

Метрологическое обеспечение импульсных световых измерений

П.И. Неежмаков¹, А.Д. Купко¹, В.В. Терещенко^{1,*}, Г.И. Чурюмов²

¹ Национальный научный центр «Институт метрологии», ул. Мироносицкая, 42, 61002 Харьков, Украина

² Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, 61000 Харьков, Украина

(Получено 18.11.2016; опубликовано online 20.02.2017)

Представлены результаты модернизации Государственного первичного эталона единицы силы света связанные с расширением функциональных возможностей в область воспроизведения и передачи переменных во времени световых величин. Описана процедура воспроизведения и передачи единицы освещивания. Впервые в Украине для передачи единицы были использованы группа светодиодных источников света. Описаны основные изменения в проекте государственной поверочной схемы световых измерений. Изложены результаты разработки методики калибровки пульсметров и импульсных фотометров основанные на экспериментальных исследованиях и расчетах.

Ключевые слова: Эталон, Освещивание, Пульсметр, Импульс, Коэффициент пульсации, Flicker index.

DOI: [10.21272/jnep.9\(1\).01013](https://doi.org/10.21272/jnep.9(1).01013)

PACS numbers: 06.20.fb, 06.20.fa

1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость измерения импульсных световых величин обусловлена разнообразием областей применения источников света в автомобильной, в судовой, в самолетной промышленности, здравоохранении, развлекательной сфере, технологии производства экранов и дисплеев. Созданный в 1996 г. Государственный эталон единицы силы света – кандели был недостаточно полным по своим функциональным возможностям. Отсутствовало метрологическое обеспечение измерений светового потока и импульсных световых величин, которые характеризуют импульсные и периодические источники света. В результате, в поверочной схеме присутствовало воспроизведение только единицы силы света.

Для проведения качественного контроля измерения импульсных световых величин необходимо полноценное метрологическое обеспечение, что стало одной из причин проведения работ в ННЦ «Институт метрологии» по модернизации Государственного первичного эталона единицы силы света в 2015г.

2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ОСВЕЩИВАНИЯ

2.1 Воспроизведение единицы освещивания

Ключевыми направлениями модернизации были: расширение функциональных возможностей эталона и внедрение в эталонную базу Украины измерения зависимых от времени световых величин. В рамках выполнения работ было разработано оборудование для воспроизведения и передачи единицы освещивания (кд · с), а так же впервые предложено использование в качестве эталонного источника оптического излучения полупроводниковых светодиодов.

В установку для воспроизведения единицы освещивания входит трап-детектор, группа светоизмерительных ламп типа СИС и механический модулятор. Воспроизведение начинается с проверки стопро-

центной квантовой эффективности первичного фотометра на основе трехдиодного трап-детектора на одной длине волны. В качестве активного элемента приемника оптического излучения используются фотодиоды фирмы Hamamatsu S1337-1010BR. Так же проверяется коэффициент направленного пропускания корректирующего трехкомпонентного светофильтра, который приводит спектральную чувствительность приемника к кривой видности человеческого глаза $V(\lambda)$.

Проверка квантовой эффективности и коэффициента направленного пропускания осуществляется соответственным на Государственном первичном эталоне единицы средней мощности и энергии лазерного излучения и Государственном первичном эталоне единиц спектральных коэффициентов направленного пропускания, зеркального и диффузного отражения в диапазоне длин волн от 0,2 мкм до 25,0 мкм. Все упоминаемые в статье эталоны созданы и хранятся в ННЦ «Институт метрологии». В результате рассчитывается абсолютная чувствительность трап-детектора на длине волны 555 нм и коэффициент активности для источника типа А. Входная прецизионная диафрагма выполнена из стали, которая обеспечивает постоянство формы входного отверстия трап-детектора. Трап-детектор устанавливается на оптическую скамью вместе со светоизмерительной лампой и модулятором.

При помощи аппаратуры Государственного первичного эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения измеряется коэффициент ослабления модулятора. Он равен отношению угла, открытых участков вращательного диска и суммы открытой и закрытой части. При помощи трап-детектора измеряется сила света светоизмерительной лампы, затем устанавливают (включают) модулятор. С помощью частотомера измеряется частота импульсов трап-детектора от светоизмерительной лампы с модулятором, рассчитывается период импульсов и определяется продолжительность импульса. Произведением силы света и длительности им-

* Tereshchenko.valerii@gmail.com

пульсов является освечивание.

