

УДК 535.241.41.089.68

ДЕРЖАВНИЙ ПЕРВИННИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦІ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ

П.І. Неєжмаков, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, перший заступник генерального директора ННЦ "Інститут метрології" з наукової роботи, 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

Л.А. Назаренко, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків



П.І. Неєжмаков



Л.В. Грищенко



М.В. Гур'єв



Л.А. Назаренко

Розглянуто основні результати розроблення комплексу державного первинного еталона одиниці світлового потоку (ДЕТУ 11-10-13) для забезпечення єдності вимірювань фотометричних величин.

The basic results of development of the state primary standard complex of luminous flux units (DETU 11-10-13) for assurance of measurements uniformity of photometric quantities are considered

Вступ

Важливість світлових вимірювань визначається тією суттєвою роллю, яку відіграє зір в життєдіяльності людини. Близько 80 % інформації для людини про довколишній світ припадає на частку одного почуття – зору.

У загальному обсязі енергетичних витрат значна складова відноситься до витрат на освітлення. За аналізом Міжнародної агенції з енергетики витрати на освітлення становлять близько 19 % від усіх енерговитрат у світі.

Енергетичні затрати на виробництво і використання 1 млн люменів значною мірою визначають світлотехнічний рівень галузі і держави в цілому. Одним із показників рівня розвитку держави є її "світлозабезпеченість" при мінімізації енергоспоживання. Тому актуальним є створення освітлювальних технологій, які забезпечують не тільки високу якість освітлення, але й збереження енергії.

Проте не тільки освітленням обмежуються галузі використання світлових вимірювань. Останнім

часом інтенсивно розвиваються світлові технології в медицині, біології, мікроелектроніці. Революційні досягнення в мікроелектроніці дали поштовх до розвитку нових джерел світла – світлодіодів, які можна з повним правом назвати джерелами світла ХХІ сторіччя. В Україні з 2009 р. діє Національна програма зі створення світлодіодних джерел світла і світлодіодних світильників. Широкого розповсюдження набуло застосування світла в сільському господарстві – рослинництві і тваринництві. Сонячні батареї, фотометричні перетворювачі сонячної енергії застосовуються зараз не тільки в космічній галузі, а й у побуті.

Наш час характеризується використанням революційно нових енергозберігаючих і високоякісних світлових рішень, які не можуть бути реалізовані без сучасного метрологічного забезпечення світового рівня.

Світловий потік є найбільш економічно важливою фотометричною величиною, яка, зважаючи на сучасні тенденції розвитку світлотехніки, пов'язана зі створенням енергетично ефективних джерел світла.

Зрозуміло, що впровадження енергозберігаючих освітлювальних технологій без надійних і достовірних методів вимірювання параметрів світлових приладів неможливе. Особливу роль при цьому відіграє забезпечення єдності вимірювань світлового потоку.

Зважаючи на важливість забезпечення єдності вимірювань світлового потоку в Україні, роботи зі створення державного первинного еталона одиниці

світлового потоку — люмена — було включено до Державної програми розвитку еталонної бази на 2011–2015 рр., затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України 22.12.2010 р. № 1165. Роботи зі створення еталона було завершено у 2012 р.

Фотометрична величина, яка відтворюється еталонами, — світловий потік, визначений як “величина, яка утворюється від променевого потоку при оцінці випромінювання за його дією на селективний приймач, спектральна чутливість якого визначається нормалізованою функцією відносної спектральної світлової ефективності випромінювання”.

Систему одиниць для вимірювання параметрів оптичного випромінювання побудовано на основі одиниці променистого потоку. Люмен є базовою величиною вимірювання світла. Практично всі фотометричні величини базуються на одиниці світлового потоку. Тому створення саме первинного еталона одиниці світлового потоку — люмена — означає не тільки вирішення важливих практичних завдань метрологічного забезпечення, але й вирішення фундаментального завдання метрології — відтворення й передавання одиниці світлового потоку на світовому рівні, що, зокрема, забезпечує економічну і технічну незалежність держави.

Під час створення комплексу апаратури державного первинного еталона одиниці світлового потоку необхідно було вибрати оптимальне рішення для методу відтворення одиниці вимірювання як з точки зору забезпечення необхідних метрологічних характеристик, так і з економічної точки зору.

Ускладнюючим фактором при вимірюванні світлового потоку є необхідність вимірювати потік, який випромінюється в усіх напрямках — у тілесному куті 4π стерадіан.

Існує два основних методи вимірювання повного світлового потоку, на яких і базуються еталонні вимірювання:

- 1) гоніометричний метод;
- 2) метод інтегруючої сфери.

Гоніометричний метод до недавнього часу був основним для реалізації одиниці світлового потоку в національних метрологічних інститутах.

Суть методу полягає в тому, що повний світловий потік джерела світла отримується інтегруванням сили світла по тілесному куту або інтегруванням освітленості по повній поверхні навколо джерела. Для цього покроково фіксуються значення вказаних величин при повороті джерела або приймача гоніометра на відомий кут. Зменшення похибки вимірювань і отримання найбільш достовірного кутового розподілу можливе при мінімальному значенні кута повороту джерела випромінювання відносно фотометра. Вимірювання світлового потоку за допомогою гоніометрів потребують високопрецизійного обладнання позиціонування, яке має високу вартість, та тривають значний час.

У NIST (США) було розвинено метод, який використовує інтегруючу сферу замість гоніометра. Основний принцип цього методу полягає в калібруванні повного потоку лампи всередині сфери за відомим значенням потоку, введеного від зовнішнього джерела світла через отвір всередину сфери. Цей метод спочатку був запропонований на основі теоретичного аналізу з використанням техніки комп'ютерної симуляції, а потім експериментально був перевірений і застосований для реалізації одиниці світлового потоку в 1995 р.

Інтегруючі сфери, на відміну від гоніометрів, забезпечують одночасне просторове інтегрування по повній сферичній поверхні (майже 100 % покриття), що є значною перевагою. Але у NIST метод відтворення світлового потоку за допомогою інтегруючої сфери із зовнішнім джерелом реалізовано на основі світловимірювальної лампи, що не є незалежним відтворенням одиниці.

У ВНИИОФИ (Росія) в основі незалежного відтворення світлового потоку лежить порівняння повного потоку світловимірювальної лампи і світлового потоку високотемпературної широкоапертурної моделі випромінювача типу “чорне тіло” (ВШМЧТ). Незалежність відтворення одиниці обумовлено використанням ВШМЧТ як абсолютного випромінювача зі строгим планковським спектральним розподілом випромінювання на виході.

При такому методі відтворення світлового потоку на перший план виступає завдання визначення термодинамічної температури ВШМЧТ самим високоточним і оперативним методом.

На даний час більш сучасною є реалізація незалежності відтворення одиниці світлового потоку за допомогою використання прецизійних абсолютних радіометрів з електричним заміщенням (детекторний метод). З існуючих радіометрів такого типу унікальним засобом, який забезпечує найбільш високу точність вимірювання радіаційної потужності (на рівні 0,01 %) у широкому спектральному діапазоні, є криогенний радіометр.

Метод відтворення світлових одиниць, що ґрунтується на криогенному радіометрі, реалізується в більшості національних метрологічних інститутів, таких, як NIST (США) і NPL (Велика Британія), і є загальноприйнятим.

Із двох існуючих підходів для створення державного первинного еталона одиниці світлового потоку — люмена: детекторного (NIST, NPL) і на основі джерела (Росія) — нами обрано перший. Це пов'язано з тим, що детекторний метод має більш високі метрологічні можливості і, крім того, дозволяє побудувати систему світлових та спектрометричних величин найбільш раціональним способом. Запропонована ідеологія побудови еталона одиниці світлового потоку — люмена — за допомогою криогенного радіометра дала можливість використати досвід, одержаний при створенні

в ННЦ “Інститут метрології” еталона одиниці сили світла — кандели, об’єднати всі світлові величини і оптимально побудувати систему спектрорадіометричних еталонів [1].

