

АНАЛІЗ ПОХИБОК СВІТЛОВИМІРЮВАЛЬНИХ ЛАМП ТИПУ СИС

О.Д. Купко, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків
В.В. Терещенко, аспірант Харківського національного університету радіоелектроніки



О.Д. Купко



В.В. Терещенко

Проведено експериментальні дослідження світловимірювальних ламп типу СИС. Проаналізовано основні похибки цих ламп.

Experimental researches of photometrical lamps (type СИС) are conducted. The basic errors of this photometrical lamps are analysed.

Вступ

Світловимірювальні лампи з колбами у вигляді нахиленого конуса використовуються з кінця 20-х рр. минулого століття [1]. Тривалий час саме на використанні таких ламп базувалися світлові вимірювання. Після створення державного первинного еталона одиниці сили світла і відповідної повірочної схеми було взято курс на поступовий перехід від системи метрологічного забезпечення, яка ґрунтується на лампах, до використання коригованих приймачів [2]. Проте на часі існує значний парк світловимірювальних ламп, за допомогою яких підтримується необхідна точність світлових вимірювань. Наразі загальне число постійно використовуваних робочих еталонів світловимірювальних ламп становить декілька десятків. Найбільш поширені світловимірювальні лампи СИС 107-500 і СИС 40-100. Існує багато причин виникнення похибок, дослідження яких продовжується [3]. Саме тому традиційно як робочі еталони рекомендується використовувати комплекси, що складаються з трьох світловимірювальних ламп (змінних за складом груп). Для робочих еталонів повірочна схема [4] встановлює похибку до 2,5 %. Цю роботу присвячено дослідженню похибок світловимірювальних ламп.

Джерела похибок

Зараз в Україні існує 9 типів світловимірювальних ламп із силою світла від 1 до 1500 кд. Вимоги до цих ламп регламентуються ГОСТ 10771-82 [5]. Зокрема, наведено діапазони робочих струмів і напруги для цих ламп. Спеціалізованих виводів для вимірювання напруги безпосередньо на тілі нитки розжарювання лампи немає. З урахуванням того, що опір перехідного контакту між патроном і цоколем лампи може становити до 0,4 Ом, стає очевидним, що при завданні режиму за напругою можливі істотні похибки. На жаль, внаслідок історичних причин задавати режим горіння робочих ламп прийнято саме за напругою. Величина струму через лампу вважається величиною довідковою, хоча очевидно, що використання струму замість напруги ліквідувало б цю складову похибок. Для світловимірювальних ламп, які використовуються як робочі еталони, режим горіння має встановлюватися за кореляційною колірною температурою. У роботі [6] показано, що цей спосіб завдання режиму за точністю відтворення сили світла істотно поступається способу, прийнятому для робочих ламп. У той же час, загальне число робочих еталонів світловимірювальних ламп не настільки велике, щоб негайно розробляти новий відповідний стандарт. Тому при пересуванні лампи між установками необхідно проводити оцінку похибки, яка обумовлена втратами напруги на перехідних контактах і проводах.

Форму колби світловимірювальних ламп було розроблено для того, щоб віддзеркалення від стінок колби лампи не впливали на силу світла. Для того щоб на силу світла не впливало розсіяне на стінках лампи випромінювання, використовуються щитки – екрани зі стандартизованою формою діафрагм. Щиток не є частиною лампи, він вважається частиною світловимірювальної лави, тому лампи калібруються і використовуються з різними щитками. Відповідно, відстань від нитки розжарювання лампи до щитка, коефіцієнт віддзеркалення щитка, співвідношення між його дзеркальною і дифузною складовими можуть відрізнятися. Частина випромінювання лампи після відбиття від щитка потрапить на нитку розжарювання лампи і збільшить

силу світла. У першому наближенні збільшення сили світла можна оцінити як

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\pi^2 l^4}{S_{\text{щ}} s_{\text{н}} \rho_{\text{щ}} \rho_{\text{н}}}, \quad (1)$$

де I і ΔI – сила світла лампи і її зміна внаслідок наявності відбиття від щитка і ниток розжарювання лампи, відповідно l – відстань від нитки розжарювання до щитка; $S_{\text{щ}}$ – площа щитка; $s_{\text{н}}$ – площа ниток розжарювання та їх тримачів; $\rho_{\text{щ}}$ – коефіцієнт відбиття щитка; $\rho_{\text{н}}$ – коефіцієнт відбиття ниток розжарювання та їх тримачів.

