

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

Фотометричні пристрої

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
для студентів спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
освітньо-професійної програми «Світлотехніка і джерела світла»

Київ 2019

УДК 535.24(076.5)
ББК В 341.3р
Ф815

Укладачі: В.І.Степура, Т.Ю.Шкварницька, Т.І.Яремич,
Н.Г.Пряхіна

Рецензент: Ю.М.Квач

Фотометричні пристрої. Методичні вказівки / Уклад.:
П814 В.І.Степура, Т.Ю.Шкварницька, Т.І.Яремич, Н.Г.Пряхіна. –
К.: НАУ, 2019. – 92с.

Вміщують завдання до виконання лабораторних робіт, методичні вказівки, загальні правила оформлення звітів, методичні вказівки стосовно обробки та способів представлення результатів, додатки з довідковими числовими даними необхідними для обробки результатів вимірювань.

Призначені для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійної програми «Світлотехніка і джерела світла»

ЗАГАЛЬНІ ПРАВИЛА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ

Лабораторні заняття є важливою складовою частиною навчального процесу, яка сприяє закріпленню та найбільш глибокому засвоєнню теоретичного курсу, вивченню конструкцій світлотехнічних пристроїв, набуттю навиків поводження з вимірювальною апаратурою, умінню аналізувати та узагальнювати результати проведених експериментів.

Перед проведенням лабораторної роботи, необхідно ретельно ознайомитися з її змістом, а також з фотометричними та електричними схемами установки, даними градування приладів та їх паспортними і інструкціями по експлуатації.

При складанні електричної схеми необхідно звернути увагу на відповідність параметрів приладів, що застосовуються заданому режиму електричної мережі. Вмикання схеми здійснювати тільки після її перевірки викладачем.

Звіт по лабораторній роботі повинен містити назву роботи, дату її виконання перелік приладів та матеріалів які застосовуються, фотометричну та електричні схеми установки, дані спостережень та обчислень результату, аналіз точності отриманого результату, а також графічну частину.

Звіт повинен закінчуватися висновком та аналізом отриманих результатів а також порівнянням виміряних на обчислених величин.

Після виконання роботи й оформлення протоколу студент зобов'язаний отримати залік по даній лабораторній роботі.

Лабораторна робота 1

Методи вимірювання світлотехнічних параметрів джерел світла та світлових приладів

Оцінка якості покриття поверхні фотометричної кулі.

Мета роботи:

1. Засвоєння методів вимірювання світлового потоку джерел світла.
2. Вивчення на практиці методів оцінки якості покриття поверхні фотометричної кулі.

Прилади і матеріали: Фотометрична куля; зразок з коефіцієнтом відбивання $\rho = 0,8$; джерело світла з концентрованою кривою сили світла; фотоелемент; електровимірювальний прилад (мікроамперметр).

Теоретичні відомості

Метод вимірювання світлового потоку ґрунтується на порівняльному порівнянні освітленості приймача випромінюванням, що створюється джерелом світла, параметри якого вимірюються, з освітленістю приймача випромінювання, що створюється контрольним або світловимірювальним джерелом світла з відомими світловими потоками. Вимірювання світлового потоку повинно виконуватися на установці, схема якої приведена на рис. 1.1.

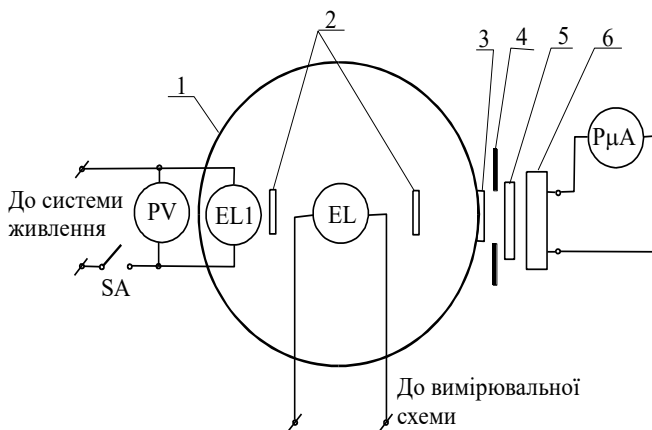


Рис. 1.1. Схема фотометричної установки для вимірювання світлового потоку.