Склад і структурно-функціональна схема державного первинного еталона

З урахуванням вищенаведених висновків щодо вибору методу вимірювання, створений державний первинний еталон одиниці світлового потоку складається з комплексу таких засобів вимірювальної техніки та допоміжних пристроїв:

- *установки для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання малих розмірів*, до складу якої входять:

- джерело оптичного випромінювання на базі ртутної лампи;

- оптико-механічна система формування монохроматичного спрямованого світлового потоку на довжині хвилі 546,1 нм;

- еталонний первинний вимірювальний перетворювач на базі трап-детектора із системою автоматизованого механічного переміщення;

- сферичний еталонний фотометр з фільтром видимості на базі інтегруючої сфери 250 мм;

- система вимірювання фотоструму еталонного первинного вимірювального перетворювача та сферичного фотометра;

- оптична лава з елементами оптичного тракту та світлозахисним кожухом;

- *установки для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання великих розмірів*, до складу якої входять:

- джерело випромінювання на базі галогенної лампи;

- оптико-механічна система формування спрямованого світлового потоку;

- еталонний первинний вимірювальний перетворювач на базі трап-детектора з фільтром видимості та системою автоматизованого механічного переміщення;

- сферичний еталонний фотометр з фільтром видимості на базі інтегруючої сфери 2 м;

- система вимірювання фотоструму еталонного первинного вимірювального перетворювача та сферичного фотометра;

- оптична лава з елементами оптичного тракту та світлозахисним кожухом;

- *системи автоматичного керування, реєстрування та обробки інформації на основі засобів обчислювальної техніки;*

- *системи живлення джерел випромінювання.*

Структурно-функціональну схему комплексу апаратури державного первинного еталона наведено на рис. 1, а зовнішній вигляд еталона — на 3-й стор. обкладинки.

Установка для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання

малих розмірів забезпечує відтворення одиниці світлового потоку на довжині хвилі 546,1 нм за допомогою джерела оптичного випромінювання на базі ртутної лампи з оптико-механічною системою формування монохроматичного спрямованого світлового потоку на довжині хвилі 546,1 нм та еталонного первинного вимірювального перетворювача на базі трап-детектора з системою автоматизованого механічного переміщення.

Установка забезпечує передавання розміру одиниці світлового потоку робочим еталонам — еталонним джерелам випромінювання — за допомогою сферичного еталонного фотометра з фільтром видимості на базі інтегруючої сфери 250 мм. Функціональну схему установки наведено на рис. 2.

Для відтворення одиниці світлового потоку за допомогою джерела оптичного випромінювання на базі ртутної лампи та оптико-механічної системи з інтерференційним фільтром на довжині хвилі 546,1 нм формується спрямований монохроматичний світловий потік, який надходить в еталонний первинний вимірювальний перетворювач на базі трап-детектора із системою автоматизованого механічного переміщення.

Для вимірювання потужності потоку монохроматичного випромінювання в трап-детекторі використовуються фотодіоди S1337-1010 BQ фірми “Hamamatsu”, які мають стовідсоткову внутрішню квантову ефективність для оптичного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 400 до 900 нм.

Для забезпечення стовідсоткової зовнішньої квантової ефективності використовується схема вимірювання монохроматичного потоку випромінювання на довжині хвилі 546,1 нм, яку наведено на рис. 3. Принцип роботи цієї схеми полягає в тому, що монохроматичний потік випромінювання під кутом 30° надходить у фотодіод № 1 і відбита частина під тим же кутом потрапляє у фотодіод № 2. Відбитий від фотодіода № 2 потік під прямим кутом надходить у фотодіод № 3, в результаті чого відбитий від фотодіода № 3 потік здійснює зворотний хід.

У зв’язку з тим, що потік 5 разів потрапляє на фотодіоди, лише невелика його частина, менш ніж 0,1 % (при 546,1 нм), виходить назад з трап-детектора. При цьому коефіцієнт поглинання випромінювання трап-детектора стає близьким до одиниці, що забезпечує практично стовідсоткову зовнішню квантову ефективність трап-детектора [2–14].

Схему вимірювання світлового потоку від еталонних джерел випромінювання, що перевіряються за допомогою сферичного фотометра 250 мм, наведено на рис. 4.

Фотометр має внутрішнє покриття із BaSO₄. На боковій поверхні фотометра розміщено фотодіод S1337-1010BQ фірми “Hamamatsu” з молочним склом та фільтром видимості, який коригує

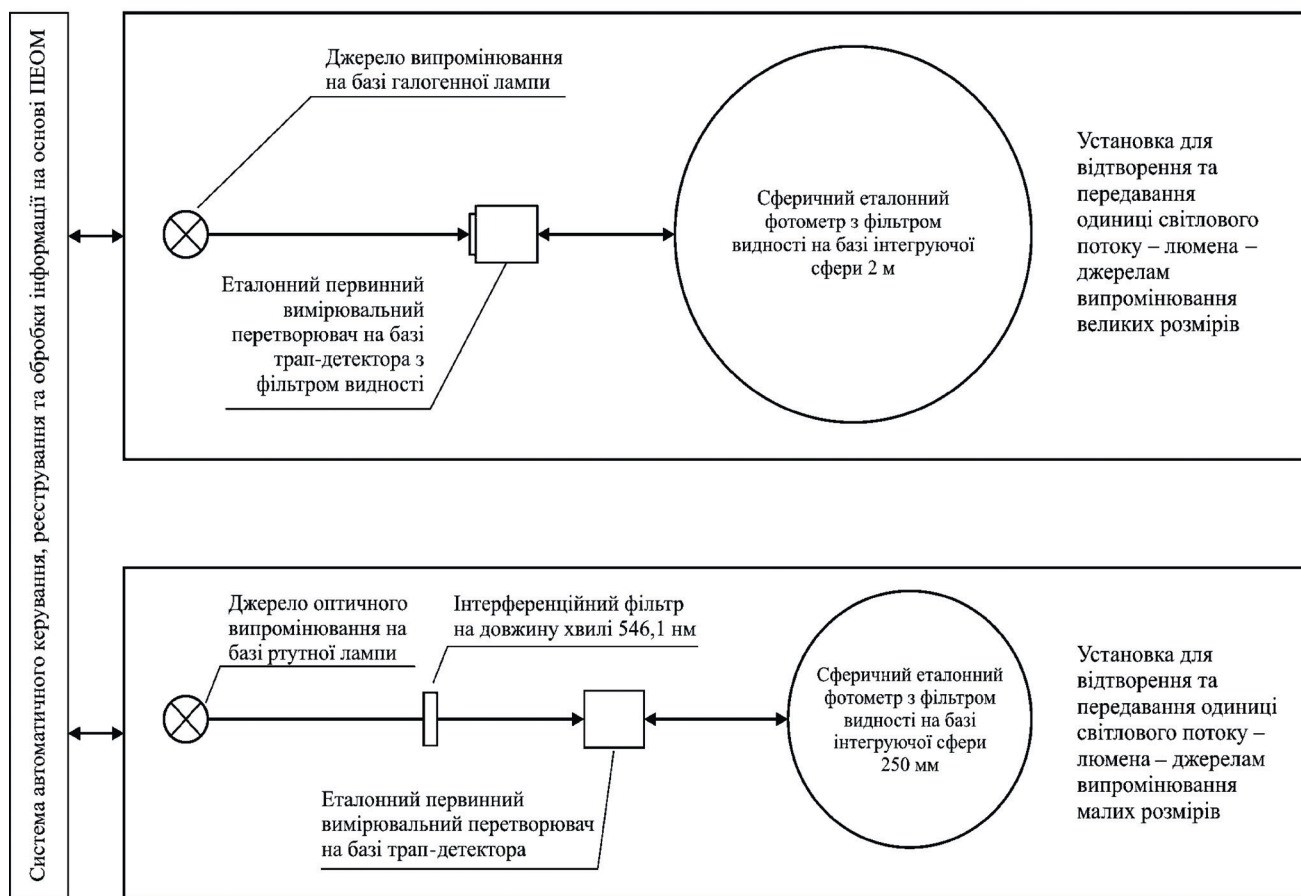


Рис. 1. Структурно-функціональна схема комплексу апаратури державного первинного еталона одиниці світлового потоку

