

СУЧАСНИЙ СТАН МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СВІТЛОВИХ ВИМІРЮВАНЬ В УКРАЇНІ

STATE OF THE ART OF METROLOGICAL ASSURANCE OF LIGHT MEASUREMENTS IN UKRAINE

П.І. Неєжмаков, доктор технічних наук, доцент, генеральний директор ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків

О.Д. Купко, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків

В.В. Терещенко, молодший науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків



П.І. Неєжмаков



О.Д. Купко



В.В. Терещенко

Описано етапи становлення метрологічного забезпечення світлових вимірювань в Україні. Результатами робіт за останні роки стали розробка декількох державних стандартів, створення державного первинного еталона одиниці світлового потоку та державного первинного еталона одиниці сили світла. До складу державного первинного еталона одиниці сили світла впроваджено обладнання для відтворення, зберігання та передавання одиниці освітлення та вимірювання параметрів пульсації світла. Сформовано перспективні напрямки подальших досліджень та розвитку світлових вимірювань.

Ключові слова: еталон, світлова одиниця, світлові вимірювання, світловий потік, сила світла, освітлення, фотоприймач, світлодіод.

The stages of metrological assurance of light measurements in Ukraine are described. The results of the last few years of work have been the development of several national standards, the creation of the national primary measurement standard of the unit of luminous flux and modernization of the national primary measurement standard of the unit of luminous intensity. The equipment for reproduction, storage and transfer of the unit of illuminance and for measurement of the parameters of light ripple have been introduced into the composition of the national primary measurement standard of the unit of

luminous intensity. The promising areas for further research and development of light measurements have been defined.

Keywords: measurement standard, light unit, light measurement, luminous flux, luminous intensity, illumination, photodetector, LED.

Сучасне метрологічне забезпечення світлових вимірювань в Україні бере початок зі створення у 1996 р. державного первинного еталона одиниці сили світла [1, 2] для відтворення та зберігання одиниці сили світла — кандели і передавання розміру цієї одиниці робочим еталонам та робочим засобам вимірювальної техніки (ЗВТ), які використовуються в Україні (рис. 1).

Реалізація одиниці сили світла кандели — однієї із 7-ми основних одиниць Міжнародної системи SI — базувалася на випромінюванні джерела монохроматичного спектра та високоточному приймачеві — криогенному радіометрі, який був розроблений та виготовлений в Національному науковому центрі “Інститут метрології” [3]. До складу еталона входили установки для відтворення сили світла, установка для передавання сили світла, спектрофотометрична установка та установка для вимірювання нелінійності фотометрів. При розробленні еталона використовувався досвід провід-

них наукових метрологічних інститутів [4, 5], які для передавання світлових величин на дискретних довжинах хвиль від криогенного радіометра до вторинних приймачів використовували метод на основі лазерів. Проте пряме використання лазерного випромінювача при порівнянні криогенного радіометра та фотометра ускладнювалося через чутливість первинного фотометра до інтерференції та поляризації, тому фотометри повинні були бути не чутливими до когерентності і поляризації випромінювання і мати однорідну кутову та зонну чутливості. Унікальність рішення при створенні державного первинного еталона України одиниці сили світла полягала у використанні випромінювання ртутної лампи, в якій за допомогою світлофільтра виділяли частоту 546 нм. Перевага ртутної лампи полягала у сутності оптичного випромінювання, яке не поляризоване і не когерентне, а довжина хвилі близька до максимуму $I(\lambda)$, завдяки чому було отримано високу точність відтворення сили світла [6]. Компаратор реалізовано на основі фотометричної сфери з фотодіодом, що забезпечувало рівномірну кутову та зонну структури.

Відтворення одиниці сили світла здійснювалося через відтворення одиниці світлового потоку на довжині хвилі 546 нм. Керуючись визначенням кандели, при якому визначення величини відносної світлової ефективності $I(\lambda)$ є постійним, вати перераховано в люмени. Встановлюючи компаратор на фіксованій відстані від випромінювача та маючи його вольт-люменову чутливість, вимірювали освітленість, а потім розраховували силу світла на довжині хвилі 546 нм. Для передавання одиниці сили світла використовували первинний фотометр, вольтватна чутливість якого калібрувалася за компаратором та ртутною лампою. Після цього методом непрямих вимірювань на установці для передавання одиницю отримували світловимірювальні лампи, які входять до складу еталона. Вимірювання лінійності компаратора та відносної спектральної чутливості первинного фотометра проводили на відповідних установках еталона [1].



