

## УДОСКОНАЛЕННЯ ДЕРЖАВНОГО ПЕРВИННОГО ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ СИЛИ СВІТЛА

- В.М. Балабан**, старший науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків  
**В.М. Баранов**, провідний інженер ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків  
**Л.І. Бондаренко**, старший науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків  
**Л.В. Грищенко**, директор наукового центру ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків  
**М.В. Гур’єв**, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків  
**О.Д. Купко**, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків  
**П.І. Неєжмаков**, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, генеральний директор ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків  
**Є.П. Тимофеев**, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків  
**В.В. Терещенко**, молодший науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків



В.М. Балабан



В.М. Баранов



Л.І. Бондаренко



Л.В. Грищенко



М.В. Гур’єв



О.Д. Купко



П.І. Неєжмаков



Є.П. Тимофеев



В.В. Терещенко

*Наведено результати вдосконалення державного первинного еталона одиниці сили світла, що забезпечує відтворення двох нових світлових одиниць та розширює діапазон відтворення.*

*The results of improving the national primary standard of luminous intensity are presented, what provides the reproduction of two new luminous units and expands the reproduction range.*

### Вступ

Державний первинний еталон одиниці сили світла, створений у 1995 р., інтенсивно експлуатувався вже більше 18 років [1]. Складні електронні та оптико-механічні прилади мають обмежений термін експлуатації. Державна повірочна схема не повною мірою відповідала вимогам сьогодення, тому необхідними були зміни як повірочної схеми, так і еталона. Техніко-економічне обґрунту-

вання доцільності виконання робіт з удосконалення еталона полягало в тому, що при виході його з ладу всі робочі еталони і цілий ряд високоточних робочих засобів вимірювальної техніки необхідно буде повірити або калібрувати за межами України, що в декілька десятків разів дорожче. Непрацездатність державного первинного еталона одиниці сили світла могла призвести до значних невинуватих витрат, до залежності від інших країн. Крім того, змінилися загальні вимоги до еталона, тому вибір технічних рішень і обґрунтування напрямів і методів досліджень при модернізації еталона проводилися, виходячи з практичних вимог забезпечення єдності і достовірності світлових вимірювань у країні. Цей підхід відрізняється від раніше використаного підходу, при якому найбільша увага приділялася забезпеченню максимально досяжної точності під час відтворення.

### Загальні напрямки змін

Зміна підходу пов'язана з декількома причинами.

По-перше, змінилася світова тенденція в передачі світлових одиниць від вищих ланок до нижчих. Прилади найвищої точності (криогенні радіометри) наразі використовуються в основному як унікальні прилади, що забезпечують відразу декілька напрямків оптико-фізичних вимірювань. Для забезпечення світлових вимірювань використовують абсолютні приймачі іншого типу – трап-детектори (декілька фотодіодів, розташованих таким чином, щоб як можна більша частина випромінювання, що потрапляє на них, поглиналася), які не набагато поступаються криогенним радіометрам за точністю, але істотно простіші в експлуатації і набагато дешевші [2,3]. Для серійних фотоприймачів – трап-детекторів – типова невизначеність вимірювань становить від  $0,5 \cdot 10^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$ . Кремнієві фотодіоди нечутливі до випромінювання з довжиною хвилі більше 1,2 мкм і не реагують на змінюваний тепловий фон [4], що значно полегшує роботу з ними. Чутливість фотодіодів для довжин хвиль від 0,38 до 0,76 мкм істотно вища, ніж у криогенного радіометра.

По-друге, за минулі роки відбулося різке збільшення використання світлодіодів, які є малоінерційними джерелами світла. Зрозуміло, що забезпечення вимірювань періодичних та імпульсних джерел світла потребує використання таких малоінерційних приймачів, якими є фотодіоди. Криогенні радіометри принципово не можуть забезпечити вимірювання освітленостей, що швидко змінюються.

У зв'язку із цим уявлялося раціональним змінити попередній метод відтворення одиниці сили світла з використанням криогенного радіометра і монохроматичного випромінювання на метод

відтворення одиниці сили світла з використанням трап-детектора і випромінювання від лампи розжарювання. Перший еталон, створений за таким принципом, з'явився у Фінляндії [5].