Крім того, форма колби лампи дозволяє уникнути відбиття від нитки лампи, але не від розсіяного випромінювання екрана. Через складний характер відбиття системи “лампа – екран” теоретично оцінити похибки, що виникають від перевідбиття “скло – щиток”, дуже важко.

Частина похибок виникає внаслідок взаємодії випромінювання лампи з установкою (світловимірювальною лавою), на якій проводяться вимірювання. Відбувається розсіяння випромінювання на краях діафрагм, іноді й на стінках установки. За світловимірювальною лампою необхідно встановлювати пастку випромінювання, з якою можуть бути зв’язані істотні похибки. Конструкція пастки, її розташування і частка відбитого від неї світла різні для різних установок, що може призводити до спотворення результатів вимірювань. Відповідне цьому механізму збільшення сили світла можна в першому наближенні оцінити за формулою:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\pi l^2}{S_{\text{щ}} \rho_{\text{л}}}, \quad (2)$$

де $\rho_{\text{л}}$ – коефіцієнт віддзеркалення пастки; I і ΔI – сила світла лампи і її зміна внаслідок наявності відбиття від пастки відповідно.

Перелічені причини і кінцеві розміри тіла розжарювання лампи приводять до відхилень від зручної моделі – закону зворотних квадратів [3].

Крім того, нитки розжарювання у деяких ламп (СИС 107-1500, СИС 107-1000, СИС 107-500 і СИС 40-100) виконано у вигляді спіралі. У роботі [4] показано, що яскравості окремих ділянок спіралі тіла розжарювання лампи істотно відрізняються. Більш важливо те, що в залежності від кута спостереження змінюється площа ділянок нитки розжарювання лампи, які спостерігаються, це явище муару – виникнення узору при накладенні періодичних структур. На рис. 1а наведено фотографію пружини з маленької відстані, при цьому різні частини пружини видно під різними кутами. Добре видно, що в нижній і верхній частинах пружини передня частина витка закриває задню частину витка, в середній частині передня частина витка майже не закриває задню. Розміри нитки і діаметр витків для тіла розжарювання у світловимі-

рювальних лампах інші (рис. 1б), але перекриття задніх витків передніми залежно від кута спостереження залишається.

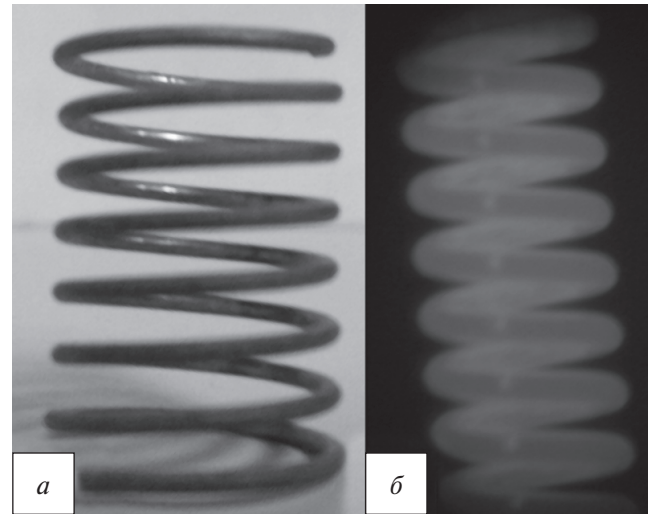


Рис. 1. Зображення пружини з близької відстані: а – вид муарових смуг у пружини з близька; б – вид елемента тіла розжарювання лампи СИС 107-500

У цьому випадку теоретично розрахувати залежність сили світла від кута спостереження досить складно, а індивідуальні особливості ламп роблять спроби такого розрахунку безглуздими. Конструкція лампи не передбачає спеціальних міток, необхідних для точного і відтворного встановлення лампи, тому вертикальність нитки розжарювання можна забезпечити приблизно з точністю до кута, який визначається співвідношенням діаметра спіралі нитки розжарювання з її довжиною. Для ламп СИС 107-500 і СИС 40-100 цей кут становить близько 0,1 радіана. Якщо спіраль не має вигинів і у повірника є достатній досвід, цей кут можна зменшити у декілька разів.