Уравнение измерения при воспроизведении эталоном размера единицы освечивания имеет следующий вид:

$$\Theta^{\Delta t} = I \cdot \frac{k_{\text{осл}} \cdot N_{\Delta t}}{f} = \frac{k_{\text{осл}} \cdot N_{\Delta t}}{f} \cdot \frac{k \cdot K \cdot L^2}{A} \cdot j_I,$$

где $\Theta^{\Delta t}$ – размер единицы освещенности источника излучения за время Δt ; I – значение силы света источника оптического излучения, который измеряется при воспроизведении единицы силы света; $k_{\text{осл}}$ – коэффициент ослабления механического ослабителя; f – частота прохождения световых импульсов; $N_{\Delta t}$ – число импульсов попадающих на приемник за время Δt ; k – коэффициент калибровки трап-детектора с фильтром и диафрагмой без фильтра на длине волны 555 нм; K – спектральный коэффициент, который зависит от спектральных характеристик измерения и спектральных характеристик корригирующего светофильтра; A – площадь входной диафрагмы эталонного фотометра; L – расстояние между точечным источником оптического излучения и площадью входной диафрагмы трап-детектора; j_I – входной сигнал трап-детектора.

Воспроизведение единицы $\Theta^{\Delta t}$ основывается на прямых измерениях единицы силы света, предварительном измерении коэффициента ослабления механического модулятора и частоты следования световых импульсов.

2.2 Передача единицы освечивания

При передаче единицы на место трап-детектора устанавливается импульсный фотометр и определяется его чувствительность к освечиванию. Затем на место светоизмерительной лампы устанавливается импульсный источник излучения из группы эталонных светодиодов и определяются чувствительности к освечиванию.

Управление светодиода осуществляется при помощи разработанного стабилизированного источника питания и генератора сигналов специальной формы выполненных в одном корпусе.

Диапазон частот следования импульсов от 1 Гц до 65 кГц с дискретным шагом регулирования. Генератор импульсов обеспечивает 5 основных форм сигнала: синусоидальную, прямоугольную, пилообразную, реверсивную пилообразную и треугольную. Так же есть возможность генерации хаотичного сигнала. Разработанный прибор позволяет перестраивать глубину модуляции сигнала в интервале 1-100 %.

Передача осуществляется посредством последовательной перестановки эталонного импульсного фотометра на калибруемое (поверяемое) средство измерительной техники на каждом из диапазонов измерения.

Введение в эталон единицы освечивания открывает возможность обеспечения прослеживаемости и единства измерения пульсметров, импульсных фотометров и экспозиметров. Коэффициент пульсации рассчитывается по формуле:

$$K_n = \frac{(E_{\text{max}} - E_{\text{min}})}{2 \cdot E_{\text{ave}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где E_{max} , E_{min} , и E_{ave} – максимальное, минимальное и среднее значение освещенности за период измерения соответственно;

При измерении динамических сигналов, форма которых, чаще всего, не имеет четкого математического представления, метод определения среднего существенно влияет на результаты расчета коэффициента пульсации. В работе [1] представлены экспериментальные результаты исследования влияния форм сигналов на расчеты, а также анализ используемых формул.

На основании проведенных экспериментальных исследований [1] была подготовлена методика калибровки пульсметров и импульсных фотометров, которая включает в себя методы исследования пульсаций по формулам удовлетворяющим требованиям как отечественных, так и международных нормативных документов.

3. ПОВЕРОЧНАЯ СХЕМА

С учетом проведенных теоретических и экспериментальных исследований [1], можно утверждать о необходимости изменения в метрологическом обеспечении приемников импульсного оптического излучения. Часть поверочной схемы, связанная с импульсными фотометрами, решает задачи измерения импульсных и периодических световых величин, которые широко применяются в самолётной, судоходной и автомобильной отраслях. На самолетах, кораблях и средствах спасения, по требованиям международных документов, необходимо иметь мигающие сигнальные огни – источники импульсного и периодического излучения. Поскольку Украина имеет многочисленные морские и речные порты, а также аэропорты, то отсутствие метрологического обеспечения измерений периодического излучения стало ощутимым.