1 – фотометрична куля; 2 - екрани; 3 – світлорозсіювальне скло; 4 – діафрагма; 5 – нейтральний світлофільтр; 6 – коригований приймач випромінювання; EL – лампа, параметри якої вимірюються; EL1 – допоміжна лампа; PV – вольтметр для вимірювання напруги живлення допоміжної лампи; Р_μA – прилад для вимірювання фотоструму; SA – вимикач.

Фотометрична куля

Розмір фотометричної кулі повинен вибиратися виходячи з розмірів та потужності джерел світла параметри яких вимірюються. Мета вибору – забезпечення такого рівня температури всередині кулі, який би не впливав на точність вимірювань.

Діаметр фотометричної кулі повинен бути не меншим за шестикратну довжину джерела світла (без цоколя), але не меншим за 1 метр для розрядних джерел світла високого тиску потужністю до 400 Вт і не меншим за 1,5 м для розрядних джерел світла потужністю понад 400 Вт. Для трубчастих ламп розжарення та люмінесцентних не меншим за 1,2 кратної величини загальної довжини джерела світла.

Діаметр вимірювального отвору не повинен перевищувати 1/10 діаметра кулі. Для світловимірювальних куль призначених для вимірювань світлового потоку над мініатюрних джерел світла допускається діаметр вимірювального отвору рівний 1/4 діаметра фотометричної кулі.

Світлорозсіювальне скло повинне встановлюватися у вимірювальному отворі у площині дотичній до поверхні фотометричної кулі. Поверхня світлорозсіювального скла, що повернута у бік внутрішньої сторони кулі, повинна бути матовою.

Пропускання світлорозсіювального скла повинне бути не селективним у відомій частині спектра. Відступ від нейтральності коефіцієнта світло пропускання світлорозсіювального скла у діапазоні довжин хвиль $\lambda = 380-760$ нм не повинне перевищувати 5%.

Розподіл пропущеного світла світлорозсіювальним склом повинен бути розсіяним. Скло не повинно флуоресціювати. У якості світлорозсіювального скла рекомендують застосовувати скло марок МС23 товщиною 1-3 мм та МС19 товщиною 2-4 мм.

Екран фотометричної кулі за своїми розмірами та положенню по відношенню до вимірювального отвору повинен забезпечувати захист вимірювального отвору від прямих променів джерела світла.

Розміри екрана повинні забезпечувати найменше затінення поверхні фотометричної кулі. Діаметр тіні не повинен перевищувати подвійного діаметра вимірювального отвору.

Екран повинен розташовуватись від джерела світла на $1/2 \dots 2/3$ відстані між джерелом світла та вимірювальним отвором, а також повинен бути розташований перпендикулярно осі, що проходить через центр вимірювального отвору та світловий центр джерела світла. Розміри та форма екрану повинні відповідати типу джерел світла параметри яких вимірюються.

Для обліку впливу на результат вимірювань допоміжних пристроїв (неактивних елементів), що розташовані у фотометричній кулі, у середині кулі повинні встановлюватися допоміжні джерела світла, яка розташовується на протилежній стороні від вимірювального отвору. Встановлення допоміжного джерела світла є не обов'язковим при вимірюваннях параметрів однотипних джерел світла. Перед допоміжним джерелом світла повинен бути встановлений непрозорий екран, який перешкоджає попаданню її випромінювання на джерело світла, яку досліджується, контрольне або світловимірювальне джерело світла та на світловимірювальний отвір. Допоміжна лампа повинна мати стабільні електричні та світлові параметри.