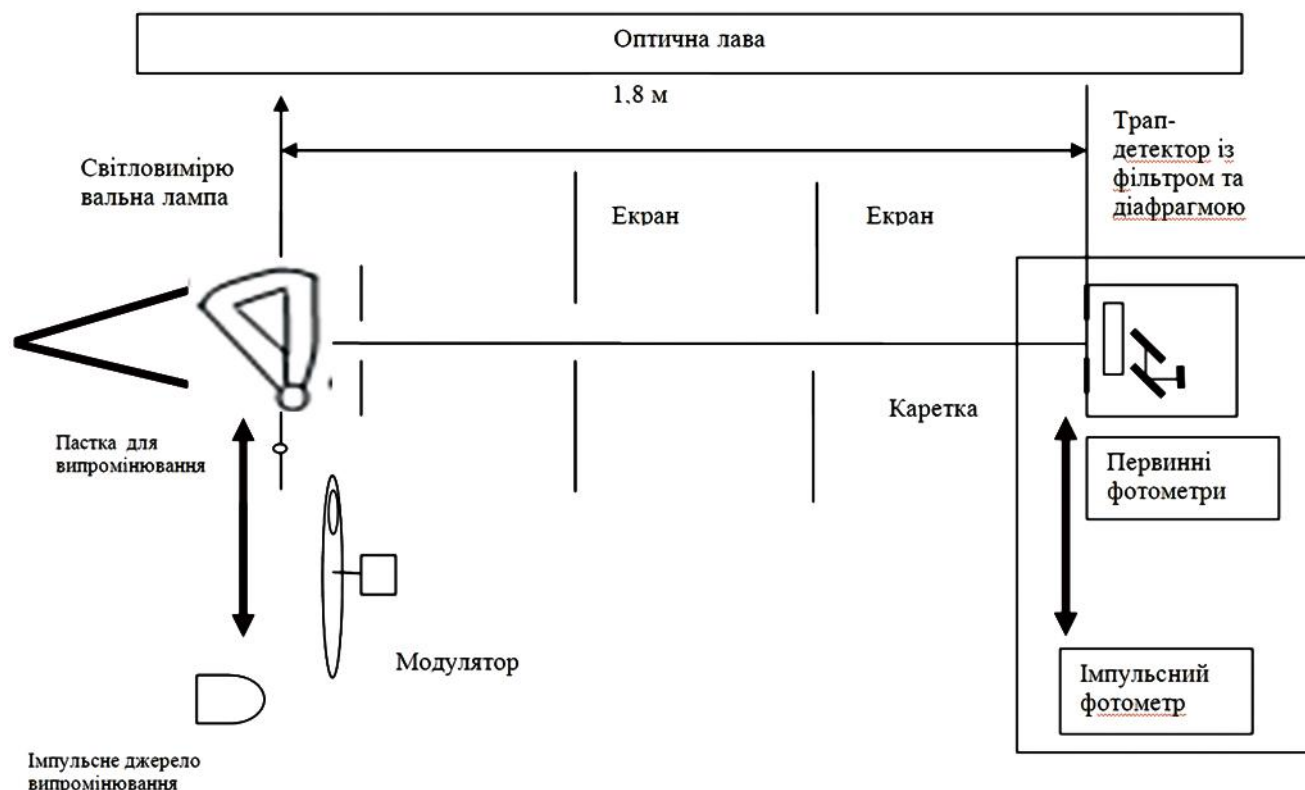
Позитивним моментом у цьому випадку є можливість завдяки істотно більшій чутливості фотодіодів набагато збільшити відстань від джерела до приймача. Оскільки сила світла визначається за освітленістю площини і відстанню від неї до джерела, то істотно зменшуються вимоги до точності вимірювання відстані. Другим позитивним моментом є істотне зменшення вимог до постійності спектрального складу випромінювання джерела при розрахунках. Додатковим бонусом є широке розповсюдження такого методу відтворення, що істотно полегшить проведення міжнародних звірень.

Негативною рисою запропонованого методу є необхідність під час відтворення використовувати фільтр, що приводить чутливість трап-детектора до чутливості людського ока. Попередні оцінки показують, що вплив позитивних моментів більший.