При разработке метрологического обеспечения, одновременно с работами по модернизации Государственного первичного эталона единицы силы света [2], был разработан проект Государственной поверочной схемы для средств измерения силы света, освещенности и освещения. Проект новой поверочной схемы вносит изменения в ДСТУ 3394-96 [3], которые после утверждения позволят регламентировать поверку импульсных фотометров, фотометрических головок, экспозиметров, пульсметров, а также светоизмерительных ламп и светодиодов с системой формирования импульсов [1], используемых в законодательно регулируемой сфере. В проект поверочной схемы было добавлено три новых направления: пульсметры; импульсные фотометры, фотометрические головки и экспозиметры; светоизмерительные лампы и светодиоды с системой формирования импульсов.

Для пульсметров в проекте поверочной схемы предусмотрено диапазон коэффициента пульсации от 0 до 100 %, и погрешность $\Delta_B = (2,0 \% \div 5,0 \%)$ для рабочих эталонов, и $\Delta_A = (3,0 \% \div 10 \%)$ для рабочих средств измерения. Уровень пульсаций должен составлять от 10 % для зрительной работы высокой точности, до 20 % для общего надзора.

В результате проведенных работ можно наметить направления дальнейшей модернизации Государственного первичного эталона единицы силы света.

Во-первых, становится возможным, создание оборудования для измерения малых уровней освещенности. Такое направление световых измерений позволит проводить работы по калибровке (поверке) военного оборудования, оборудования частного и государственного видеонаблюдения, медицинского оборудования. Актуальность расширения световых измерений в данном направлении связана с большим количеством производителей соответствующей аппаратуры.

Во-вторых, развитие метрологического обеспечения световых измерений для узкополосных источников света. Спектральная полоса многих светодиодов находится в пределах десятков нанометров, что существенно меньше спектральной полосы чувствительности приемников. Спектральная чувствительность этих приемников не может абсолютно точно совпадать со спектральной чувствительностью человеческого глаза [3]. Результаты измерения в красной и синей областях могут отличаться на десятки процентов. В связи с этим приборы, полностью пригодны для измерения излучения с широким спектром для узкополосных источников спектра могут оказаться непригодными. Решением этого вопроса является создание группы эталонных измерительных источников узкополосного излучения на основе мощных полупроводниковых светодиодов. Предварительные исследования могут быть проведены на основе существующего оборудования.

В-третьих, проведение работ по метрологическому обеспечению органических светодиодов (OLED), которые на уровне светодиодов (LED), стремительно набирают популярность во многих направлениях использования. Для исследования OLED, в ведущих научно-исследовательских центрах проводится разработка специального оборудования.

Особое место занимает, использование светодиодных источников света с системой формирования сигналов специальной формы для создания эталонов единиц световой экспозиции (лк · с) и световой энергии (лм · с).

Отличительными чертами предложенной поверочной схемы является разделение между ветвями приемников и источников оптического излучения и создания направлений метрологического обеспечения переменных во времени световых величин. Продолжен переход от хранения и передачи световых единиц с помощью ламп, т.е. источников излучения, к хранению и передаче, в основном, с помощью приемников излучения.

4. МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ПУЛЬСМЕТРОВ

Разработка методики калибровки пульсметров один из основных этапов становления метрологического обеспечения зависимых от времени световых единиц в Украине. Методика калибровки должна быть достаточно простой, но информативной. Методика калибровки распространяется на эталонные средства измерительной техники (пульсметры, фотометрические головки и импульсные фотометры).

С учетом полученных экспериментальных результатов [1], были сформированы основные этапы калибровки и проанализирован бюджет неопреде-

ленности результата измерения коэффициента пульсации. При калибровке пульсметров предусмотрено изменение параметров формы сигнала, частоты и глубины модуляции, которые характеризуют коэффициент пульсации. Отношение сигнала к периоду величина постоянная и равная 2. Вследствие кратковременности интервала измерения, прочие коэффициенты, которые должны учитываться при проведении калибровки фотометров (поправка к расстоянию, поправка на неточность определения температуры и прочие), не принимаются во внимание, так как не оказывают существенного влияния на результаты измерения. Схема установки для проведения измерений представлена на рис.1. В качестве источника оптического используется светодиодный источник из состава группы источников Государственного первичного эталона единицы силы света. Регистрация сигнала осуществляется с использованием импульсного фотометра, входящего в состав группы первичных фотометров эталона. Визуальный контроль результатов измерения производится на персональном компьютере в специальном программном обеспечении.