Допоміжні пристрої для встановлення та вмикання джерел світла повинні бути пофарбовані. Білою емалевою фарбою з коефіцієнтом відбивання не нижчим за 0,8. Екрани та пристрої для підтримки їх всередині фотометричної кулі повинні бути пофарбовані тією ж фарбою, що і уся внутрішня поверхня кулі. Розташування цих допоміжних пристроїв у межах однієї серії вимірювань не повинно змінюватися. Різниця між коефіцієнтами відбивання у різних частинах кулі на протязі експлуатації не повинна перевищувати 3%.

Селективністю фарбування можна знехтувати, якщо колірна температура світловимірювального джерела світла (2800 К), розміщеної всередині фотометричної кулі та виміряна крізь світловимірювальний отвір разом з світлорозсіювальним склом, змінюється не більше за 200 К для ламп розжарення та на 100 К – для розрядних ламп.

При зміні температури понад вказані величини у розрахунки вводять поправочний множник C_1 , що враховує селективність фарбування. Множник C_1 обчислюється за виразом:

$$C_1 = \frac{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{св} \cdot A(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{досл} \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{св} \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{досл} \cdot A(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda}; \quad (1.1)$$

де $P(\lambda)_{св}$, $P(\lambda)_{досл}$ - відносні спектральні розподіли енергії випромінювання світловимірювального та досліджуваного джерела світла відповідно; $V(\lambda)$ - відносна спектральна світлова ефективність;

$$A(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)} = \frac{P'(\lambda)_{св}}{P(\lambda)_{св}} - \text{функція впливу селективності покриття фотометричної кулі; } P'(\lambda)_{св} - \text{відносний спектральний розподіл енергії випромінювання світловимірювальної лампи після багатократних відбивань у фотометричній кулі; } P(\lambda)_{св}, P'(\lambda)_{св}, P(\lambda)_{досл} - \text{довідкові величини (див. додаток В); } \rho(\lambda) - \text{спектральний коефіцієнт відбивання внутрішнього покриття фотометричної кулі; } \Delta\lambda - \text{виділений спектральний інтервал вимірювання, нм.}$$

тя фотометричної кулі; $P'(\lambda)_{св}$ - відносний спектральний розподіл енергії випромінювання світловимірювальної лампи після багатократних відбивань у фотометричній кулі; $P(\lambda)_{св}$, $P'(\lambda)_{св}$, $P(\lambda)_{досл}$ - довідкові величини (див. додаток В); $\rho(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт відбивання внутрішнього покриття фотометричної кулі; $\Delta\lambda$ - виділений спектральний інтервал вимірювання, нм.

Приймач випромінювання

У якості приймачів випромінювання застосовують кориговані під криву відносної спектральної світлової ефективності електровакуумні або напівпровідникові приймачі випромінювання.

При відміні спектральної чутливості приймачів випромінювання від відносної спектральної світлової ефективності за ГОСТ 8.332-78 поправочний множник C_2 визначається за виразом:

$$C_2 = \frac{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{св} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{досл} \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{св} \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{досл} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda}; \quad (1.2)$$

де $S(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість приймача випромінювання.

Стабільність роботи приймача випромінювання

Для забезпечення відтворюваності вимірювань необхідно попереднє освітлення приймача випромінювання на протязі 0,5 – 1 год. при робочій освітленості. Процес попередньої освітленості повторюється після перерви у роботі протягом 1 год., та при збільшення рівня робочої освітленості понад три рази. Зміна чутливості при тривалій дії постійного світлового потоку (втомлюваність приймача) не повинно перевищувати 2% при освітленості на поверхні приймача без коригуючого світлофільтра, рівній 200 лк.

Для вимірювань фотоструму повинні застосовуватися електровимірювальні прилади класу точності не нижче 1,0 з внутрішнім опором , що забезпечує пряму пропорційну залежність між освітленістю приймача випромінювання та фотострумом у діапазоні вимірюваних величин.

Відхилення від прямої пропорційної залежності допускається не більше $\pm 1\%$ при зміні освітленості у два рази. При відхиленні від пропорційності понад 1% потрібно вводити поправки, що відповідають графіку залежності фотоструму від освітленості приймача випромінювання.