Рис. 1. Державний первинний еталон одиниці сили світла

Метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці сили світла:

Діапазон відтворення одиниці сили

світла, кд 1,0...100,0

Випадкова похибка (СКВ) $0,1 \cdot 10^{-2}$

Невиключена систематична похибка $0,15 \cdot 10^{-2}$

Розширена невизначеність (U) $0,3 \cdot 10^{-2}$

Створений державний первинний еталон одиниці сили світла поєднував багаторічний досвід наукових робіт зі створення метрологічного забезпечення світлових вимірювань [6] та мав суттєві переваги перед еталонами провідних країн [4, 5], які були реалізовані раніше.

Наступним етапом розвитку метрологічного забезпечення світлових вимірювань в Україні стало створення у 2012 р. державного первинного еталона одиниці світлового потоку, який дав можливість проводити вимірювання головного параметра для штучних джерел світла — світлового потоку (лм) [7] (рис. 2).



Рис. 2. Державний первинний еталон одиниці світлового потоку

Метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці світлового потоку:

Діапазон відтворення одиниці сили

світла, лм 1,0...1500

Випадкова похибка (СКВ) $1,3 \cdot 10^{-3}$

Невиключена систематична похибка $2,5 \cdot 10^{-3}$

Розширена невизначеність (U) $0,4 \cdot 10^{-2}$

Реалізацію одиниці світлового потоку, окрім сферичного фотометра, було здійснено на основі фотоприймача зі стовідсотковою квантовою ефективністю — трап-детекторі [8], який був виготовлений в ННЦ “Інститут метрології” (рис. 3). Завдяки простішому принципу дії та меншим фінансовим затратам такий тип фотоприймачів було використано у подальшому в низці національних еталонів, що зберігаються в ННЦ “Інститут метрології”.

Одночасно із розповсюдженням трап-детекторів та підвищенням їхніх точнісних характеристик стали поширюватися світлодіоди — високоефективні джерела оптичного випромінювання. Наразі велику кількість наукових робіт присвячено дослідженню

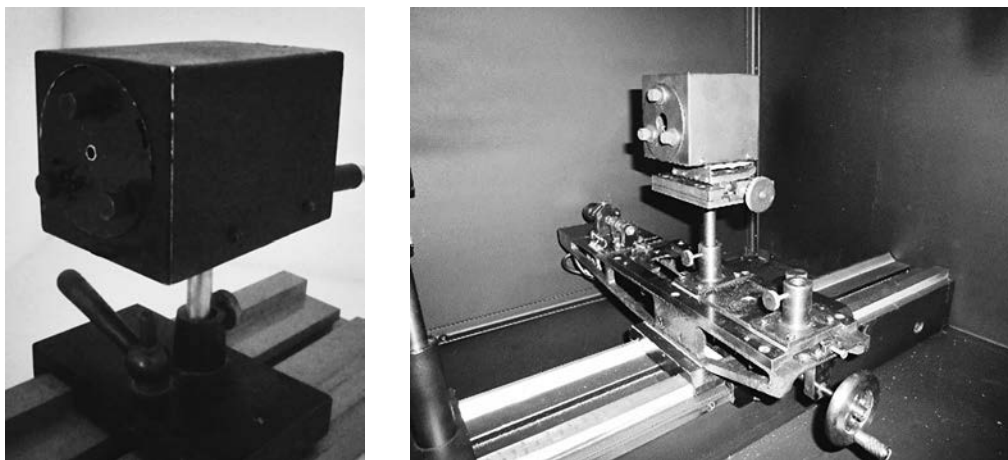


Рис. 3. Трап-детектори, розроблені ННЦ “Інститут метрології”

перспектив використання світлодіодів у метрології [9, 10]. Враховуючи, що сучасні фотоприймачі мають передбачену квантову ефективність (майже 100 %), що достатньо для охоплення всього спектра випромінювання не тільки багатьох кольорових, але й білих світлодіодів, розвиток методів відтворення світлових одиниць на основі випромінювання світлодіодного джерела є актуальним завданням. У такому напрямку в ННЦ “Інститут метрології” проводяться роботи з дослідження особливостей використання світлодіодних джерел світла [11] та розроблення точних методів відтворення одиниці сили світла [12].