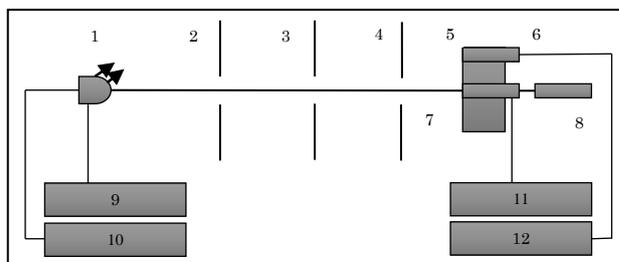


Рис. 1 – Схема установки для проведения калибровки пульсметров и импульсных фотометров: 1 – источник оптического излучения, 2, 3, 4 – экраны, 5 - блок фотометров, 6 – калибруемое средство измерительной техники, 7 – эталонное средство измерительной техники, 8 – юстировочное устройство, 9 – блок питания источника оптического излучения, 10 – система формирования сигналов специальной формы, 11 – персональный компьютер с программным обеспечением импульсных фотометров, 12 – осциллограф

Одной из основных частей установки для передачи единицы освечивания (калибровки и/или поверки пульсметров) является блок источника оптического излучения (№ 1, № 9, № 10 на рис. 1), разработанный при проведении работ по модернизации Государственного первичного эталона единицы силы света. При разработке блока питания источника импульсного оптического излучения и генератора сигналов специальной формы, выполненных в одном корпусе, основной приоритет был направлен на повышение точности работы. Электрическая принципиальная схема блока питания (№ 9) представлена на рис. 2.

В методике расчет коэффициента пульсации осуществляется по одной основной и двум вспомогательным формулам. Основываясь на результатах исследований были сформулированы предложения для предприятий, касающиеся метода расчета коэффициента пульсации для разрабатываемого оборудования. Основные расчеты осуществляются по формуле:

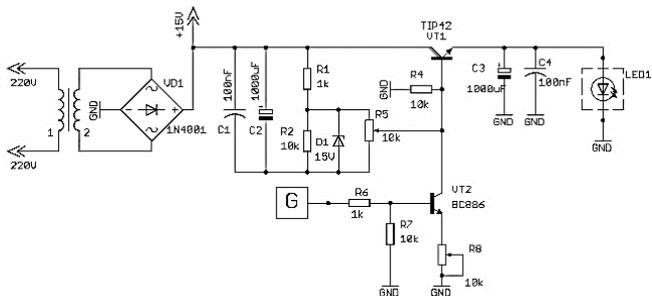


Рис.2 – Электрическая принципиальная схема блока питания источника импульсного оптического излучения

$$K_n = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \cdot 100, \quad (2)$$

Результат для данной формулы, соответствует результату оценки параметров пульсации света в Европе – flicker percent, что дает возможность объединить требования украинских и зарубежных нормативных документов. Flicker percent, как и коэффициент пульсации, является критерием оценки относительной глубины колебаний освещенности вследствие изменения во времени светового потока.

По желанию заказчика расчет может быть произведен по формулам, которые учитывают изменение формы сигнала. Нижеприведенная формула, позволяет более полно характеризовать полученные результаты с учетом влияния формы сигнала:

$$flicker\ index = \frac{area\ A \int E(t)dt}{area\ A \int E(t)dt + area\ B \int E(t)dt}, \quad (3)$$

где $area\ A \int E(t)dt$ – интеграл по любому из периодов в области, где $E(t)$ больше среднего зона A на рис. 3; $area\ B \int E(t)dt$ – интеграл по любому из периодов в области, где $E(t)$ меньше среднего – зона B на рис. 3.

Влияние формы сигнала учитывается следующей формулой, в которой средний уровень освещенности за время импульса определяется через интеграл от периода измерения:

$$K_{i2}^K = \frac{(E_{\max} - E_{\min})}{\frac{\int E(t)dt}{2 \cdot T}} \cdot 100. \quad (4)$$

Metrological Guarantee of Flashing Light Measurements

P. Neyezhnikov¹, A. Kupko¹, V. Tereshchenko¹, G. Churyumov²

¹ National Scientific Center “Institute of Metrology”, 42, Mironositska st., 61002 Kharkiv, Ukraine

² Kharkiv National University of Radio Electronics, 14, Nauka ave., 61000 Kharkiv, Ukraine

The results of the modernization of the State primary standard unit of luminous intensity concerned with extension of functional capabilities in the area of the reproduction and transfer of flashing light quantities. Described reproduction and transfer procedures of the light units - illumination. For the first time in Ukraine to transmit the flashing light quantities was used LED light sources. The basic changes in the project state verification scheme of the light measurements. The results of the development of calibration methods of the flickermeters and pulse photometers.