Чутливість електровимірювальних приладів підбирають таким чином ,щоб відлік при заданих межах вимірювань був не меншим за половину усієї шкали.

При вимірюванні джерел світла з великим розкидом світлових параметрів допускають відлік починаючи з 1/3 шкали приладу.

Приймачі випромінювання повинні перевірятися не менше одного рази у два роки.

Нейтральні світлофільтри

Для розширення меж вимірювань можуть застосовуватися нейтральні світлофільтри. Інтегральний коефіцієнт пропускання світлофільтра визначають безпосередньо в умовах застосування: у фотометричній кулі або на фотометричній лаві.

При застосуванні нейтральних світлофільтрів для вимірювань ламп вводять поправочний множник C_3 , що враховує наявну селективність нейтрального світлофільтра. Множник C_3 визначають за виразом:

$$C_3 = \frac{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{св} \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{доосл} \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{св} \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} P(\lambda)_{доосл} \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda}; \quad (1.3)$$

де $\tau(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання нейтрального світлофільтра.

У якості нейтральних світлофільтрів рекомендують застосовувати скляні світлофільтри НС7, НС8, НС9, НС10 за ГОСТ 9411-75.

Світловимірювальні лампи розжарення

Для світлових вимірів повинні застосовуватися зразкові світловимірювальні лампи III розряду або робочі світловимірювальні лампи за ГОСТ 10771-82, що мають свідоцтва перевірки.

Перед вимірюванням світловимірювальні лампи необхідно промивати дистильованою водою за ГОСТ 5962-67 та протерти чистою та м'якою тканиною. У процесі вимірювань необхідно брати світловимірювальні лампи тільки через чисту і м'яку тканину. Перед зняттям відліку вони повинні працювати на постійному або змінному струмі при напрузі, яку записане в їх свідоцтвах перевірки, з метою стабілізації світлових та електричних параметрів: вакуумні не менше 4 хв. Газонаповнені не менше 7 хв.

Необхідно здійснювати облік часу горіння застосовуваних світловимірювальних ламп за журналом або протоколом з зазначенням дати, часу горіння і підпису особи, що виконувала вимірювання.

Періодичну перевірку світловимірювальних ламп (робочих та зразкових III розряду) виконують не рідше одного разу за два роки при часі горіння у термін між перевірками не більше за 25 годин для вакуумних ламп та не більше за 15 год. для газонаповнених. Інтервал між перевірками повинен бути скороченим у наступних випадках:

при не відтворюваності електричних характеристик понад 0,1% і $\pm 0,15\%$ для вакуумних та газонаповнених ламп відповідно;

при закінченні терміну вказаного строку горіння лампи повіряються раніше встановленого між повір очного інтервалу.

Світловимірювальні люмінесцентні лампи

Для світлових вимірювань люмінесцентних ламп застосовують світловимірювальні люмінесцентні лампи відповідної колірності за технічними умовами, затвердженими у встановленому порядку.

Світловимірювальні люмінесцентні лампи потужністю 20 Вт призначені для експлуатації при температурі навколишнього середовища від 293 до 298 К, а світловимірювальні люмінесцентні лампи потужністю 40 Вт від 275 до 300 К.

Перед вимірюванням світловимірювальні люмінесцентні лампи необхідно промити дистильованою водою за ГОСТ 6709-72 та етиловим спиртом за ГОСТ 5962-67 та протерти чистою м'якою тканиною. Лампи необхідно брати тільки через чисту м'яку тканину.

При експлуатації обов'язково здійснюють облік часу горіння. Світловимірювальні люмінесцентні лампи повинні зберігатися у індивідуальній упаковці у шафі або сухому не запиленому приміщенні з постійною температурою. Періодичну перевірку світловимірювальних люмінесцентних ламп здійснюють один раз на рік при загальному часі горіння понад 50 год. один раз у два роки при загальному часі горіння не більше 50 год.