Під час створення еталона було змінено підхід, який раніше полягав у повному забезпеченні кожного еталона всім комплексом необхідної апаратури. Замість цього було використано загальноєвропейський підхід, тобто еталон був інтегрований в еталонну базу Національного наукового центру “Інститут метрології”. Саме тому відтворення світлових одиниць новим удосконаленим еталоном здійснюється за допомогою інших еталонів, окремі частини яких використовуються в еталоні сили світла. Завдяки цьому стало можливим уникнути значних втрат, рівень використання апаратури підвищився. Відповідно до цього було розроблено склад та оптичну схему еталона і послідовність операцій при відтворенні і передачі світлових одиниць.

### Склад та принцип роботи еталона

В еталоні 1996 р. було передбачено 4 установки: для відтворення сили світла, для передачі сили світла, спектрофотометрична (для вимірювання спектральних характеристик фотометрів, фільтрів та інших оптичних елементів) та для вимірювання нелінійності фотометрів і приймачів випромінювання. У зв'язку зі зміною методу відтворення стало можливим на одній установці, яка раніше використовувалася тільки для передачі, проводити відтворення і передачу світлових одиниць. Для дослідження приймачів у новому еталоні передбачено дві установки для вимірювання нелінійності, які використовують метод довільного складання. Для спектральних вимірювань використовуються відповідні еталони, які було створено в ННЦ “Інститут метрології” після 1995 р.



Оптическая схема эталона

На рисунку наведено схему основної установки модернізованого еталона, що являє собою світлоізолювану оптичну лаву, уздовж якої може переміщатися каретка, на яку встановлюють різні типи приймачів. Джерелом безперервного випромінювання служить світловимірювальна лампа. Джерелом живлення світловимірювальних ламп є високостабільний блок WY12010, який забезпечує сумісну стабільність джерела та приймача на рівні 0,05 %. Джерелом імпульсного випромінювання під час відтворення служить та ж лампа з установленим перед нею модулятором, а при передачі – світлодіод, сила світла якого може мінятися за заданим законом. Блок живлення імпульсного джерела забезпечує постійний режим та 5 режимів зміни форми напруги сигналу: синусоїдальну, прямокутну, пилкоподібну, реверсивну пилкоподібну та трикутну. Діапазон частот імпульсів – від 1 Гц до 65 кГц із кроком регулювання 1, 10, 100, 1000 Гц.

Відстань між джерелом і приймачем випромінювання вимірюється за допомогою мікроскопа, що пересувається, з прикріпленою до нього ноніусною шкалою – ця частина еталона не зазнала суттєвих змін.

Приймачем при відтворенні служить фотометр – трап-детектор з установленими перед ним діафрагмою і коригуючим фільтром, який був розроблений, створений і досліджений в рамках роботи над удосконаленням еталона в ННЦ “Інститут метрології”. Для фотометра використано трап-детектор власного виготовлення на фотодіодах Hamamatsu S 1337-1010BR. Під час розробки було використано

досвід роботи [6]. Перед трап-детектором розташовано посадочне місце, в яке вставляється масивна оправа з трикомпонентним фільтром із кольорового скла, що приводить чутливість трап-детектора до відносної спектральної чутливості людського ока –  $V(\lambda)$ . Діафрагму трап-детектора було виконано зі сталі, яка забезпечує постійність форми протягом десяти років. Було використано технологію обробки, яка забезпечує створення отвору, максимально наближеного до кола.

При передачі світлових одиниць безперервного випромінювання використовується група із трьох термостабілізованих первинних фотометрів, які використовувалися в еталоні до модернізації, і група із трьох розроблених нетермостабілізованих первинних фотометрів із датчиками температури. При передачі світлових одиниць періодичного та імпульсного випромінювання освітлення використовуються розроблені при модернізації імпульсні фотометри. Створення імпульсного фотометра є важливим пунктом удосконалення еталона. Для цього було розроблено багатофункціональний прилад, здатний передавати дані вимірювань фотометричних головок у ПК, де вони можуть зберігатися й опрацьовуватися, а також відповідне програмне забезпечення. Прилад було створено з урахуванням роботи [7]. Усю електронну частину приладу сконцентровано в окремому блоці – циліндровому корпусі діаметром 15 і довжиною 75 мм. Було розроблено програму, яка забезпечує роботу схеми багатофункціонального приладу. Прилад з'єднується з ПК за допомогою USB-роз'єму. Вимірювання від-

буваються із частотою 8200 Гц. Існує можливість автоматичного вибору одного з 8 діапазонів, які за чутливістю відрізняються в 10 разів. На найчутливішому діапазоні одна одиниця АЦП відповідає  $2,5 \cdot 10^{-12}$  А. Керування та реєстрація здійснюються з ПК.