Keywords: The standard, Illumination, Calibration, Flicker meter, Ripple ratio, Flicker index.

На рис. 3 проиллюстрирована методология определения составляющих при расчете flicker index (индекс пульсации).

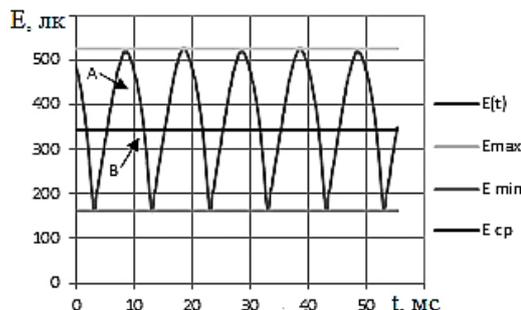


Рис. 3 – Графическая интерпретация расчета flicker index

После успешной калибровки пульсметра в Национальном научном центре «Институт метрологии» выдается сертификат калибровки, с логотипом региональной международной организации СОOMET и логотипом ННЦ «Институт метрологии».

5. ВЫВОДЫ

Работы по модернизации Государственного первичного эталона единицы силы света выполнены в полном соответствии с техническим заданием. Основным результатом является обеспечение прослеживаемости результатов измерения импульсных световых величин и единицы освечивания. Впервые предложено использование в качестве источника импульсного оптического излучения полупроводникового светодиода. Для решения задач воспроизведения и передачи единицы освечивания, а также проведения периодических работ по калибровке (поверке) средств измерительной техники был разработан комплекс аппаратуры. Был разработан проект новой поверочной схемы световых измерений. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований. Разработанная методика проведения калибровки, обеспечивает прослеживаемость пульсметров в соответствии с отечественными и зарубежными нормативными документами и дает исчерпывающую характеристику калибруемому средству измерительной техники.

Метрологічне забезпечення імпульсних світлових вимірювань

П.І. Неежмаков¹, О.Д. Купко¹, В.В. Терещенко¹, Г.І. Чурюмов²

¹ Національний науковий центр «Інститут метрології», вул. Мירוносицька, 42, 61002 Харків, Україна

² Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61000 Харків, Україна

Представлені результати модернізації Державного первинного еталона одиниці сили світла зв'язані з розширенням функціональних можливостей в частині відтворення та передачі змінних в часі світлових величин. Описана процедура відтворення та передачі одиниці освітлення. Вперше в Україні для передачі одиниці використано групу світлодіодних джерел світла. Описано основні зміни в проєкті державної повірочної схеми світлових вимірювань. Викладено результати розробки методики калібрування пульсметрів і імпульсних фотометрів оснований на експериментальних дослідженнях і розрахунках.

Ключові слова: Еталон, Стандарт, Освітлення, Пульсметр, Коефіцієнт пульсації, Flicker index.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.В. Терещенко, *Світлотехніка та електроенергетика* **1**, 39 (2016) (V.V. Tereshchenko, *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka* **1**, 39 (2016)).
2. П.І. Неежмаков, В.М. Балабан, Л.І. Бондаренко, Л.В. Гріщенко, М.В. Гур'єв, О.Д. Купко, Є.П. Тимофеев, В.В. Терещенко, *Український метрологічний журнал* **1**, 37 (2016) (P.I. Neyezhmakov, V.M. Balaban, L.I. Bondarenko, L.V. Hrishchenko, M.V. Hur'yev, O.D. Kupko, Ye.P. Tymofeyev, V.V. Tereshchenko, *Ukrayins'kyu metrolohichnyy zhurnal* **1**, 37 (2016)).
3. ДСТУ 3394-96. Державна повірочна схема для засобів вимірювання світлових величин, 01.01.1996 р. Держстандарт України. – Київ. – 5 с. (DSTU 3394-96. Derzhavna povirochna skhema dlya zasobiv vymiryuvannya svitlovykh velychyn, 01.01.1996 r. Derzhstandart Ukrayiny. – Kyiv. – 5 s.).