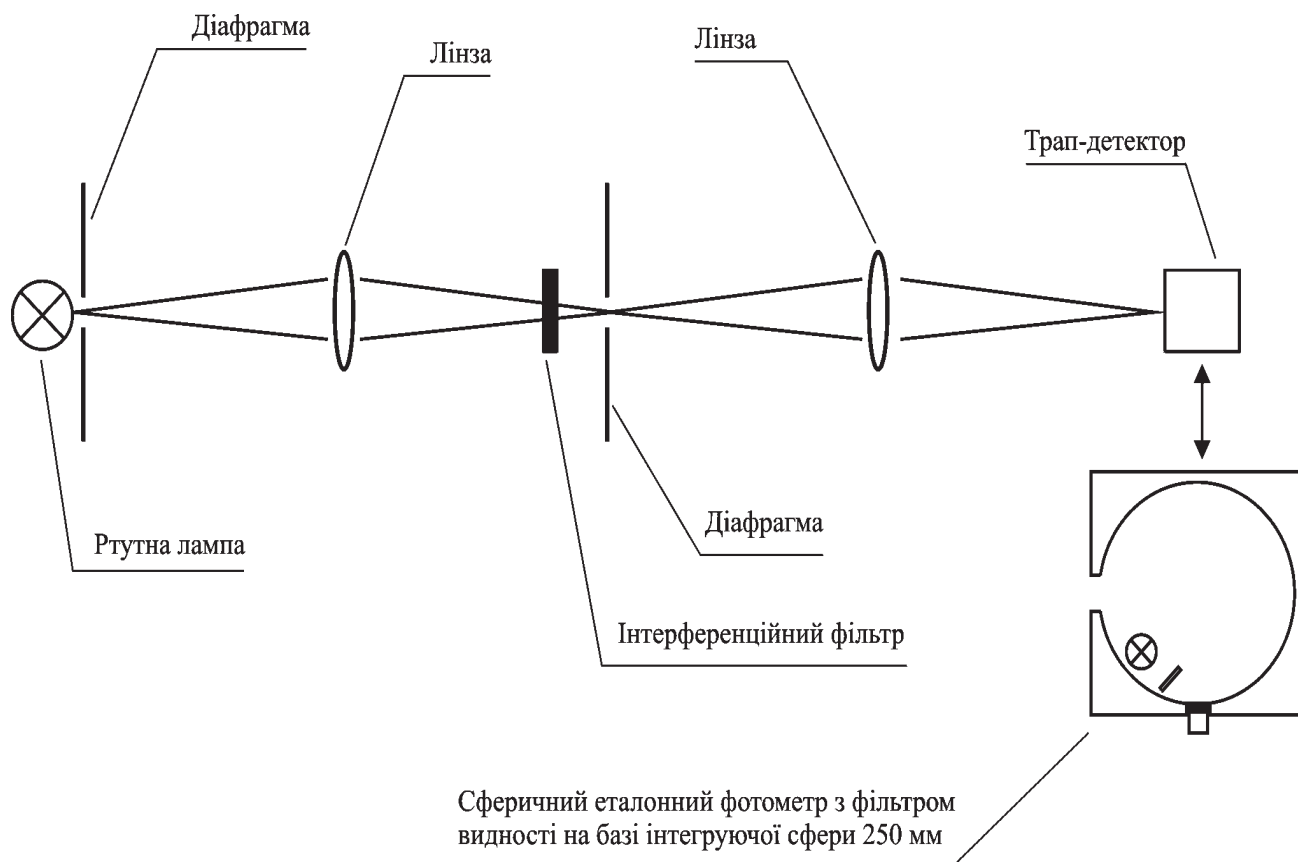


Рис. 2. Функціональна схема установки для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання малих розмірів

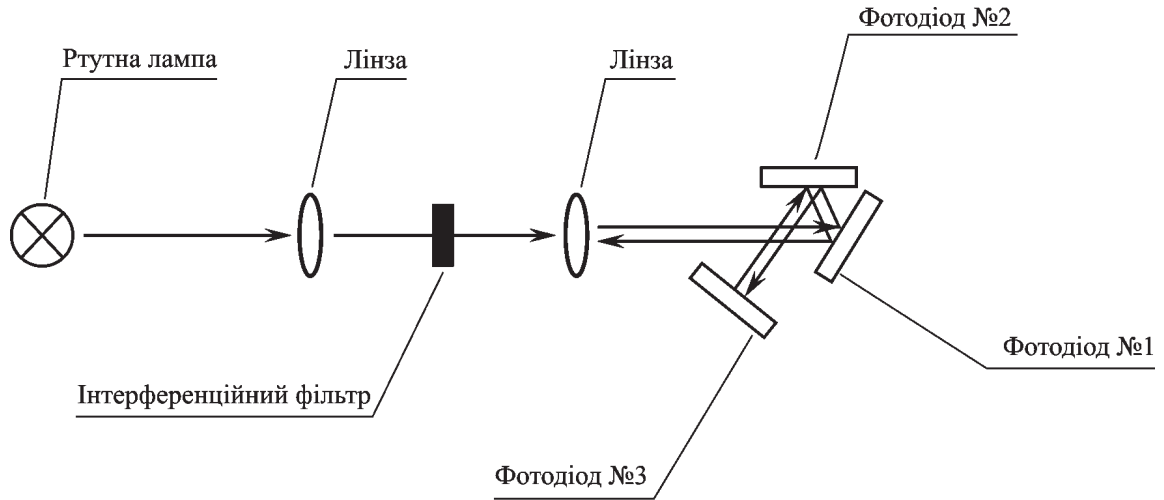


Рис. 3. Схема установки для вимірювання потужності потоку монохроматичного випромінювання за допомогою трап-детектора

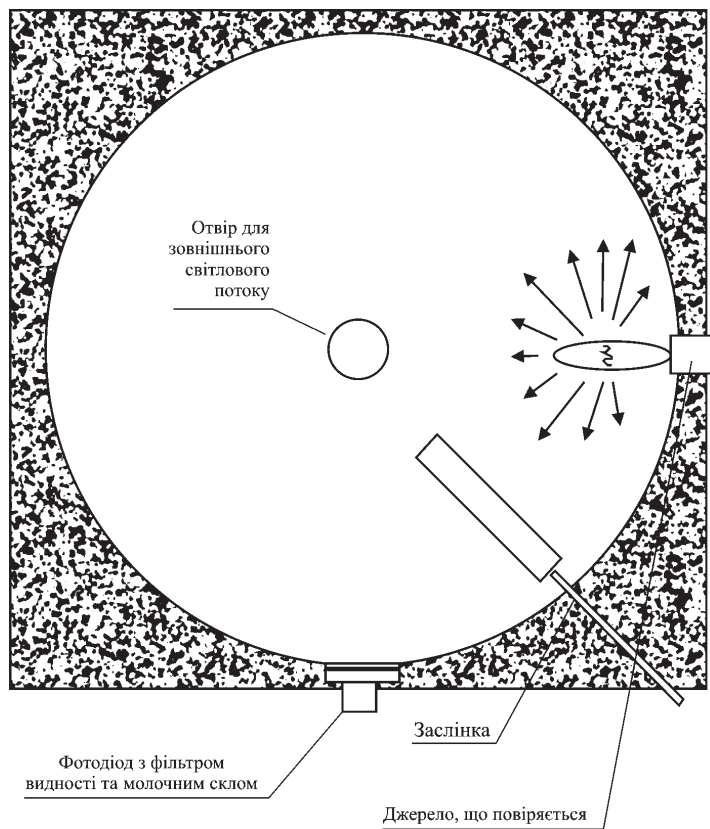


Рис. 4. Схема вимірювання світлового потоку сферичним еталонним фотометром на базі інтегруючої сфери 250 мм

відносну спектральну чутливість фотометра під криву денного зору відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.332:2008. У середині сфери також розміщується джерело випромінювання, якому передається розмір одиниці. Між джерелом випромінювання та фотоприймачем розміщено заслінку, яка не дозволяє прямим променям від джерела світла потрапляти на молочне скло. Крім того, фотометр має отвір, який дозволяє зовнішньому світловому потоку надходити на стінку сфери таким чином, щоб світлова пляма від потоку випромінювання знаходилася у полі зору приймача з фільтром видимості.