Схема експеримента

У зв’язку з цим було проведено експериментальні дослідження впливу перерахованих джерел похибок на силу світла світловимірювальних ламп. Схему вимірювань наведено на рис. 2.

Вимірювання проводилися у світлоізолюваному відсіку з діафрагмами. Під час вимірювань використовувався стабілізований блок живлення, який підтримував установлену напругу з точністю до 2...3 мВ за час вимірювань. Використовувався термостабілізований фотометр, співвідношення сигнал/шум якого було завжди не гірше 2000. Відстань вимірювалася за допомогою встановленого на каретці мікроскопа, який можна було фокусувати на нитку розжарювання лампи і на вхідну діафрагму фотометра. Каретка переміщалася по оптичній рейці. Положення мікроскопа фіксувалося за допомогою ноніусної шкали і прикріпленої до оптичної рейки лінійки.

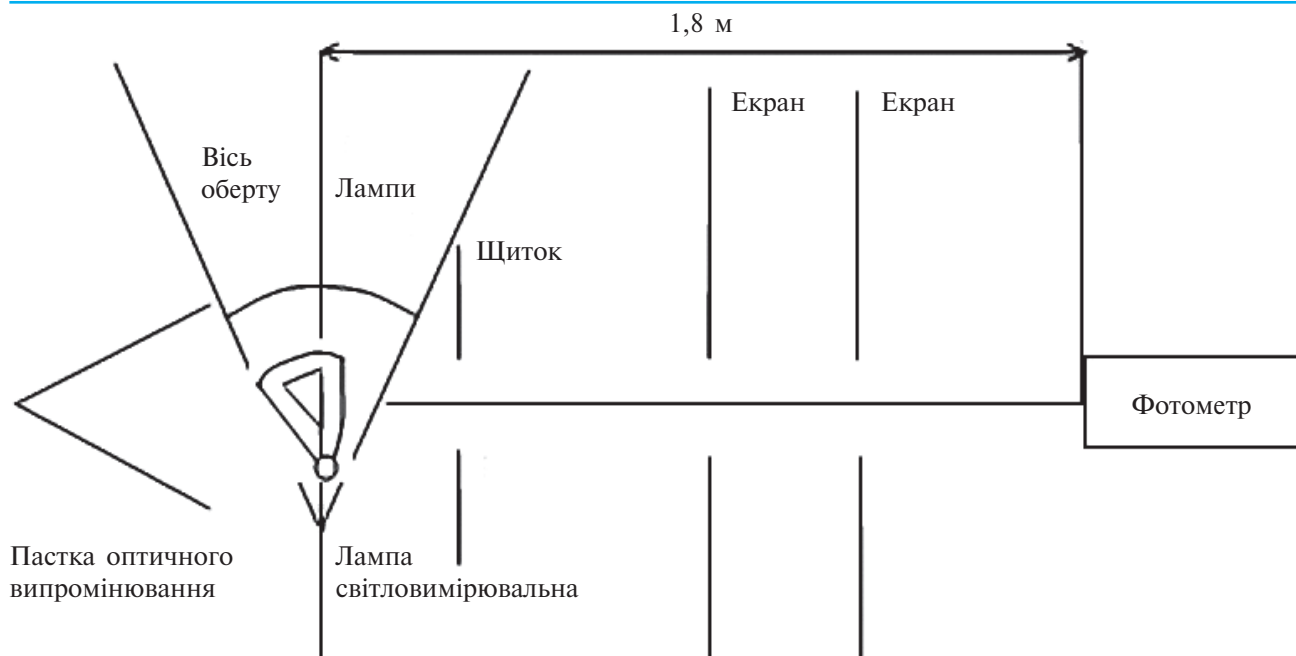


Рис. 2. Схема вимірювань залежності сили світла світловимірювальних ламп від кута нахилу лампи

Досліджувалися лампи зі спіральним тілом розжарювання (СИС 107-1000, СИС 107-500, СИС 40-100) і лампи з тілом розжарювання у вигляді нитки (СИС 107-35, СИС 10-10, СИС 10-5). Слід відзначити деякі труднощі при проведенні вимірювань: по-перше, вузол юстування влаштований так, що зміна кута нахилу лампи приводить до зміни відстані від лампи до фотометра; по-друге – кожна лампа індивідуальна, технологія виготовлення ламп така, що існують значні відмінності в геометричних розмірах.