Контрольні джерела світла

Для градування фотометричних установок, призначених для поточних вимірювань допускається застосовувати контрольні джерела світла того ж типу, що й джерела світла які вимірюються, зі стабільними параметрами.

Джерела світла призначені для використання у якості контрольних, повинні відбиратися з числа джерел поточного випуску. Відібрані джерела повинні відповідати стандартам або технічним умовам на конкретні типи джерел світла.

Контрольні джерела світла повинні підлягати відпалу на протязі часу, рівного 10% середнього часу горіння, середні розрядні – не менше за (200-300)годин.

У якості контрольних джерел світла використовуються ті джерела світла, збіжність світлових параметрів після відпалу не перевищує 1%.

Збіжність світлових параметрів визначається як середнє квадратичне відхилення з п'яти вимірювань, проведених не менше ніж за 24 години.

Контрольні джерела світла повинні перевірятися за світловимірювальними джерелами періодично: лампи розжарення – через відрізки часу, що не перевищують 3% середнього часу горіння і не рідше одного разу на рік; газорозрядні – один раз на рік при загальному часі горіння понад 50 годин та один раз у два роки при загальному часі горіння не більш ніж 50 годин.

Загальні вимоги до проведення вимірювань

Вимірювання повинні виконуватися у наступних кліматичних умовах:

Температура оточуючого середовища – (298 ± 10) К;

Відносна вологість повітря – не більше 80%;

Атмосферний тиск – $(84-106)$ кПа $(630-800)$ мм. рт. ст.

Вимірювання люмінесцентних ламп повинні виконуватися при температурі навколишнього середовища від 293 до 300 К. Коливання температури всередині кулі під час вимірювань повинні не перевищувати ± 2 К. Контроль температури всередині кулі повинен здійснюватися термометром у безпосередній близькості від вимірювального отвору. Термометр необхідно захищати від прямого випромінювання джерела світла.

Під час вимірювань лампи розжарення і розрядні лампи високого тиску повинні перебувати у вертикальному положенні, цоколем вгору, а люмінесцентні лампи і трубчасті лампи розжарення – у горизонтальному положенні, у площині паралельній площині вимірювального вікна, якщо інше положення не обумовлене у стандартах або технічних умовах на конкретні типи ламп.

Світлові центри джерел світла, що вимірюються, а також контрольних та світловимірювальних встановлюють у центрі кулі, відхилення у будь-який напрям не повинно перевищувати 0,05 радіуса кулі. При встановленні екрана жоден елемент джерела світла, що вимірюється а також контрольне та світловимірювальне джерело (без цоколя) не повинен проглядатися з світловимірювального отвору.

Встановлення джерел світла з направленим світлорозподілом повинно здійснюватися так, щоб вісь світлового пучка була направлена перпендикулярно лінії, що з'єднує центр фотометричної кулі з центром вимірювального отвору.

Підготовка до вимірювань

Перед початком вимірювань засвічують приймачі світла протягом 0,5 – 1 год. робочим рівнем освітленості.

У фотометричну кулю необхідно встановити джерело світла та екран, що відповідає за своїми розмірами цьому типу джерел світла. Правильність розташування екрану перевіряють через оглядовий отвір або при відкритій кулі при ввімкненому джерелу світла. При закритій фотометричній кулі необхідно підібраним умови вимірювань (нейтральні світлофільтри, розкриття діафрагми перед приймачем випромінювання, межі вимірювань приладу тощо), щоб чутливість приладу, який вимірює фотострум забезпечувала б відносну похибку, що не перевищує 1%.

Вимірювання світлового потоку розрядних джерел світла виконують після 15 хв. Неперервного горіння у номінальному електричному режимі.

З метою прискорення вимірювань люмінесцентних ламп допускається вмикання їх на 15 хв. Поза фотометричною кулею. Після встановлення лампи у фотометричну кулю вони повинні горіти не менше 5 хв. Перед початком вимірювань.

Вимірювання світлового потоку джерел світла здійснюють після 3 хв. Неперервного горіння у номінальному електричному режимі для вакуумних та 5 хв. Для газонаповнених джерел світла.