Така конструкція дозволяє вимірювати чутливість фотометра за допомогою відомого зовнішнього світлового потоку та використовувати це значення чутливості для вимірювання світлового потоку від еталонного джерела світлового потоку, що повіряється.

Установка для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання великих розмірів забезпечує відтворення одиниці інтегрованого світлового потоку за допомогою джерела оптичного випромінювання на базі галогенної лампи з оптико-механічною системою

формування спрямованого світлового потоку та еталонного первинного вимірювального перетворювача на базі трап-детектора з фільтром видимості та системою автоматизованого механічного переміщення.

Ця установка забезпечує передавання розміру одиниці світлового потоку робочим еталонам – джерелам випромінювання – за допомогою сферичного еталонного фотометра з фільтром видимості на базі інтегруючої сфери діаметром 2 м. Функціональну схему установки наведено на рис. 5.

Для відтворення одиниці світлового потоку за допомогою джерела оптичного випромінювання на базі галогенної лампи та оптико-механічної системи формується спрямований світловий потік, який надходить в еталонний первинний вимірювальний перетворювач на базі трап-детектора з фільтром видимості та системою автоматизованого механічного переміщення.

Системою вимірювання фотоструму вимірюється сигнал еталонного первинного перетворювача

на базі трап-детектора, при цьому визначаються значення світлових потоків.

Результати досліджень еталона

Відповідно до вибраного принципу побудови еталона та розробленого складу еталона, для забезпечення необхідних метрологічних характеристик в усьому робочому діапазоні світлових потоків в еталоні використовуються дві установки, в яких відтворюється одиниця світлового потоку: установка для відтворення та передавання одиниці світлового потоку – люмена – джерелам випромінювання малих розмірів (установка № 1) та установка для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання великих розмірів (установка № 2). В установці № 1 відтворюється одиниця світлового потоку на рівні від 1 до 500 лм, а розмір одиниці вимірювань передається джерелам випромінювання малих розмірів. В установці № 2 відтворюється одиниця світлового потоку на рівні від 500 до 1500 лм.

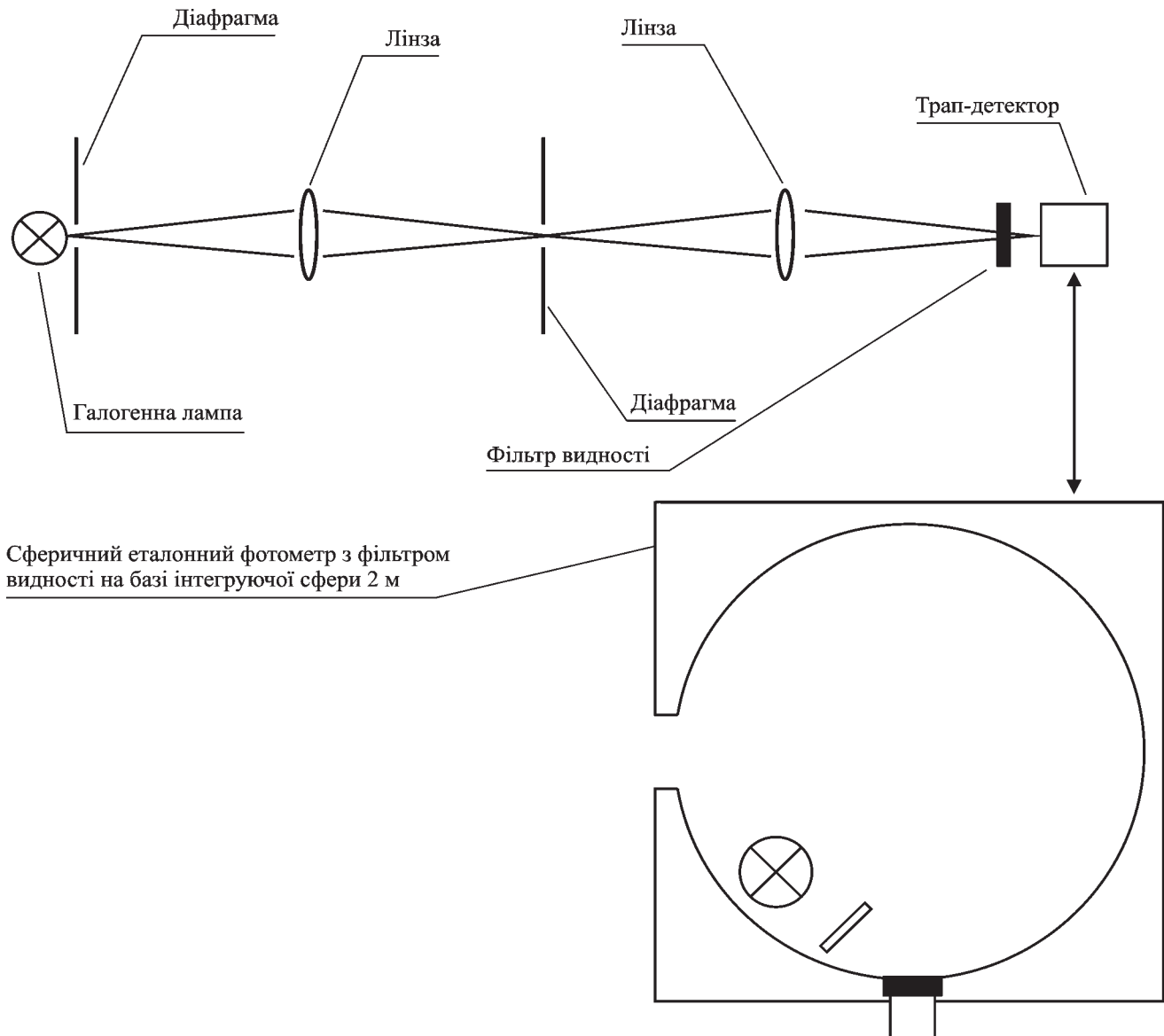


Рис. 5. Функціональна схема установки для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання великих розмірів

Рівняння вимірювання при відтворенні державним первинним еталоном розміру одиниці світлового потоку має такий вигляд:

$$\Phi = k_1 \cdot I_{(EF,i)}$$

де Φ – світловий потік, одиниця якого відтворюється на еталоні; $i = 1, 2$ – індекс, що вказує номер установки, в якій відтворюється одиниця; k_1 – коефіцієнт перетворення еталонного фотометра в установці № 1 (при використанні еталонного джерела № 1 з довжиною хвилі 546,1 нм); k_2 – коефіцієнт перетворення еталонного фотометра в установці № 2 (при використанні еталонного джерела випромінювання № 2); $I_{(EF,i)}$ – струм на виході трап-детектора еталонного фотометра при використанні джерела випромінювання № i .

Основною метрологічною характеристикою джерела випромінювання з довжиною хвилі 546,1 нм є монохроматичність цього випромінювання, що безпосередньо впливає на похибку відтворення одиниці світлового потоку.

У зв'язку з тим, що як джерело № 1 використовується ртутна лампа, в оптичному тракті встановлено інтерференційний фільтр, який виділяє лінію ртуті 546,1 нм та подавляє інші лінії: 390,64; 404,66; 435,83; 578,97; 579,07; 1013,98; 1123,74 нм.

Для визначення ефективності фільтра було проведено дослідження спектрального коефіцієнта пропускання в усьому діапазоні чутливості трап-детектора.

Дослідження проведено на державному первинному еталоні одиниць спектральних коефіцієнтів спрямованого пропускання, дзеркального і дифузного відбиття в діапазоні довжин хвиль від 0,2 до 25 мкм (ДЕТУ 11-09-08).

За результатами проведених досліджень було встановлено, що коефіцієнт пропускання найбільш

потужних ліній випромінювання ртутної лампи в області 579 нм становив до 3,2 %, тому фільтр було доповнено пурпуровим склом типу ПС-7. Результати дослідження доопрацьованого фільтра наведено на рис. 6.

Фільтр забезпечує заглушення інтенсивності всіх ліній ртутної лампи до 0,08 %, окрім лінії на довжині хвилі 546,1 нм. Це знижує похибку відтворення світлового потоку за цією складовою до рівня менше ніж 0,01 %.