Стисло послідовність дій на вдосконаленому еталоні полягає в такому.

Відтворення одиниці сили світла в удосконаленому еталоні починається з перевірки 100-відсоткової квантової ефективності трап-детектора на одній довжині хвилі за допомогою державного первинного еталона одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання. Після цього на державному первинному еталоні одиниць спектральних коефіцієнтів спрямованого пропускання, дзеркального та дифузного відбиття в діапазоні довжин хвиль від 0,2 до 25,0 мкм визначається коефіцієнт направленої пропускання коригувального фільтра трап-детектора. У результаті розраховуються абсолютна чутливість трап-детектора на довжині хвилі 555 нм і коефіцієнт актинічності для джерела типу А. На трап-детекторі розміщується прецизійна діафрагма, далі він встановлюється на оптичну лаву зі світловиміральною лампою. Вимірюється та за допомогою методу, який викладено у [8], уточнюється відстань між лампою і трап-детектором.

Вмикається і виводиться на режим джерела типу А світловимірвальна лампа. Визначення режиму проводиться відповідно до [9]. Вимірюється сигнал трап-детектора (з фільтром та діафрагмою), контролюється відсутність дрейфу. Визначаються освітленість трап-детектора і сила світла світловиміральної лампи. На місце трап-детектора встановлюється кожний первинний фотометр і визначається його чутливість. Фотометри використовуються для передачі розміру одиниці сили світла для проведення робіт у проміжку між відтворенням одиниці.

За допомогою апаратури державного первинного еталона одиниць середньої потужності та енергії лазерного випромінювання вимірюється коефіцієнт ослаблення модулятора, який приблизно дорівнює відношенню кута, що відповідає відкритим ділянкам обертального диска, до кута, який відповідає сумі відкритої та закритої частин. За допомогою трап-детектора вимірюється сила світла світловиміральної лампи, потім встановлюють та включають модулятор. За допомогою частотоміра вимірюється частота імпульсів трап-детектора від світловиміральної лампи з модулятором, розраховується період імпульсів та визначається тривалість імпульсу. Освітлення є добутком сили світла та тривалості імпульсів. На місце трап-детектора встановлюється імпульсний фотометр і визначається його чутливість до освітлення. Потім на місце світловиміральної лампи встановлюється імпульсне джерело випромінювання, яке використовується для передачі розміру одиниці освітлення та для створення випро-

мінювання з необхідним рівнем пульсації під час повірок та калібрувань.

### Основні рівняння

Рівняння вимірювання при відтворенні розміру одиниці сили світла має такий вигляд:

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

де  $I$  – сила світла джерела випромінювання, одиниця якої відтворюється на еталоні;  $E$  – освітленість, одиниця якої відтворюється, в площині вхідної діафрагми трап-детектора;  $k$  – коефіцієнт калібрування трап-детектора з діафрагмою без світлофільтра на одній довжині хвилі;  $K$  – спектральний коефіцієнт, який залежить від спектральних характеристик випромінювання та спектральних характеристик трап-детектора з фільтром та діафрагмою;  $A$  – площа вхідної діафрагми трап-детектора;  $L$  – відстань між джерелом випромінювання та площиною вхідної діафрагми трап-детектора;  $j_1$  – вихідний сигнал трап-детектора (фотострум) під час вимірювань сили світла.

Значення  $j_1$  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 вимірюванням відстані  $L$  перед відтворенням одиниці сили світла.

При відтворенні розміру одиниці освітленості рівняння вимірювання має вигляд

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

де величини  $k$ ,  $K$  та  $A$  визначено в рівнянні (1);  $j_E$  – вихідний сигнал трап-детектора під час вимірювань освітленості.

