razreshenie-tochnost-i-pogreshnosti-sistem/> Дата обращения 01.08.2020

References

1. Lejkin A.Ya., Muntean K.I., Rubinshtejn B.I., Solovjev V.S. Ispolzovanie rezonansnoj lyuminescencii i metody ee registracii s celyu izmereniya energii impulsnyh OKG. “Radiotehnika”. Sb. statej, v. 21, 1972 g., izd. HGU, Harkov, s. 181-185
2. Muntean K.I., Rubinshtejn B.I., Solovjev V.S. Ustrojstvo dlya izmereniya energii izlucheniya OKG s modulirovannoj dobrotnostyu. A.s. SSSR № 505063 ot 26.06.1972
3. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. GUM 1995 with minor corrections. JCGM 100:2008 (First edition 2008. Corrected version 2010)
4. K.D. Sommer, B.R.L., Siebert. Systematic approach to the modeling of measurements for uncertainty evaluation. Metrologia. - 2006. - v. 43. - No 4. pp. S200-S210
5. A.V. Prokopov, I.P. Zaharov, O.A. Bocyura. Osnovnye problemy obosnovaniya modelnogo uravneniya pri ocenivani neopredelennosti izmerenij. Ukrainskij metrologicheskij zhurnal. 2016, № 3, s. 19–22
6. E. Kamke. Spravochnik po obyknovennym differencialnym uravneniyam. Izd. "Nauka", M., 1976 g. – 576 s.
7. Sveshnikov A.G., Bogolyubov A.N., Kravcov V.V. Lekcii po matematicheskoj fizike.–M.:Izd-vo MGU, 1993.–352 s.
8. G.P. Shlykov. Teoriya izmerenij: uravneniya, modeli, ocenivanie tochnosti. – Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2008. – 100 s.
9. Timofeev E.P. Issledovanie gosudarstvennogo pervichnogo etalona srednej moshnosti i energii lazernogo izlucheniya//Ukrayinskij metrologichnij zhurnal. – 2012. – Vip. 3. – S. 35–39.
10. Grishenko L.V., Solovjov V.S., Timofeyev Ye.P. Derzhavnij specialnij etalon odinic serednoyi potuzhnosti ta energi laserного viprominyuvannya // Ukrayinskij metrologichnij zhurnal. – 1998. – Vip. 3. – S. 36–41.
11. <https://controlengrussia.com/programmnye-sredstva/razreshenie-tochnost-i-pogreshnosti-sistem/> Data obrasheniya 01.08.2020