Попередні вимірювання

Перед вимірюваннями було встановлено зв'язок між кутом повороту гвинта юстування лампи і кутом її відхилення. Перевірка показала, що люфти виявилися незначними, вимірювання, залежно від кута, відтворювалися з точністю, обумовленою постійністю джерела живлення. При кутовому юстуванні максимальний зсув лампи становив від 29 до 18 мм для різних типів ламп. Величину переміщення ламп наведено в табл. 1. Видно, що це істотна величина. Зміна відстані повинна бути врахована під час розрахунку впливу кута нахилу лампи на силу світла.

Для того щоб переконатися, що індивідуальні відмінності ламп зберігають загальні риси вибраного типу ламп, спочатку було проведено вимірювання трьох ламп СИС 107-500. Відповідно до [5], перед лампою необхідно встановлювати щиток. Відсутність щитка є одним із найпоширеніших промахів під час вимірювання, тому було проведено вимірювання сили світла зі щитком і без нього при різних кутах нахилу лампи.

Нормовані результати вимірювань сили світла і різниці в силі світла зі щитком і без нього, залежно від кута нахилу лампи, наведено на рис. 3 у верхньому ряду; різниці в силі світла при вимірюваннях зі щитком і без нього – в нижньому. Наведені на рис. 3 залежності отримано без корекції на зміну відстані від лампи до джерела.

Видно, що в межах кута, який визначається співвідношенням діаметра спіралі нитки розжарювання до її довжини, сила світла змінюється майже на 17 %, тоді як лампи в ранзі робочого еталона повинні забезпечувати похибку не гірше 2,5 %. Залежність у ламп різна, але має загальні риси. У двох ламп залежність від кута нахилу має відносно плоску ділянку: в одному випадку мінімум, в іншому – максимум. Для лампи СИС 107-500 №3 такої ділянки в межах юстування немає.

Таблиця 1

Зв'язок переміщення і кута нахилу світловимірювальних ламп в установці

Лампа	СИС 107-1000	СИС 107-500	СИС 107-35	СИС 40-40	СИС 10-10	СИС 10-5
Переміщення, мм / відносне переміщення, %	29 / 1,6	26 / 1,4	28 / 1,5	18,5 / 1	19,5 / 1	23,5 / 1,3
Зв'язок переміщення і нахилу, мм/рад	165	186	154	126	126	135