У 2015 р. було виконано роботи з модернізації первинного еталона одиниці сили світла (рис. 4) у напрямку розширення функціональних можливостей [13]. Було вирішено питання як наукового, так і технічного характеру, а саме було проведено дослідження щодо включення світлодіодних джерел світла до складу еталонних джерел світла для відтворення, зберігання та передавання світлових одиниць [11].

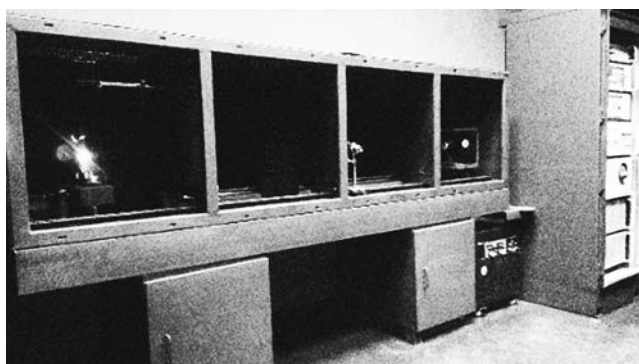


Рис. 4. Державний первинний еталон одиниці сили світла після модернізації

Розширення функціональних можливостей полягало у збільшенні діапазону відтворення та збереження одиниці сили світла, забезпеченні відтворення та збереження одиниць освітленості і освітлення. Під час створення еталона було змі-

нено підхід, який полягав у повному забезпеченні кожного еталона усім комплексом необхідної апаратури. Замість цього було використано загальноєвропейський підхід, тобто еталон було створено повністю інтегрованим в еталонну базу ННЦ “Інститут метрології”. Саме тому відтворення світлових одиниць новим удосконаленим еталоном частково здійснюється за допомогою апаратури інших еталонів, окремі частини яких використовуються в еталоні сили світла. Завдяки цьому стало можливим уникнути значних витрат, а рівень використання апаратури підвищився. До установки для відтворення одиниць додано трап-детектор, на основі якого може бути реалізовано використання еталонних світлодіодних джерел. Відповідно до обраного принципу побудови еталона, рівняння вимірювання при відтворенні розміру одиниці сили світла має такий вигляд:

$$I = \frac{k \cdot K \cdot L^2}{A} \cdot j_1, \quad (1)$$

де I — сила світла джерела випромінювання, одиниця якої відтворюється на еталоні; k — коефіцієнт калібрування трап-детектора з фільтром та діафрагмою (далі за текстом — еталонний фотометр) без світлофільтра на одній довжині хвилі; K — спектральний коефіцієнт, який залежить від спектральних характеристик випромінювання та спектральних характеристик коригувального фільтра; A — площа вхідної діафрагми еталонного фотометра; L — відстань між точковим джерелом випромінювання та площиною вхідної діафрагми еталонного фотометра; j_1 — вихідний сигнал еталонного фотометра (фотострум трап-детектора).

Вихідний сигнал еталонного фотометра j_1 визначається у процесі роботи державного первинного еталона шляхом прямих вимірювань за допомогою вимірювача постійного струму. Таким чином, знаходження величини сили світла пов'язано, у першу чергу, з попереднім визначенням k , K та A шляхом опосередкованих вимірювань і безпосереднім

вимірюванням відстані L перед кожним відтворенням одиниці сили світла еталоном.

При відтворенні розміру одиниці освітленості рівняння вимірювання має вигляд

$$E = \frac{k \cdot K}{A} \cdot j_E,$$

де E — освітленість, одиниця якої відтворюється, у площині вхідної діафрагми етального фотометра; величини k , K та A визначено в рівнянні (1); j_E — вихідний сигнал етального фотометра.

Таким чином, знаходження величини освітленості також пов'язано з попереднім визначенням k , K та A шляхом опосередкованих вимірювань і вимірюванням j_E у процесі роботи державного первинного еталона з відтворення одиниці.