Проведено дослідження еталонного первинного вимірювального перетворювача на базі трап-детектора, який застосовується в установці № 1. Основною характеристикою трап-детектора при відтворенні одиниці світлового потоку є його абсолютна спектральна чутливість на довжині хвилі 546,1 нм.

Чутливість трап-детектора вимірювалася на державному первинному еталоні одиниць спектральної густини енергетичної яскравості, спектральної густини енергетичної освітленості; потужності випромінювання та енергетичної освітленості (ДЕТУ 11-06-06). Значення чутливості трап-детектора на довжині хвилі 546,1 нм становило $S = 0,4405$ А/Вт. Відносна похибка вимірювання чутливості не перевищувала 0,05 %.

Було проведено дослідження сферичного еталонного фотометра на базі інтегруючої сфери 250 мм з фільтром видності. Однією із основних метрологічних характеристик сферичного фотометра з фільтром видності є відмінність його відносної спектральної чутливості від відносної спектральної ефективності монохроматичного випромінювання для денного зору $V(\lambda)$ у відповідності до ДСТУ ГОСТ 8.332:2008 [15].

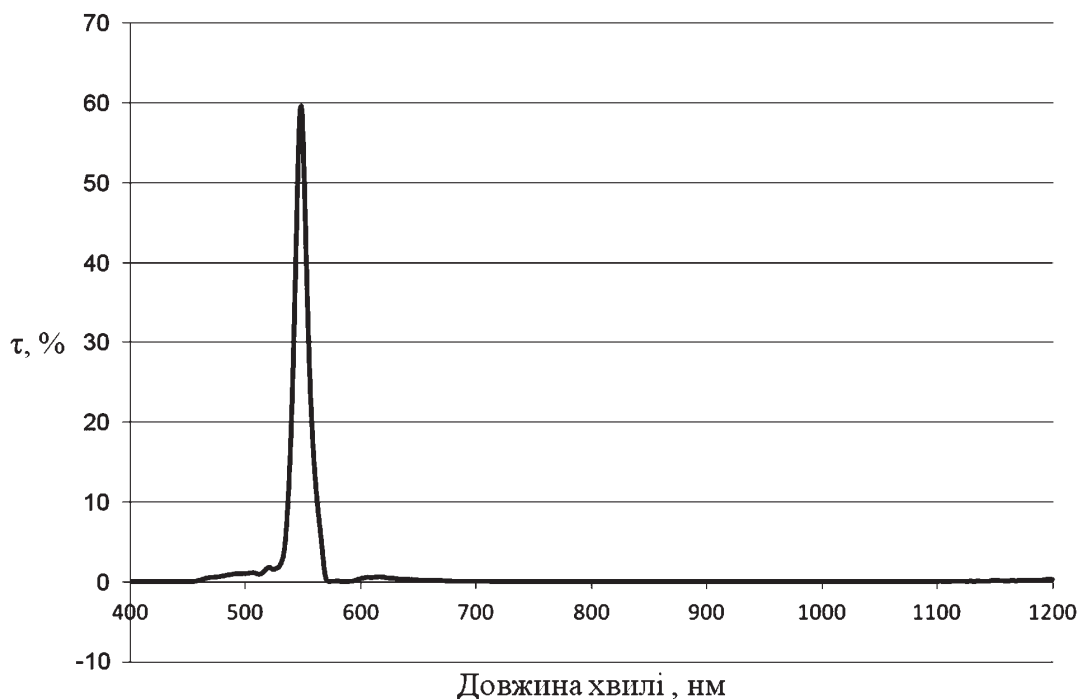


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнтів пропускання інтерференційного фільтра зі склом ПС-7 від довжини хвилі

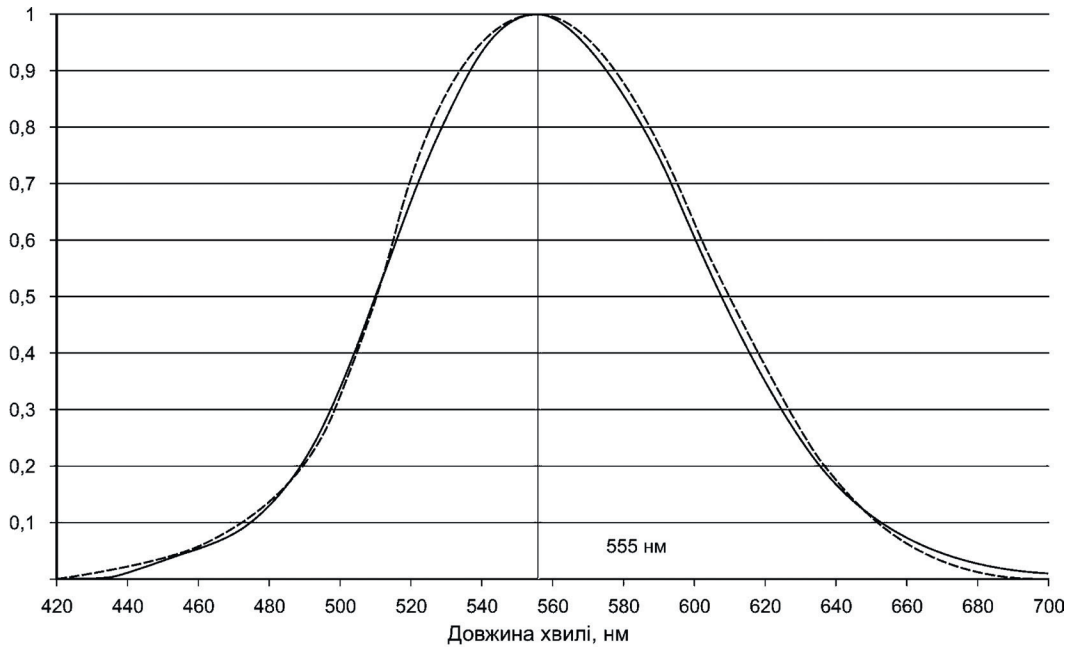


Рис. 7. Графік залежності відносної спектральної чутливості $s(\lambda)$ сферичного фотометра з фільтром відносності від довжини хвилі: — S-чутливість трап-детектора; --- V-крива відносності ГОСТ 8.332-78

Дослідження відносної спектральної чутливості сферичного фотометра проводилися на державному первинному еталоні ДЕТУ 11-06-06.

Результати досліджень наведено на рис. 7. На графіку показано відмінність відносної спектральної чутливості сферичного фотометра $s(\lambda)$ від кривої денного зору $V(\lambda)$.

У результаті досліджень було визначено відмінність відносної спектральної чутливості сферичного фотометра $s(\lambda)$ від кривої $V(\lambda)$ за критерієм f_1' :

$$f_1' = \frac{\int_0^{\infty} |s^*(\lambda) - V(\lambda)| \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) d\lambda} \cdot 100\%;$$

$$s^*(\lambda) = \frac{\int_{380}^{780} B(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} B(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda} \cdot s(\lambda).$$

Для сферичного еталонного фотометра на базі інтегруючої сфери 250 мм з фільтром відносності цей критерій становив $f_1' = 2,8\%$. При цьому актинічність для еталонних джерел випромінювання типу А становила $A = 1,01$.

Другою не менш важливою метрологічною характеристикою сферичного фотометра є однорідність його зонної чутливості. Це пов'язано з тим, що у першому дифузному відбитті світлового потоку від випромінювання еталонної лампи всередині фотометра застосовується вся внутрішня площа сфери, а при спрямованому випромінюванні – тільки частина стінок сфери.

Для визначення однорідності спрямований світловий потік спрямовувався на різні частини внутрішньої поверхні сфери. Відносна різниця сигналів на фотоприймачі сфери при цьому не перевищувала 0,17%.

Також проведено дослідження еталонного первинного вимірювального перетворювача на базі трап-детектора з фільтром відносності, який застосовується в установці для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання великих розмірів.