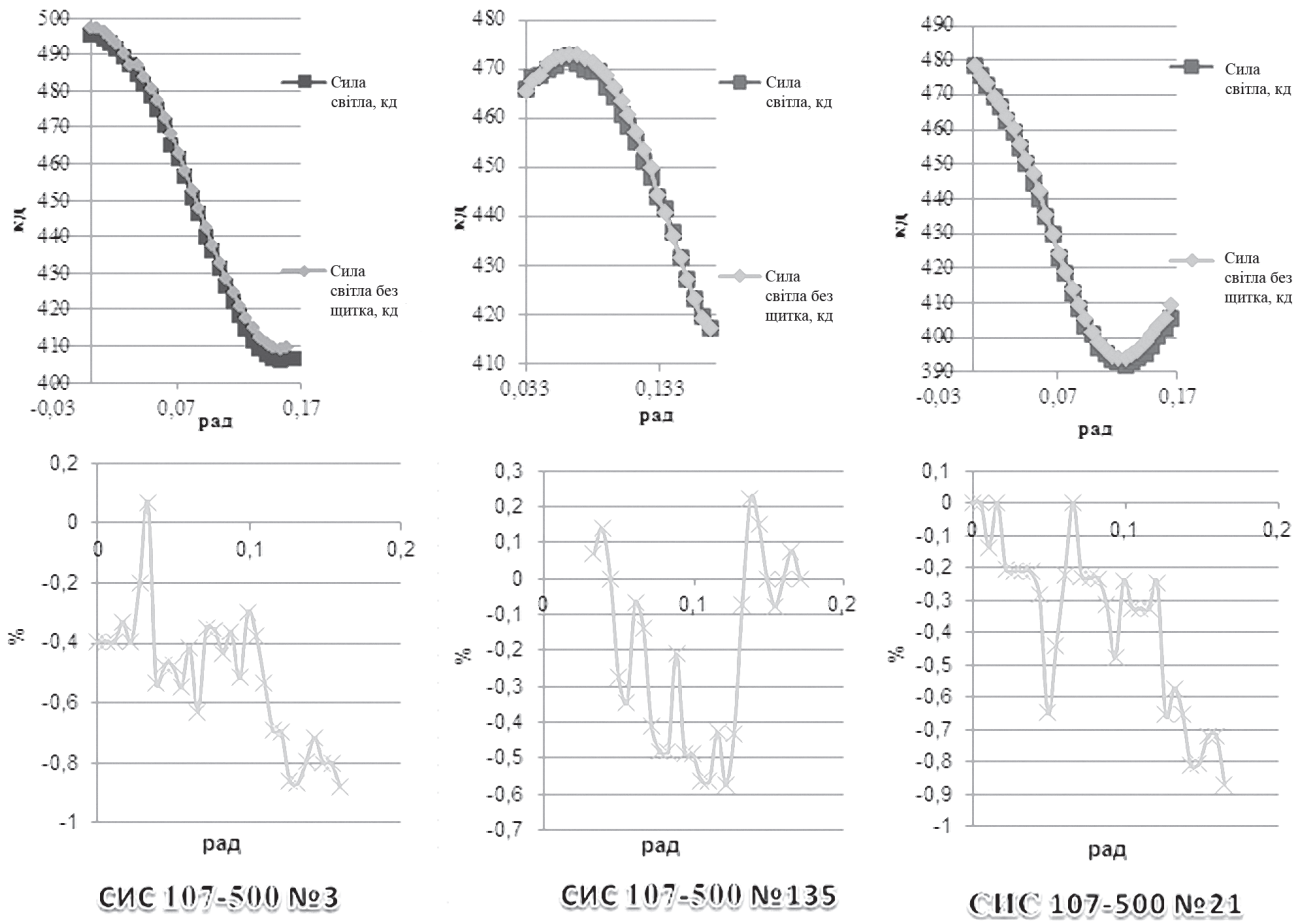


Рис. 3. Нормовані результати вимірювань сили світла ламп СИС 107-500 залежно від кута нахилу лампи зі щитком, без щитка і різниця між ними

Це добре узгоджується з тим фактом, що існують лампи з малою похибкою відтворення сили світла і лампи з істотно більшою похибкою при всіх майже однакових механічних і електричних параметрах. Різниця у вимірюваннях сили світла зі щитком і без нього має хаотичний характер залежності від кута нахилу лампи. У табл. 2 наведено середню різницю в силі світла при вимірюваннях зі щитком і без нього, середньоквадратичне і максимальне відхилення для всіх досліджених кутів нахилу цих типів ламп.

Таблиця 2

Середня різниця в силі світла при вимірюваннях зі щитком і без нього, середньоквадратичне і максимальне відхилення для всіх досліджених кутів нахилу

Лампа	№3	№135	№21
Середня різниця, %	-0,52	-0,21	-0,37
Максимальна різниця, %	0,94	0,79	0,87
Середньоквадратичне відхилення різниці, %	0,22	0,26	0,26

Для того щоб довести спільність поведінки розподілу сили світла для цього типу ламп, результа-

ти було нормовано та зсунуто у такий спосіб, щоб домогтися максимального збігу. Результат обробки даних наведено на рис. 4.