Для відтворення освітлення як джерело використовується світловимірювальна лампа типу СИС зі складу групи ламп первинного еталона одиниці сили світла з механічним модулятором. При відтворенні одиниці освітлення вимірюється коефіцієнт послаблення модулятора. Далі вимірюється сила світла світловимірювальної лампи та встановлюється модулятор. За допомогою частотоміра вимірюється частота імпульсів трап-детектора від світловимірювальної лампи з модулятором, розраховується період імпульсів та визначається тривалість імпульсу. Добуток сили світла та тривалості імпульсів є освітлення (кд·с). Рівняння вимірювання при відтворенні державним первинним еталоном розміру одиниці освітлення має такий вигляд:

$$\Theta^{\Delta t} = I \cdot \frac{k_{\text{осл}} \cdot N_{\Delta t}}{f},$$

де $\Theta^{\Delta t}$ — розмір одиниці освітлення джерела випромінювання за час Δt , що відтворюється еталоном; I — значення сили світла джерела випромінювання, що вимірюється при відтворенні одиниці сили світла; $k_{\text{осл}}$ — коефіцієнт ослаблення динамічного ослаблювача, який перетворює неперервний світловий потік у послідовність світлових імпульсів; f — ча-

стота проходження світлових імпульсів; $N_{\Delta t}$ — число імпульсів, що потрапляє на приймач за час Δt (відповідно, Δt — будь-який інтервал часу, впродовж якого на приймач потрапляє N світлових імпульсів).

Відтворення одиниці освітлення $\Theta^{\Delta t}$ ґрунтується на прямих вимірюваннях одиниці сили світла, попередньому вимірюванні коефіцієнта послаблення модулятора і частоти надходження світлових імпульсів.

Для передавання одиниці освітлення (кд·с) робочим еталонам та засобам вимірювальної техніки розроблено обладнання [14], яке додано до складу установки для передавання розміру одиниць сили світла, освітленості та освітлення. Воно складається зі стабілізованого джерела живлення, системи формування оптичних сигналів спеціальної форми та імпульсного джерела оптичного випромінювання. Як джерело світла використовується група потужних світлодіодів (рис. 5). Для реєстрації оптичного сигналу від імпульсного джерела оптичного випромінювання (рис. 5а) в ННЦ “Інститут метрології” було створено імпульсний фотометр (рис. 5б).

Розроблене обладнання було використано для забезпечення простежуваності пульсметрів. Для вимірювання коефіцієнта пульсації було розроблено проект ДСТУ “Методика перевірки. Люксметри. Яскравоміри. Пульсметри” [15] та методику калібрування пульсметрів [16]. Взагалі, за час створення вітчизняного метрологічного забезпечення вимірювань світлових величин було розроблено понад десять національних стандартів та методик проведення вимірювань.

У результаті проведених робіт діапазони значень одиниць вимірювань, в яких за допомогою первинного еталона сили світла відтворюються, зберігаються та передаються одиниці сили світла, освітленості та освітлення, становлять: 1...500 кд — для сили світла; 0,1...1000 лк — для освітленості; 10^{-3} ...500 кд·с — для освітлення.

Було досягнуто такі значення стандартної відносної невизначеності вимірювань:

- за типом А (u_A) — $0,15 \cdot 10^{-2}$ для сили світла і освітленості і $0,25 \cdot 10^{-2}$ для освітлення;

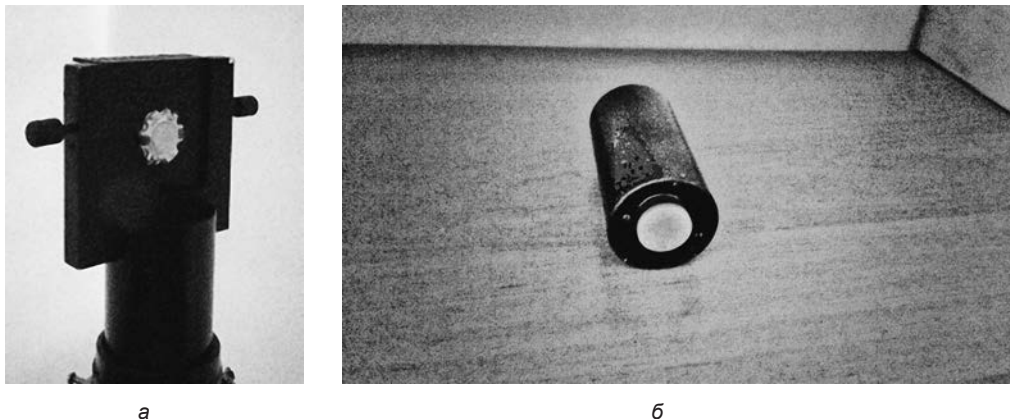


Рис. 5. Обладнання для забезпечення вимірювання імпульсного оптичного випромінювання: а — джерело імпульсного та періодичного оптичного випромінювання; б — імпульсний фотометр