Для відтворення інтегрованого світлового потоку основною метрологічною характеристикою еталонного первинного вимірювального перетворювача на базі трап-детектора з фільтром відносності є відмінність його відносної спектральної чутливості від відносної спектральної ефективності монохроматичного випромінювання для денного зору $V(\lambda)$. Крім того, необхідно визначити його максимальну абсолютну спектральну чутливість у зв'язку з тим, що при вимірюванні інтегрованого світлового потоку від галогенної лампи чутливість приймача до світлового потоку визначається як

$$S(\lambda) = S(\lambda)_{\max} / (683 \cdot A),$$

де $S(\lambda)_{\max}$ – максимальна абсолютна спектральна чутливість сферичного фотометра.

Актинічність A трап-детектора до світлового потоку галогенної лампи визначається за формулою

$$A = \frac{\int_{380}^{780} B(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} B(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda},$$

де $B(\lambda)$ – відносний спектральний розподіл потоку випромінювання еталонного джерела випромінювання типу А; $s(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість сферичного фотометра.

Дослідження відносної спектральної чутливості трап-детектора з фільтром відносності проведено на державному первинному еталоні ДЕТУ 11-06-06.

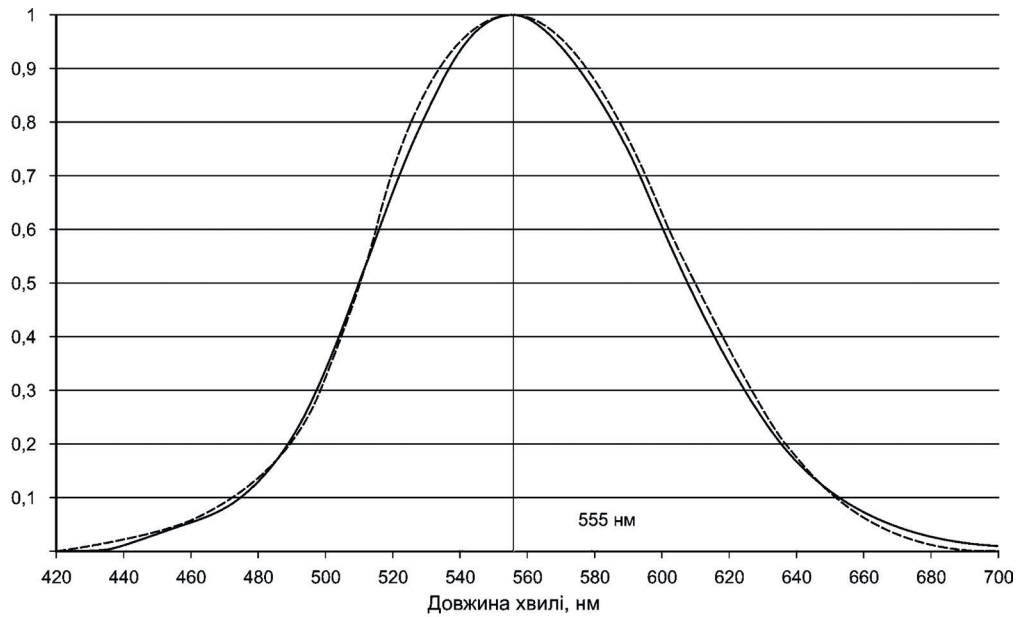


Рис. 8. Графік залежності відносної спектральної чутливості $s(\lambda)$ трап-детектора з фільтром видності від довжини хвилі випромінювання: — S-чутливість сферичного фотометра; --- V-крива видності ГОСТ 8.332-78

Результати досліджень наведено на рис. 8. На графіку показано відмінність відносної спектральної чутливості сферичного фотометра $s(\lambda)$ від кривої $V(\lambda)$.

У результаті досліджень було визначено відмінність відносної спектральної чутливості сферичного фотометра $s(\lambda)$ від кривої $V(\lambda)$ за критерієм f_1' :

Для трап-детектора з розробленим фільтром видності критерій оцінки відмінності його відносної спектральної чутливості від кривої видності становив $f_1' = 2,75 \%$.

При цьому активність для еталонних джерел типу A становила $A = 1,007$.

Максимальна абсолютна чутливість трап-детектора з фільтром видності на довжині хвилі 555 нм також вимірювалася на державному первин-

ному еталоні ДЕТУ 11-06-06 та становила $S(\lambda)_{\max} = 0,25004$ А/Вт. Відносна похибка вимірювання чутливості на довжині хвилі 555 нм не перевищувала 0,1 %.

Найважливішою характеристикою еталонного сферичного фотометра з фільтром видності на базі інтегруючої сфери 2 м є спектральний коефіцієнт дифузного відбиття внутрішньої поверхні сфери, який дозволяє визначити відмінність відносної спектральної чутливості сферичного фотометра від кривої видності $V(\lambda)$. У зв'язку з цим було проведено дослідження поверхні сфери з покриттям $BaSO_4$. Результати цих досліджень наведено на рис. 9.

Дослідження однорідності зонної чутливості еталонного фотометра з фільтром видності на базі

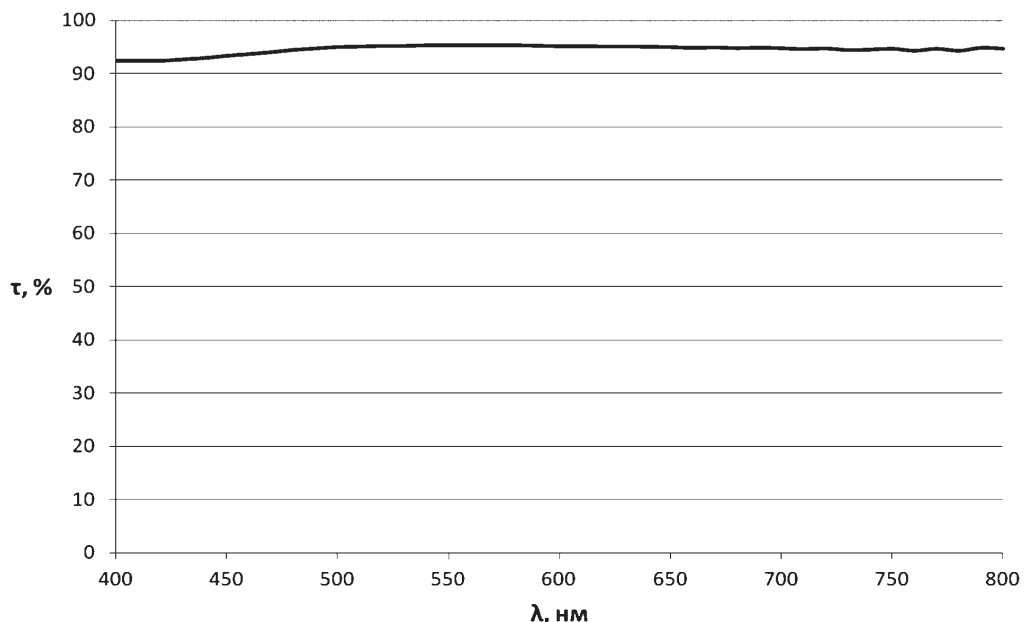


Рис. 9. Спектральна характеристика коефіцієнта відбиття покриття еталонного фотометра з фільтром видності на базі інтегруючої сфери 2 м

інтегруючої сфери 2 м проводилися аналогічно дослідженням фотометра на базі інтегруючої сфери 250 мм. Відносна різниця сигналів на фотоприймачі сфери при цьому не перевищувала 0,2 %.

Основною метрологічною характеристикою еталона при відтворенні одиниці світлового потоку є його похибка, що характеризується випадковою похибкою, вираженою у вигляді середнього квадратичного відхилення (СКВ) результату вимірювань при відтворенні одиниці та невилученою систематичною похибкою (НСП).