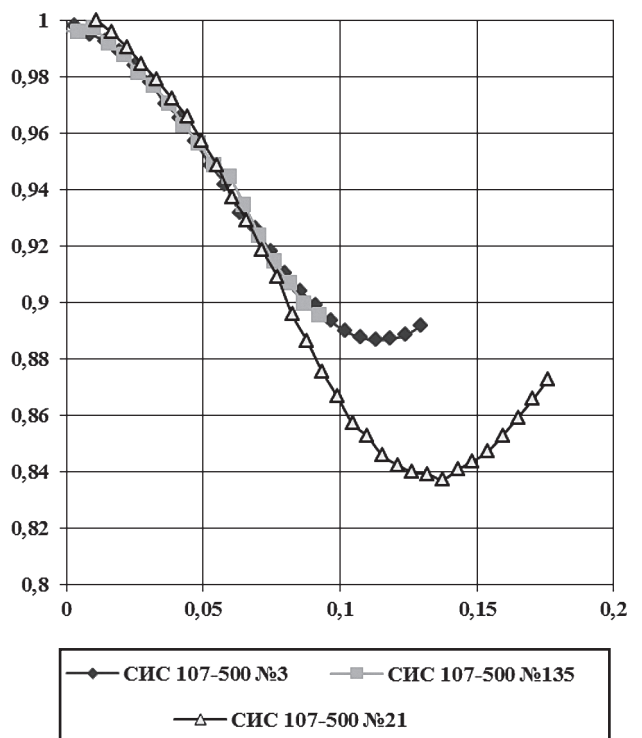


Рис. 4. Результат нормування і зсуву залежностей від кута нахилу сили світла трьох світловимірювальних ламп

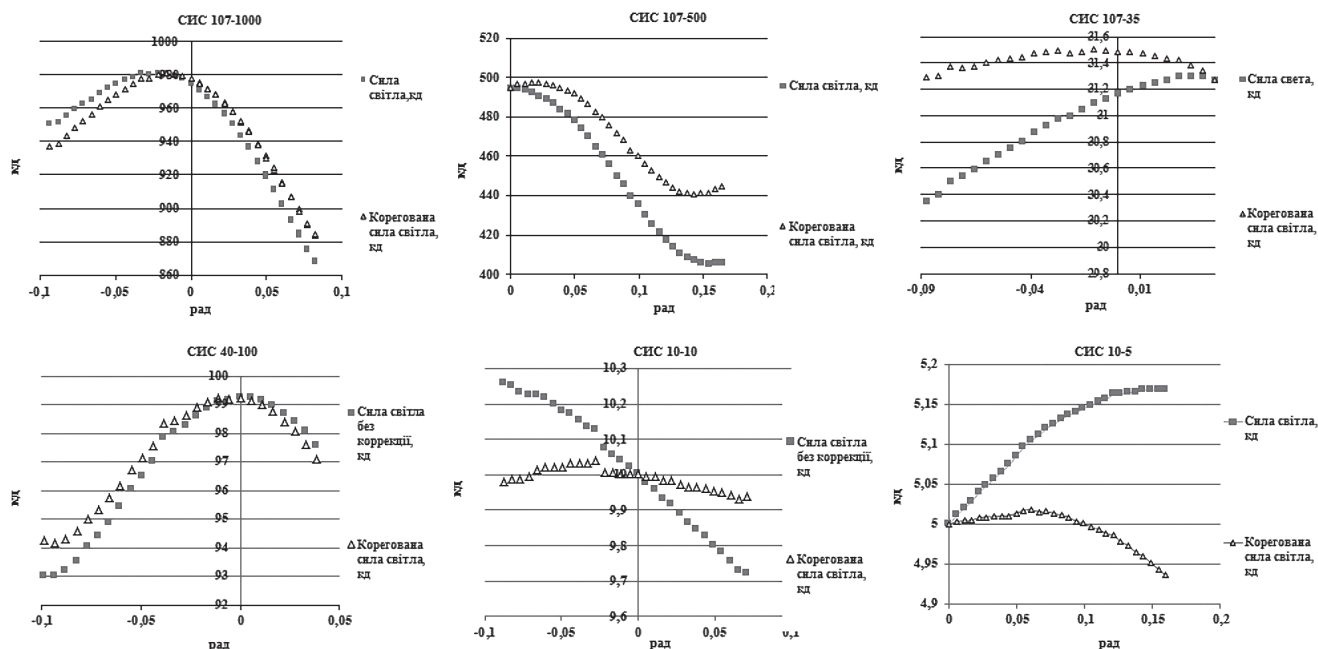


Рис. 5. Результати вимірювань сили світла ламп СИС 107-1000, СИС 107-500, СИС 107-35, СИС 40-100, СИС 10-10, СИС 10-5 зі щитком без корекції на відстань і відкориговані результати