Перед вимірюванням світлового потоку здійснюють градування фотометричної кулі за трьома світловимірювальними або контрольними джерелами світла.

Світловимірювальне, контрольне або джерело світла що вимірюється повинні мати близькі колірні температури, світлові потоки, та світлорозподіл.

Градувальні коефіцієнти K_i та $K_{сер}$ визначають за виразами:

$$K_i = \frac{\Phi_{св,i}}{n_{св,i}}; \quad K_{сер} = \frac{\sum_{i=1}^3 K_i}{3}; \quad (1.4)$$

де $\Phi_{св,i}$ - світловий потік і-тої світловимірювального або контрольного джерела світла, лм; $n_{св,i}$ - покази приладу, що вимірює фотострум при увімкненому і-тому світловимірювальному або контрольному джерелу світла.

Градуювальник коефіцієнт K_i (лм/под.) не повинен відрізнятися від $K_{сер}$ понад 1%.

Градуювання здійснюються не рідше ніж через 4 години роботи, а також при зміні типу джерела світла

Проведення вимірювань та обробка результатів

Встановлюють на джерелі світла номінальну напругу або струм або потужність та записують покази приладів, що вимірюють фотострум $n_{вим}$.

Світловий потік ($\Phi_{вим}$) в лм джерела світла, що вимірюється визначається за виразом:

$$\Phi_{вим} = K_{сер} \cdot n_{вим} \cdot m \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3; \quad (1.5)$$

де $K_{сер}$ - середній градувальний коефіцієнт; $n_{вим}$ - покази приладу, що вимірює фотострум при увімкненому джерелі, що вимірюється;

$m = \frac{m_1}{m_2}$ - поправочний множник, що враховує вплив неактивних

елементів; m_1 - покази приладу, що вимірює фотострум, при увімкненому допоміжному джерелі світла, але вимкненому світловимірювальному джерелі; m_2 - покази приладу, що вимірює фотострум, при увімкненому допоміжному джерелі струму, але вимкненому джерелі світла, яке вимірюється; C_1 - поправочний множник, що враховує селективність внутрішнього покриття фотометричної кулі; C_2 - поправочний множник, що враховує відміну спектральної чутливості фотоелемента від відносної спектральної світлової ефективності; C_3 - поправочний множник, що враховує селективність нейтрального світлофільтра.

Якщо світловимірвальне джерело світла та джерело світла що вимірюється однакові або мають дуже близькі форми, то можна прийняти $m_1 = m_2$.

Величини поправочних множників m , C_1 , C_2 , C_3 повинні визначатися періодично для кожного типу джерел світла m , C_1 – після кожного фарбування кулі, але не рідше одного разу на пів року; C_2 , C_3 – один раз на два роки.

При вимірюваннях джерел світла зі світловим потоком, що значно перевищує світловий потік світловимірвального джерела, нейтральний світлофільтр встановлюється при горінні джерела світла, що вимірюється і її світловий потік визначають за виразом:

$$\Phi_{вим} = K_{сер} \cdot n_{вим} \cdot m \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot \frac{1}{\tau}; \quad (1.6)$$

де τ – інтегральний коефіцієнт пропускання нейтрального світлофільтра.

При вимірюванні джерел світла зі світловим потоком, що значно менший за світловий потік світловимірвального джерела, нейтральний світлофільтр встановлюють при горінні світловимірвального джерела світла і світловий потік визначається за виразом

$$\Phi_{вим} = K_{сер} \cdot n_{вим} \cdot m \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot \tau. \quad (1.7)$$

При градуюванні фотометричної кулі за світловимірвальними розрядними лампами світловий потік джерела світла, що вимірюється визначають за виразом

$$\Phi_{вим} = K_{сер} \cdot n_{вим}. \quad (1.8)$$

Допускається вимірювання світлового потоку за просторовим світлорозподілом.

Довірча границя похибки результату вимірювань складає $\pm 5\%$ при довірчій ймовірності $\alpha = 0,95$.