Виходячи з рівняння вимірювання, СКВ результату вимірювання світлового потоку і границю НСП можна подати у такому вигляді:

$$S_{\Phi} = \left(S_1^2 + S_{\Phi_{0,i}}^2 \right)^{1/2};$$

$$\Theta_{\Phi} = |\Theta_1| + |\Theta_{k_i}|,$$

де $i = 1, 2$ – індекс, що вказує номер установки, в якій відтворюється одиниця; S_{Φ} – СКВ результату вимірювань при відтворенні одиниці світлового потоку; Θ_{Φ} – границя НСП відтворення одиниці світлового потоку для довірчої імовірності 0,99; S_1 – оцінка СКВ результату вимірювання струму на виході трап-детектора еталонного фотометра; $S_{\Phi_{0,i}}$ (або $S_{\Phi_{0,2}}$) – нестабільність світлового потоку від джерела випромінювання № 1 (або № 2) при відтворенні одиниці світлового потоку в установці № 1 (або № 2); Θ_1 – границя складової НСП вимірювання світлового потоку, що пов'язана з похибкою вимірювання струму на виході трап-детектора еталонного фотометра; Θ_{k_i} (або Θ_{k_2}) – границя складової НСП вимірювання світлового потоку, що пов'язана з похибкою вимірювання коефіцієнта перетворення еталонного фотометра k_1 в установці № 1 (або з похибкою вимірювання коефіцієнта перетворення еталонного фотометра k_2 в установці № 2).

На підставі теоретичного аналізу систематичних і випадкових складових похибки відтворення еталонної одиниці світлового потоку і результатів експериментальних досліджень проведено оцінку метрологічних характеристик еталона. Проведені оцінки показують, що сумарне значення відносної похибки відтворення одиниці світлового потоку для довірчої імовірності $P = 0,99$ має такі складові: при відтворенні одиниці на установці № 1 – СКВ $\leq 0,13$ %; НСП $\leq 0,15$ %; при відтворенні одиниці на установці № 2 – СКВ $\leq 0,13$ %; НСП $\leq 0,25$ %.

Відносна сумарна стандартна невизначеність вимірювань при відтворенні одиниці світлового потоку $\frac{u_c(\Phi)}{\Phi}$ розраховується за формулами:

при відтворенні одиниці світлового потоку на установці № 1 –

$$\left(\frac{u_c(\Phi)}{\Phi} \right)^2 = \left(\frac{u(I)}{I} \right)^2 + \left(\frac{u(k_1)}{k_1} \right)^2 + \left(\frac{u_A(\Phi_{0,1})}{\Phi_{0,1}} \right)^2$$

при відтворенні одиниці світлового потоку на установці № 2 –

$$\left(\frac{u_c(\Phi)}{\Phi} \right)^2 = \left(\frac{u(I)}{I} \right)^2 + \left(\frac{u(k_2)}{k_2} \right)^2 + \left(\frac{u_A(\Phi_{0,2})}{\Phi_{0,2}} \right)^2,$$

де $u_A(\Phi_{0,i})$ – стандартні невизначеності, що оцінені за типом A .

Отримані значення відносних стандартних невизначеностей оцінок вхідних величин наведено в табл. 1.

Відносна сумарна стандартна невизначеність вимірювань при відтворенні одиниці світлового потоку на установці № 1 становить

$$\frac{u_c(\Phi)}{\Phi} = 0,07 \%,$$

на установці № 2 –

$$\frac{u_c(\Phi)}{\Phi} = 0,12 \%.$$

Розширена невизначеність при відтворенні одиниці світлового потоку в установці № 1 (установці № 2) не перевищує значень: 0,14 % (0,24 %) для коефіцієнта охоплення $k = 2$ і довірчої імовірності $P = 0,95$ та 0,21 % (0,36 %) для коефіцієнта охоплення $k = 3$ і довірчої імовірності $P = 0,99$.

Проведено порівняння одержаних метрологічних характеристик еталона з характеристиками еталонів світлового потоку різних країн. Результати порівняння наведено в табл. 2. Значення метрологічних характеристик для відповідних еталонів зарубіжних країн наведено за даними щодо калібрувальних та вимірювальних можливостей національних метрологічних інститутів, опублікованих на сайті Міжнародного бюро мір та ваг.

Як висновок слід відзначити, що метрологічні характеристики створеного еталона одиниці світлового потоку знаходяться на рівні відповідних характеристик національних еталонів економічно розвинених країн і відповідають сучасним вимогам у галузі забезпечення єдності вимірювань світлових величин.

Державна повірочна схема для засобів вимірювання світлового потоку

При створенні державного первинного еталона одиниці світлового потоку розроблено проект стандарту на державну повірочну схему для засобів вимірювання світлового потоку (рис. 10).

При розробленні проекту стандарту було розглянуто такі завдання:

- встановлення у державній повірочній схемі статусу всіх засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), що застосовуються в Україні для вимірювання світлового потоку випромінювання;
- визначення оптимальної кількості ступенів повірочної схеми;

Стандартні невизначеності вхідних величин

Складові відносної стандартної невизначеності вимірювання світлового потоку	Джерело невизначеності	Значення відносної стандартної невизначеності, %
$\frac{u(I)}{I}$	Виміряне значення фотоструму на виході трап-детектора еталонного фотометра	0,023
$\frac{u(k_1)}{k_1}$	Виміряне значення коефіцієнта перетворення еталонного фотометра в установці № 1	0,063
$\frac{u(k_2)}{k_2}$	Виміряне значення коефіцієнта перетворення еталонного фотометра в установці № 2	0,116
$\frac{u_A(\Phi_{0,1})}{\Phi_{0,1}}$	Нестабільність світлового потоку від джерела випромінювання № 1	0,02
$\frac{u_A(\Phi_{0,2})}{\Phi_{0,2}}$	Нестабільність світлового потоку від джерела випромінювання № 2	0,02

Таблиця 2

Метрологічні характеристики еталонів світлового потоку

Країна	Організація, де зберігається еталон	Характеристики еталона
Велика Британія	NPL	Діапазон – 100...2·10 ⁴ лм Розширена невизначеність – 0,5 %
Німеччина	PTB	Діапазон – 100...10 ⁴ лм Розширена невизначеність – 0,6 %
США	NIST	Діапазон – 0,1...10 ⁴ лм Розширена невизначеність – 0,5 %
Російська Федерація	ВНИИОФИ	Діапазон – 500...1500 лм СКВ – 0,13·10 ⁻² НСП – 0,25·10 ⁻²
Україна	ННЦ “Інститут метрології”	Діапазон – 1...1500 лм СКВ – 0,13·10 ⁻² НСП – 0,25·10 ⁻² Розширена невизначеність не перевищує 0,4 %

• нормування похибок еталонів та робочих ЗВТ, а також методів передавання одиниці світлового потоку випромінювання на всіх рівнях повірочної схеми;

• забезпечення компактності та зручності сприймання повірочної схеми.

Державна повірочна схема стандартизує методи, засоби та похибки передавання розміру одиниці світлового потоку від державного первинного еталона робочим еталонам і робочим засобам вимірювальної техніки.

Державна повірочна схема дає можливість забезпечити єдність і достовірність вимірювань в Україні на необхідному рівні.

Передавання розміру одиниці вимірювання світлового потоку, яка відтворюється, від державного первинного еталона до робочих еталонів або безпосередньо робочим засобам вимірювальної техніки здійснюється методом звірення за допомогою компаратора.

У розробленій державній повірочній схемі як робочі еталони одиниці світлового потоку неперервного випромінювання застосовують комплекси еталонних джерел випромінювання, кожен з яких складається з трьох еталонних джерел (змінних за своїм складом груп) з номінальними значеннями світлового потоку в діапазоні від 10 до 3500 лм, компаратора (фотометра), системи живлення, стабілізації, реєстрації та контролю.

Границі допустимих відносних похибок робочих еталонів становлять від 1,0·10⁻² до 3,0·10⁻².

Робочі еталони застосовують для перевірки (калібрування) робочих засобів вимірювальної техніки методом звірення за допомогою компаратора (фотометра).

Як робочі засоби вимірювальної техніки для вимірювання світлового потоку застосовують світловимірювальні лампи розжарювання (у тому числі галогенні) з номінальними значеннями світлового

поток в діапазоні від 5 до 3500 лм, розрядні вимірювальні лампи з номінальними значеннями світлового потоку в діапазоні від $1 \cdot 10^2$ до $5 \cdot 10^4$ лм і світлодіодні джерела випромінювання з номінальними значеннями світлового потоку в діапазоні від 1 до 800 лм.