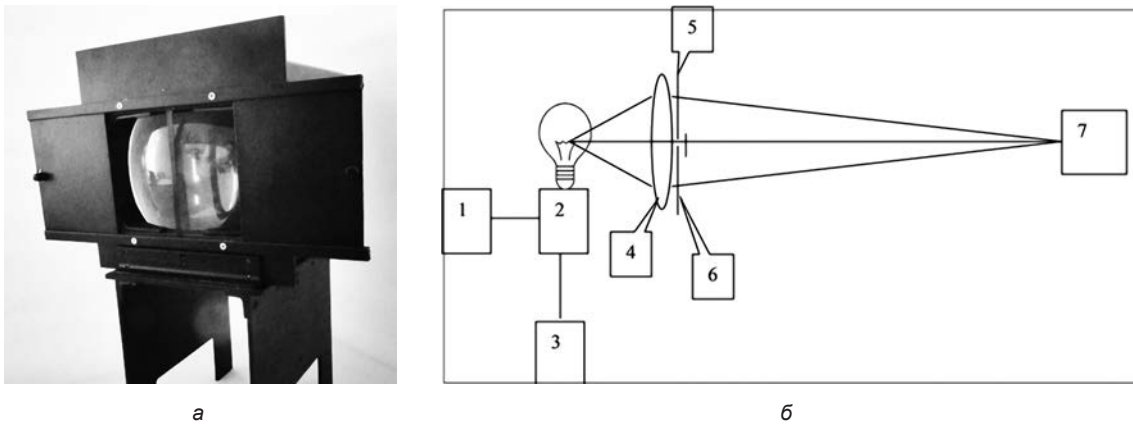


Рис. 6. Вузол вимірювання нелінійності фотометрів: а — зовнішній вигляд; б — оптична схема

• за типом В (u_B) — $0,06 \cdot 10^{-2}$ для сили світла і освітленості і $0,14 \cdot 10^{-2}$ для освітлення.

Сумарна стандартна відносна невизначеність вимірювань u_c не перевищує $0,15 \cdot 10^{-2}$ для сили світла та освітленості і $0,3 \cdot 10^{-2}$ для освітлення. Розширена відносна невизначеність вимірювань U з коефіцієнтом обхвату $k = 2$ та довірчою імовірністю $P = 0,95$ не перевищує $0,3 \cdot 10^{-2}$ для сили світла та освітленості і $0,6 \cdot 10^{-2}$ для освітлення.

Додатково, на основі розробленого оптичного вузла вимірювання нелінійності чутливості електронно-оптичних приладів, було розширено діапазон передавання одиниці освітленості до рівнів $1 \cdot 10^5$ лк. Необхідність високих рівнів освітленості пов'язана з наявністю високих рівнів освітленості сонячного випромінювання і відповідними діапазонами ЗВТ. Вузол вимірювання нелінійності встановлюється до установки для передавання одиниць, яка після цього виконує функції установки вимірювання нелінійності. Зовнішній вигляд вузла та схему установки для вимірювання нелінійності наведено на рис. 6.

Загальна схема установки складається з блока випромінювання (1 — блок живлення джерела випромінювання, 2 — джерело випромінювання типу А (лампа розжарювання), 3 — електровимірювальний прилад для контролю режиму джерела випромінювання); досліджуваного приймача 7; оптичної схеми вузла (4 — об'єктив, який фокусує світловий потік від лампи на люксметр або головку фотометричну, 5, 6 — затвори). Спосіб вимірювання нелінійності полягає в послідовному вимірюванні реакції фотометра на приблизно рівні потоки випромінювання (I_1^0 та I_2^0). Після цього на фотометр подаються обидва ці потоки і вимірюється реакція фотометра (I_{12}^0). Нелінійністю для потоку, якій відповідає I_{12}^0 , вважається величина

$$NL(I_{12}^0/2) = (I_{12}^0 - I_1^0 - I_2^0)/(I_{12}^0/2).$$

Отримані метрологічні характеристики вдосконаленого еталона одиниці сили світла знаходяться на рівні провідних країн світу. Підтвердженням цього є результати міжнародних звірень еталона [17].