Оцінка коефіцієнта відбивання внутрішнього покриття кулі

Коефіцієнт відбивання добре пофарбованої кулі повинен бути не нижчим за 0,8. Для контролю величини коефіцієнта відбивання необхідно мати білу пластинку з коефіцієнтом відбивання 0,8. стан фарбування може вважатися задовільним, якщо яскравість будь-якої ділянки внутрішньої поверхні кулі не менша яскравості контрольної пластини при візуальній оцінці.

Різниця коефіцієнтів відбивання у різних частинах фотометричної кулі у процесі експлуатації не повинна перевищувати 3%. Різниця коефіцієнтів відбивання у різних частинах фотометричної кулі визначають шляхом визначення світлових потоків джерела світла з концентрованим світлорозподілом при направленні максимального випромінювання у дві півсфери (верхню – нижню або ліву – праву) по чергово.

Джерело світла повинно мати стабільні електричні і світлові параметри. Рекомендується застосовувати джерела світла з дзеркальною колбою та концентрованим світлорозподілом або люмінесцентні рефлекторні.

Різниця коефіцієнтів відбивання $\Delta\rho$ визначається за виразом:

$$\Delta\rho = \frac{\Phi_I - \Phi_{II}}{\Phi_I} \cdot 100\%; \quad (1.9)$$

де Φ_I , Φ_{II} – світлові потоки при направленні максимального випромінювання у обидві півкулі (верхню – нижню або ліву – праву) по чергово.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити конструкцію та основні характеристики фотометричної кулі.

2. Вивчити методи проведення вимірювань світлового потоку за допомогою фотометричної кулі.

3. Оцінити рівномірність фарбування внутрішньої поверхні фотометричної кулі., для чого:

а) роз'єднати половини фотометричної кулі та прикладаючи еталонний зразок з коефіцієнтом відбивання $\rho=0,8$ до різних ділянок внутрішньої поверхні кулі оцінити рівномірність її покриття.

4. Визначити різницю коефіцієнтів відбивання внутрішнього покриття фотометричної кулі, для чого:

а) помістити у фотометричну кулю джерело світла з симетричним світлорозподілом (галогенна лампа розжарення з матовою колбою, та встановити спеціальний екран у положення I або II-IV;

б) скласти електричну схему зображену на рис. 1.2 та подати на джерело світла номінальну напругу вказану у паспорті на джерело;

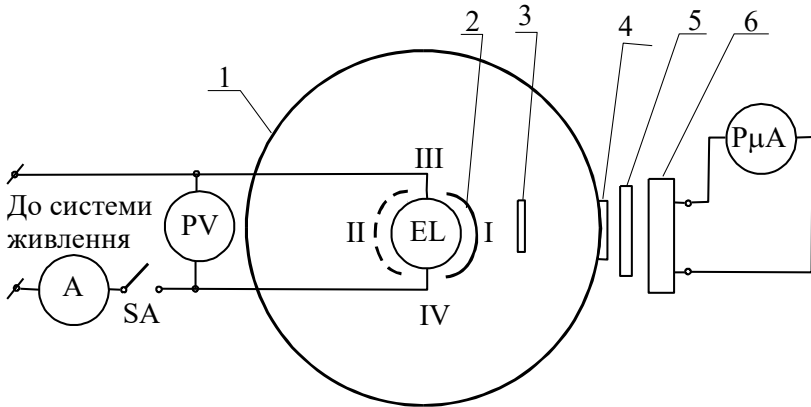


Рис. 1.2 Схема установки для визначення різниці коефіцієнтів відбивання D_r внутрішнього покриття фотометричної кулі.

1 – фотометрична куля; 2- екран для створення несиметричного світлорозподілу у джерелі світла у положенні I та II (пунктир); 3 - екран; 4 – світлорозсіювальне скло; 5 – нейтральний світлофільтр; 6 – коригований приймач випромінювання; EL – джерело світла; PV – вольтметр для вимірювання напруги живлення; A – амперметр; $P_{\mu A}$ – прилад для вимірювання фотоструму; SA – вимикач.