Границі допустимих відносних похибок робочих засобів вимірювальної техніки Дв становлять від $3,0 \cdot 10^{-2}$ до $1,5 \cdot 10^{-1}$.

Висновки

Згідно з Програмою розвитку еталонної бази України 2011–2015 рр., ННЦ “Інститут метрології” виконано комплекс робіт зі створення державного первинного еталона одиниці світлового потоку – люмена.

Основні результати, досягнуті в процесі створення державного первинного еталона одиниці світлового потоку, можна сформулювати так:

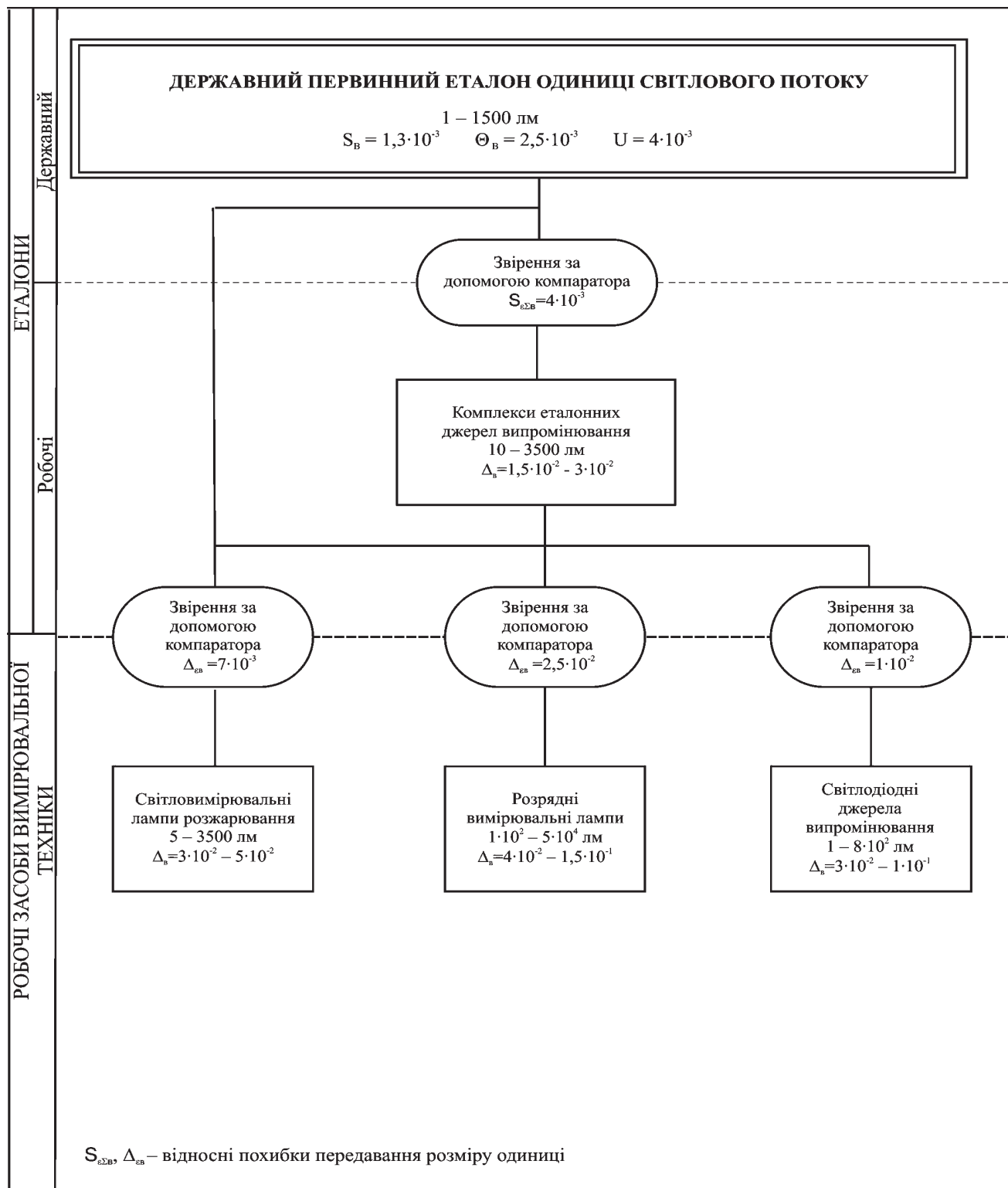


Рис. 10. Державна повірочна схема для засобів вимірювання світлового потоку

- проведено аналіз стану вимірювань світлових параметрів оптичного випромінювання в Україні;
- на основі аналізу розроблено проект національного стандарту на державну повірочну схему для засобів вимірювань світлового потоку;
- розроблено структуру еталона, сформульовано вимоги до окремих вузлів і функціональних блоків комплексу апаратури;
- виготовлено апаратуру складових частин еталона;
- проведено регулювання та дослідження метрологічних характеристик комплексу апаратури еталона.

У результаті проведеного циклу робіт впроваджено комплекс апаратури державного первинного еталона одиниці світлового потоку. Створено умови зберігання, функціонування та застосування еталона.

Створений еталон повністю задовольняє потребам України із забезпечення єдності і достовірності оптико-фізичних вимірювань у галузі вимірювань світлового потоку в країні на теперішньому етапі та на близьку перспективу.

Список літератури

1. Грищенко Л.В. Развитие эталонной базы ННЦ “Институт метрологии” в области оптико-физических измерений / Л.В. Грищенко, Л.А. Назаренко // Український метрологічний журнал. – 2011. – № 3. – С. 33–43.
2. Zalewski E.F. Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration / E.F. Zalewski, J. Geist // Appl. Opt. – 1980. – 19. – P. 1214–1216.
3. Geist J. Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiodes / J. Geist, E.F. Zalewski, A.R. Schaefer // Ibid. – 1980. – 19. – P. 3795–3799.
4. Geist J. High accuracy modeling of photodiode quantum efficiency / J.Geist, H.Baltes // Ibid. – 1989. – 28. – P. 3929–3939.
5. Zalewski E.F. Silicon photodiode device with 100% external quantum efficiency/ E. F. Zalewski, C.R. Duda // Ibid. – 1983. – 22. – P. 2867–2873.
6. Fox N.P. Trap detectors and their properties / N.P. Fox // Metrologia. – 1991. – 28. – P. 197–202.
7. Gardner J.L. A four-element transmission trap detector / J.L. Gardner // Ibid. – 1995. – 32. – P. 469–472.
8. Palmer J.M. Alternative configurations for trap detectors / J.M. Palmer // Ibid. – 1993. – 30. – P. 327–333.
9. Comparison of the NIST High Accuracy Cryogenic Radiometer and the NIST scale of detector spectral response / J.M. Houston, C.L. Cromer, J.E. Hardis, T.C. Larason // Ibid. – 1993. – 30. – P. 285–290.
10. Goebel R. Polarization Dependence of Trap Detectors / R. Goebel, S. Yilmaz, R. Pello // Ibid. – 1996. – 33. – P. 207–213.
11. Gardner J.L. Angular effects in silicon photodiode responsivity comparisons / J.L. Gardner, F.J. Wilkson // Ibid. – 1997. – 34. – P. 111–114.
12. Nonlinearity of the quantum efficiency of Si reflection trap detector at 633 nm / K.D. Stock, S. Morozova, L. Liedquest, H. Hofer // Ibid. – 1998. – 35. – P. 451–454.
13. Goebel R. Nonlinearity and polarization effects in silicon trap detectors / R. Goebel, M. Stock // Metrologia. – 1998. – 35. – P. 413–418.
14. Грищенко Л.В. Высококочувствительный приемник излучения / Л.В. Грищенко, А.Ю. Красногоров, А.А. Шелехов // Метрологія та вимірювальна техніка: VI Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія–2008”, 14–16 жовтня 2008 р., Харків: наук. праці: в 2 т. Т. 2. – Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2008. – С. 5–8.
15. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Світлові вимірювання. Значення відносної спектральної світлової ефективності монохроматичного випромінювання для денного зору: ДСТУ ГОСТ 8.332:2008. – [Чинний від 2008-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – (Державний стандарт України).