Окрім державного первинного еталона одиниці сили світла, в напрямку оптичних та оптико-фізичних вимірювань у лабораторії фотометрії та радіометрії ННЦ “Інститут метрології” створено 8 первинних еталонів, які забезпечують простежуваність світлових вимірювань в Україні.

Перспективи подальшого розвитку метрологічного забезпечення світлових вимірювань

Серед багатьох перспективних напрямків розвитку можливо виділити три, які потребують найбільшої уваги: вимірювання освітленості низьких рівнів, що пов'язано із системами відеоспостереження та візування; створення системи метрологічного забезпечення вимірювання яскравості; дослідження та контроль параметрів сонячних елементів в рамках становлення альтернативного екологічного джерела живлення і подальшого переходу до рангу основного джерела.

Одним із найбільш перспективних напрямків подальшого розвитку є розроблення установки для проведення вимірювань параметрів сонячних елементів. Дослідження в напрямку підвищення точності вимірювання та перетворення сонячної енергії в електричний струм є одним із найважливіших питань сучасного людства. Для вирішення цього питання необхідно розробити установку, ключовими елементами якої будуть система імітації сонячного випромінювання, що на сьогоднішній день має декілька можливих реалізацій, одна з яких базується на світлодіодному імітаторі з програмним контролем спектра та інтенсивності світлового потоку, та еталонний сонячний елемент.

Більш загальною проблемою є забезпечення світлових вимірювань для присмеркового та нічного зору. Відомо, що вже при освітленості 10 лк механізми перетворення отриманої зорової інформації змінюються і використання моделі, на якій побудовано всі прилади реєстрації освітленості, не є достовірним. Наразі при забезпеченні єдності світлових вимірювань цей відомий факт ігнорується і використовується чутливість людського ока

для денного зору, хоча існує затверджена Міжнародною комісією з освітленості (CIE) спектральна крива чутливості людського ока для нічного зору. Існує декілька конкуруючих моделей, що дозволяють описувати перехід від денного зору до нічного. Очевидно, що широка область вимірювань, пов'язана з нічним освітленням складів, автострад, паркувань, садів і парків та багатьох інших місць, де не вимагається інтенсивного освітлення, потребує розроблення заходів забезпечення єдності вимірювань у цій галузі. Боротьба зі світловим забрудненням середовища та економія енергії на освітленні постійно збільшуватимуть зону застосування малоінтенсивного освітлення. Крім того, такий тип випромінювання є стратегічним завданням для оборонної промисловості як засіб нічного зору.

Необхідність вимірювання яскравості є важливою складовою повноцінної сфери світлових вимірювань в Україні. Це пов'язано з тим, що при реєстрації оптичного випромінювання людське око реагує на освітленість сітчатки ока, а значить, на яскравість об'єкта, від якого цю інформацію було відбито. Вимірювання яскравості можна поділити на два напрямки: вимірювання яскравості інформаційних екранів і моніторів, що пов'язано з питаннями охорони здоров'я, та вимірювання яскравості відбивного покриття на дорожній розмітці, що є безпосереднім критерієм при оцінці безпеки життєдіяльності на транспорті.

У кожному з перелічених напрямків в ННЦ "Інститут метрології" проводяться роботи з розроблення точних методів вимірювання та прототипів вимірювальних установок для отримання попередніх результатів і формулювання економічної доцільності створення первинних еталонів за вказаними напрямками.

Висновки

У роботі представлено складові вищої ланки вітчизняного метрологічного забезпечення світлових вимірювань — національні еталони одиниці світлового потоку та одиниці сили світла. Разом зі створенням еталонів було розроблено державні стандарти та повірочні схеми, налагоджено співпрацю з багатьма країнами в галузі світлових вимірювань, проведені та проводяться звірення з еталонами країн-членів COOMET та EURAMET. Загалом в галузі світлових вимірювань розроблено понад 10 нормативних документів: національні стандарти України, методики калібрувань, державні повірочні схеми.

Розроблене в ННЦ "Інститут метрології" обладнання, що входить до складу еталонів (абсолютний приймач — криогенний радіометр та абсолютний приймач зі стовідсотковою квантовою ефективністю — трап-детектор), відповідає найвищим рівням точності і дозволяє забезпечити вимірювання багатьох світлових одиниць. Під час створення

еталонів було розроблено методи вимірювання відповідних світлових величин, спрямовані на підвищення точності та зменшення матеріальних витрат при проведенні вимірювань.