Можна стверджувати, що, не дивлячись на індивідуальні відмінності, зберігаються загальні залежності. Це дає підстави застосовувати приведені результати до інших ламп відповідного типу, а також обґрунтовує можливість дослідження тільки одного екземпляра кожного типу ламп. Для різниці в силі світла під час вимірювань зі щитком і без нього загального в поведінці виявити не вдалося. Графіки цієї різниці для ламп СИС 107-500 наведено на рис. 3 в нижньому ряду.

Результати вимірювань

Маючи доказ загальної поведінки ламп одного типу, було проведено аналогічні вимірювання для ламп СИС 107-1000, СИС 107-500, СИС 107-35, СИС 40-100, СИС 10-10, СИС 10-5 за наявності і відсутності щитка. Як і слід було чекати, облік зміни відстані необхідний. На рис. 5 наведено результати вимірювань сили світла ламп зі щитком без корекції на відстань і відкориговані результати.

У всіх випадках корекція результатів істотно зменшила вплив кута нахилу ламп. Для зручності максимальні відмінності в силі світла світловимірювальних ламп при нахилах наведено в результуючій табл. 3.

Видно, що для всіх типів ламп із тілом розжарювання у вигляді спіралі вплив кута нахилу лампи набагато більший, ніж у ламп із тілом розжарювання у вигляді ниток. Оскільки у лампи СИС 40-100 спіралі ниток розжарювання розташовано під значним кутом, то у неї похибки менші, ніж у ламп із паралельними нитками розжарювання (СИС 107-1000 і СИС 107-500). Порівнюючи отримані результати з похибками для ламп у ранзі робочого еталона (2,5 %) можна стверджувати, що встановлення вертикальності ниток напруження лампи вимагає особливої ретельності та призводить до істотної похибки.

Дослідження впливу установки екрана проводилося за результатами, скоригованими на зміну відстані до лампи. Результати наведено в табл. 3.

Вплив повороту лампи навколо вертикальної осі досліджувався без повороту лампи. Замість цього в горизонтальній площині пересувався фотометр, практично вимірювався розподіл освітленості уздовж горизонтальної лінії, перпендикулярної оптичній осі. Відстань до фотометра була 1,8 м, а переміщення убік від оптичної осі проводилося в межах світлового пучка на 0,05 м, тобто приблизно на 0,03 рад. На такій відстані як за наявності щитка, так і без нього сила світла змінювалася менш ніж на 0,5 %.

За даними [5] можливо визначити припустимі діапазони опорів кожного з типів ламп у робочому режимі. Видно, що ці опори становлять від 2 до 72 Ом. Враховуючи, що опір перехідного контакту між патроном і цоколем лампи може становити 0,4 Ом, стає очевидно, що це істотна величина. При проведенні вимірювань для кожного з використаних типів ламп досліджувалася залежність сили світла від напруги. Результати вимірювань наведено в табл. 3. Їх можна використовувати для того, щоб визначити похибку, що вноситься невідомим опором від 0 до 0,4 Ом.

Експериментальна оцінка впливу місця розташування і коефіцієнта відбиття щитка детально не проводилася через наявність залежності (формули (1), (2)), проте для оцінки максимального впливу цих чинників було виміряно зміни сили світла лампи СИС 107-35 при установці безпосередньо за нею екрана (скло МС-20) і при розміщенні на щитку з боку лампи білої поверхні. Щиток, який необхідно встановлювати перед цією лампою, має найбільшу площу отвору, тому і було обрано лампу СИС 107-35 для оцінки максимального впливу. Максимальну оцінку впливу відсутності пастки на силу світла наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Загальна таблиця впливу перелічених у статті чинників на силу світла світловимірювальних ламп