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  $\Delta t$ , що відтворюється еталоном;  $I$  – значення сили світла джерела випромінювання, що вимірюється при відтворенні одиниці сили світла (1);  $k_{\text{осл}}$  – коефіцієнт ослаблення динамічного ослаблювача, який перетворює неперервний світловий потік у послідовність світлових імпульсів;  $f$  – частота світлових імпульсів;  $N_{\Delta t}$  – число імпульсів, що потрапляє на приймач за час  $\Delta t$  (відповідно  $\Delta t$  – будь-який інтервал часу, впродовж якого на приймач потрапляє  $N$  світлових імпульсів).



### Метрологічні характеристики еталона

Відповідно до загальноновизначених метрологічних норм і правил, наведені формули було використано для оцінки похибок та невизначеностей. Основний напрямок досліджень полягав в оцінці складових похибок та невизначеностей усіх величин, які використовуються для відтворення відповідних величин. Діапазон відтворення сили світла еталона було визначено з урахуванням наявного парку світловимірювальних ламп. Діапазон відтворення освітленості було визначено з урахуванням діапазону відтворення сили світла, довжини оптичної лави та характеристик нейтральних фільтрів, що використовуються для ослаблення випромінювання. Діапазон відтворення освітлення було визначено за діапазонами сили світла та тривалості імпульсів.

У результаті проведення робіт з удосконалення державного первинного еталона одиниці сили світла одержано такі метрологічні характеристики:

- діапазон відтворення сили світла 1...500 кд;
- діапазон відтворення освітленості 0,1...1000 лк;
- діапазон відтворення освітлення  $10^{-3}$ ...500 кд·с;
- похибки відтворення одиниць сили світла, освітленості та освітлення не перевищують

для сили світла, кд:

$$S = 0,15 \cdot 10^{-2}; \Theta = 0,15 \cdot 10^{-2}; U = 0,3 \cdot 10^{-2};$$

для освітленості, лк:

$$S = 0,15 \cdot 10^{-2}; \Theta = 0,15 \cdot 10^{-2}; U = 0,3 \cdot 10^{-2};$$

для освітлення, кд·с:

$$S = 0,25 \cdot 10^{-2}; \Theta = 0,35 \cdot 10^{-2}; U = 0,6 \cdot 10^{-2}.$$

Тут  $S$  – середнє квадратичне відхилення;  $\Theta$  – невилучена систематична похибка;  $U$  – розширена невизначеність вимірювання.

Проведено порівняння метрологічних характеристик удосконаленого еталона з характеристиками еталонів сили світла різних країн. Метрологічні характеристики вдосконаленого еталона одиниці сили світла знаходяться на рівні відповідних характеристик національних еталонів розвинених країн і відповідають сучасним вимогам у галузі забезпечення єдності вимірювань світлових величин.

### Повірочна схема

Повірочна схема [10], яку було затверджено після створення еталона в 1996 р., враховувала відмінність ситуації зі світловими вимірюваннями в Україні від ситуації, яка існувала в Радянському Союзі. У зв'язку зі стислими термінами виконання, повірочну схему [10] було спрощено. Ліквідацію гілки вимірювань світлового потоку було не обґрунтовано. Виявилось, що існує стійка потреба в метрологічному забезпеченні засобів вимірювань світлового потоку. У зв'язку з цим в Полтавському регіональному науково-технічному центрі стандартизації, метрології і сертифікації було розроблено локальну повірочну схему для засобів вимірювання світлового потоку, а пізніше в ННЦ "Інститут

метрології" створено еталон світлового потоку та відповідну повірочну схему. Таким чином, область світлових вимірювань перестала бути єдиною, охоплюватися єдиною повірочною схемою.

Другим істотним моментом виявилось те, що на літаках, кораблях і засобах порятунку за вимогами міжнародних документів необхідно мати мерехтливі сигнальні вогні – джерела імпульсного випромінювання. Крім того, в Україні існують документи, які регламентують не тільки величину освітленості в будівлях і спорудах, але й рівень пульсацій. Існують прилади, здатні вимірювати рівень пульсацій, проте метрологічне забезпечення цих приладів не було налагоджено.