Модернізований національний еталон одиниці сили світла за своїми метрологічними характеристиками знаходиться на рівні еталонів провідних країн світу. До складу еталона включено обладнання для забезпечення відтворення, зберігання та передавання одиниці освітлення, що дало можливість проводити вимірювання параметрів імпульсного та періодичного оптичного випромінювання, що є дуже важливим для виконання вимог забезпечення безпеки праці та охорони здоров'я.

За рахунок створення вузла вимірювання нелінійності чутливості електронно-оптичних приладів забезпечено передавання одиниці освітленості на рівні 10^5 лк, що необхідно для дослідження фотометрів сонячного випромінювання.

Виконані роботи стали першим і дуже важливим кроком на шляху до використання світлодіодних джерел світла як еталонних джерел світла. Подальший розвиток методів із використанням світлодіодних джерел світла надасть можливості розвитку інших важливих для України напрямків світлових вимірювань.

Список літератури

1. Купко О.Д., Назаренко Л.А. Еталон одиниці сили світла в Україні // Світлотехніка та електроенергетика. 2001. № 1. С. 15–26.
2. ДСТУ 3394–96. Державна повірочна схема для засобів вимірювання світлових величин. Київ: Держстандарт України, 1996. 5 с.
3. Гур'єв М.В., Купко О.Д., Назаренко Л.А. Несефективний плівковий радіометр // Український метрологічний журнал. 2001. № 3. С. 57–60.
4. Goodman T. M., Key P. J. The NPL Radiometric Realisation of the Candela. Metrologia. 1979. Vol. 25, pp. 29–40.
5. Cromer C. L., Eppeldauer G., Hardis J. E., Larason T. C., Ohno Y., Parr A. C. NIST Technical Note 1621. Optical Radiation Measurements. Based on Detector Standards. "The NIST detector-based luminous intensity scale". J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1996. Vol. 101, pp. 109–132.
6. Купко А.Д., Назаренко Л.А. Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине // Светотехника. 2001. № 5. С. 38–40.
7. Неежмаков П.И., Грищенко Л.В., Гур'єв М.В., Назаренко Л.А. Державний первинний еталон одиниці світлового потоку // Український метрологічний журнал. 2013. № 4. С. 20–32.
8. Купко А.Д. Использование трап-детектора для световых измерений // Там же. 2008. № 1. С. 24–29.

9. Никоненко С.В., Луценко Е.В. Референсные твердотельные источники излучения // “Метрология 2017”: Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 4–5 апреля 2017. С. 161–165.
10. Pulli Tomi, Donsberg Timo, Poikonen Tuomas, Manoocheri Farshid, Karha Petri, Ikonen Erkki. Published ahead of advance online publication. Advantages of white LED lamps and new detector technology in photometry. Light: Science & Applications. 2015. No 4. 7 p.
11. Купко О.Д., Терещенко В.В. Аналіз можливостей застосування світлодіодів у метрологічному забезпеченні світлових вимірювань // Український метрологічний журнал. 2015. № 4. С. 22–28.
12. Tereshchenko V. Development of LED method of reproduction of luminous intensity unit. Proceedings of VII International Competition of COOMET “Best Young Metrologist”. Astana. 17–18 may 2017, pp. 77–80.
13. Балабан В.М., Баранов В.М., Бондаренко Л.І., Грищенко Л.В., Гур’єв М.В., Купко О.Д., Неєжмаков П.І., Тимофеев Є.П., Терещенко В.В. Удосконалення державного первинного еталона одиниці сили світла // Український метрологічний журнал. 2016. № 1. С. 37–42.
14. Терещенко В.В. Обладнання для метрологічного забезпечення вимірювань імпульсних світлових величин // Світлотехніка та електроенергетика. 2016. № 1. С. 39–45.
15. МКУ 11–347:2016. Метрологія. Пульсметри. Методика калібрування. Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2017. 15 с.
16. ДСТУ [на розгляді]. Метрологія. Методика повірки. Люксметри. Яскравоміри. Пульсметри.
17. Купко О.Д., Тарасова О.Б., Никоненко С.В. Результати звірень національних еталонів одиниці сили світла і освітленості Республіки Білорусь і України // Український метрологічний журнал. 2005. № 2. С. 22–27.

Статтю рекомендовано до публікації доктором технічних наук, старшим науковим співробітником Є.П. Тимофеевим