Лампа	СИС 107-1000	СИС 107-500	СИС 107-35	СИС 40-100	СИС 10-10	СИС 10-5
Зміна сили світла при зміні напруги живлення на 1 В, кд	30	13	1	7	3,5	1,6
Зміна сили світла при зміні опору на 0,4 Ом, кд	74	18	1,4	5,2	2,4	1,6
Зміна сили світла при зміні нахилу лампи на 0,1 рад, %	10,1	12,0	1,2	5,2	1,2	1,6
Зміна сили світла під час переміщення фотометра на 0,05 рад, %	0,5					
Зміна сили світла під час установки/вилучення щитка, %	3,2	0,9	0,1	0,8	1,2	0,6
Максимальна оцінка впливу пастки на силу світла, %	4					
Максимальна оцінка впливу екрана на силу світла, %	3					
Максимальна оцінка впливу пастки на поправку до відстані, %	1					

Розміщення щитка за лампою, крім зміни сили світла, як і будь-яка невідповідність моделі точкового джерела, призводить до зміни ефективної відстані між джерелом і приймачем. Під ефективною відстанню мається на увазі відстань, скоригована таким чином, щоб сила світла джерела, виміряна на різних відстанях, відрізнялася одна від одної мінімально. Відповідно до підходу, запропонованого в [3], для корекції досить внести таку добавку до вимірної відстані, щоб мінімізувати середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання сили світла на різних відстанях. Таку поправку було оцінено експериментально. Для вимірювань використовувався фотометр із чітко визначеною прийнятною площиною, тобто забезпечений вхідною діафрагмою. Було проведено вимірювання сили світла лампи СИС 107-500 на відстані від 800 до 1800 мм. Такі ж вимірювання були проведені для того ж фотометра, на тих же відстанях, для тієї ж лампи, але безпосередньо за нею встановлювався екран з молочного скла МС-20. Різниця в розрахованих за [3] добавках становила близько 2 см, тобто близько 1 % по відстані, або 2 % під час визначення сили світла.

Висновки

З урахуванням наведених результатів можна зробити висновок, що максимальна похибка робочих еталонів світловимірювальних ламп відповідно до повірочної схеми (2,5 %) не є завищеною. Швидше, її можна розглядати як свідчення високої кваліфікації фахівців, принаймні, в середньому. Узятий курс на поступовий перехід від зберігання і передачі світлових одиниць за допомогою світловимірювальних ламп до зберігання і передачі за допомогою приймачів є правильним. При такому підході джерело випромінювання використовується в основному як компаратор. Сучасна якість фотометрів і люксометрів сильно ослаблює вимоги до постійності спектрального складу випромінювання ламп під час передавання одиниць. Тому про гостру необхідність у розробці та впровадженні вітчиз-

няних удосконалених світловимірювальних ламп говорити складно, але враховуючи, що скоро виповниться сто років від часу розробки використовуваних ламп, необхідно готувати пропозиції щодо використання нормативної документації та ламп, які добре зарекомендували себе у провідних індустріально розвинених країнах. Висока вартість світловимірювальних закордонних ламп і відмінність вимог до електричних параметрів джерела живлення стримують загальний перехід на їх використання. Тому використання наявних світловимірювальних ламп у найближчій перспективі неминуче. Спираючись на результати, наведені в цій роботі, можна оцінити внесок основних складових у похибки вимірювань і за можливості скоротити їх.

Список літератури

1. *Тиходеев П.М.* Световые измерения в светотехнике (фотометрия) / П.М. Тиходеев. – Л.–М.: ОНТИ НКТП СССР. Гл. ред. энергетич. лит., 1936. – 465 с.
2. *Купко А.Д.* Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине / А.Д. Купко, Л.А. Назаренко // Светотехника. – 2001. – № 5. – С. 38–40.
3. *Купко А.Д.* Совершенствование методики передачи световых единиц / А.Д. Купко // Український метрологічний журнал. – 2001. – № 1. – С. 45–47.
4. Державна повірочна схема для засобів вимірювання світлових величин: ДСТУ 3394-96. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 5 с. – (Державний стандарт України).
5. Лампы накаливания электрические светоизмерительные рабочие. Технические условия: ГОСТ 10771-82. – [Дата введения 1986-01-01]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. – 17 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).
6. *Купко А.Д.* Анализ погрешностей передачи световых единиц, обусловленных выбором режима горения лампы / А.Д. Купко // Український метрологічний журнал. – 2012. – № 2. – С. 21–27.