З урахуванням вищевикладеного під час роботи з удосконалення еталона було розроблено зміни до повірочної схеми. Виділяючи найцікавіші особливості запропонованої зміни повірочної схеми, можна сказати, що продовжено перехід від зберігання і передачі світлових одиниць за допомогою ламп до зберігання і передачі в основному за допомогою приймачів. Це є наслідком того факту, що стабільність приймачів у середньому вища за стабільність ламп. У новій схемі проведено чітке розділення між джерелами і приймачами на рівні робочих еталонів, які раніше в ДСТУ 3394-96 були суміщені. До повірочної схеми включено гілку вимірювань періодичних та імпульсних джерел світла. Як і раніше, відсутні робочі еталони яскравості. Частково це можна пояснити складнощами покриття великого (від яскравості ламп розжарювання до яскравості слабо освітлених предметів) діапазону при малому парку вимірювальних приладів. Проте в цілому запропоновані зміни в повірочній схемі обґрунтовані і дадуть змогу поліпшити метрологічне забезпечення в області світлових вимірювань. Розроблений під час створення еталона стандарт поширюється на державну повірочну схему для засобів вимірювання світлових величин і встановлює призначення державного первинного еталона одиниці сили світла, визначає комплекс основних засобів вимірювальної техніки, що складають еталон, основні метрологічні характеристики та порядок передачі розміру одиниць робочим засобом вимірювальної техніки із зазначенням похибок і основних методів повірки.

### Висновки

Основні напрямки впровадження удосконаленого еталона одиниці сили світла були пов'язані з урахуванням досвіду роботи на еталоні протягом 20 років та з необхідністю проводити вимірювання світлових характеристик періодичних та імпульсних джерел світла. Проведення робіт з удосконалення державного первинного еталона одиниці сили світла було своєчасним та надзвичайно актуальним, необхідним для підтримання функціонування системи метрологічного забезпечення вимірювань світлових

величин в Україні та економічно доцільним. Було вдосконалено повірочну схему. Новий еталон спроможний відтворювати три світлових одиниці замість однієї. Суттєво розширено діапазон відтворення одиниці сили світла. Метрологічні характеристики еталона відповідають метрологічним характеристикам еталонів промислово розвинутих країн та забезпечують сучасні вимоги до світлових вимірювань.

## Список літератури

1. *Купко А.Д.* Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине / А.Д. Купко, Л.А. Назаренко // *Светотехника*. – 2001. – №5. – С. 38–40.
2. *Palmer J.M.* Alternative configurations for Trap Detectors / J.M. Palmer // *Metrologia*. – 1993. – 30. – Р. 327–333.
3. *Zalewski E.F.* Comparison between cryogenic radiometry and the predicted quantum efficiency of Si photodiode light traps / E.F. Zalewski, C.C. Hoyt // *Metrologia*. – 1991. – 28. – Р. 203–206.
4. *Quinn T.J.* Radiometric measurements of thermodynamic temperature between 327 K and 365 K / T.J. Quinn, J.E. Martin // *TMCSI*. – 1982. – 5. – Р. 103–107.
5. Radiometric realization of the candela with a trap detector / E. Ikonen, P. Karha, A. Lassila [et al.] // *Metrology*. – 1995/96. – 32. – Р. 689–692.
6. *Купко А.Д.* Использование трап-детектора для световых измерений / А.Д. Купко // *Український метрологічний журнал*. – 2008. – № 1. – С. 24–29.
7. Багатофункціональний прилад для вимірювання параметрів оптичного випромінювання / В.Н. Баранов, Ю.Г. Добровольський, О.Д. Купко, Б.Г. Шабашкевич // *Метрологія та прилади*. – 2010. – №1. – С. 20–24.
8. *Купко А.Д.* Совершенствование методики передачи световых единиц / А.Д. Купко // *Український метрологічний журнал*. – 2001. – Вип. 1. – С. 45–47.
9. *Купко А.Д.* Вимірювання кореляційної колірної температури ламп із вольфрамовим тілом розжарювання / А.Д. Купко, В.В. Терещенко // *Метрологія та прилади*. – 2015. – №5. – С. 16–20.
10. Державна повірна схема для засобів вимірювань світлових величин: ДСТУ 3394. – [Чинний від 1994-05-24]. – К.: Держстандарт України, 1996. – 5 с. – (Державний стандарт України).