в) підтримувати напругу на джерелі світла під час досліду строго постійною, контролюючи її величину за показами електровимірювальних приладів;

г) зняти покази Φ_I приймача електровимірювального приладу приєднаного до приймача світла (серія 5 - 10 показів);

д) вимкнути джерело світла та почекати до його повного охолодження (5 – 10 хв.);

е) змінити орієнтацію екрана 2 на 180^0 відносно попередньої та подати номінальну напругу на джерело світла суворо дотримуючись вимог пункту в;

є) зняти покази Φ_{II} приймача електровимірювального приладу приєднаного до приймача світла (серія 5 - 10 показів);

ж) повторити вище вказані дії для положень екрану III та IV;

з) визначити різницю коефіцієнтів відбивання Δr за виразом (1.9) попередньо виконавши обробку одержаних результатів згідно додатку А, для підрахунків взяти пари вимірених значень з максимальною та мінімальною розбіжністю;

і) зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Потік випромінювання, його визначення. Миттєве значення потоку випромінювання.

2. на які складові можна розділити потік випромінювання, що падає на тіло?

3. Вплив спектрального складу потоку випромінювання, що падає на коефіцієнти $\rho(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$, $\tau(\lambda)$.

4. Що називають первинним та вторинним джерелом світла?

5. Перелічіть пасивні та активні світлотехнічні елементи фотометричної кулі.

6. Просторова густина потоку випромінювання. Визначення тілесного кута.

7. Коефіцієнт багаторазового відбивання, його максимальне та мінімальне значення.

Лабораторна робота 2
Методи вимірювання світлотехнічних параметрів
джерел світла та світлових приладів
Визначення відхилення від нейтральності коефіцієнта
пропускання нейтральних світлофільтрів.

Мета роботи: Оволодіння навиками визначення відхилення від нейтральності коефіцієнтів пропускання світлофільтрів, що застосовуються при визначення світлового потоку та сили світла джерел світла.

Прилади і матеріали: експериментальні дані десяткових показників поглинання кольорового оптичного скла (додаток Б), з якого виготовляють світлофільтри (ГОСТ 9411-81). Дані (додаток В) відносного спектрального розподілу енергії випромінювання джерел типу А, В, С, (ГОСТ 7721-89). Дані (додаток Г) відносної спектральної світлової ефективності $V(\lambda)$ (ГОСТ 8.332-78).

Теоретичні відомості

Світлофільтри, що застосовуються у фотометрії (колориметрії, спектроскопії, тощо) виготовляють з оптичного кольорового неорганічного скла. Оптичне кольорове скло виготовляють наступних типів та марок (див. табл. 2.1)

Типи оптичного кольорового скла

Таблиця 2.1

Позначення типу і кольору скла	Марка скла
1	2
УФС – ультрафіолетове скло	УФС1, УФС2, УФС6, УФС8
ФС – фіолетове скло	ФС6
СС – синє скло	СС1, СС2, СС4, СС5, СС8, СС15
СЗС – синьо-зелене скло	СЗС7, СЗС8, СЗС9, СЗС16, СЗС17, СЗС20, СЗС21, СЗС22, СЗС23, СЗС24, СЗС25, СЗС26, СЗС27
ЗС – зелене скло	ЗС3, ЗС7, ЗС8, ЗС10, ЗС11

1	2	
ЖЗС – жовто-зелене скло	ЖЗС1, ЖЗС6, ЖЗС9, ЖЗС12, ЖЗС17, ЖЗС18	
ЖС – жовте скло	ЖС3, ЖС4, ЖС10, ЖС11, ЖС12, ЖС16, 17, ЖС18, ЖС19, ЖС20	
ОС – оранжеве скло	ОС5, ОС11, ОС12, ОС13, ОС14, ОС17	
КС – червоне скло	КС10, КС11, КС13, КС14, КС14, КС15, КС17, КС18, КС19	
ИКС –інфрачервоне скло	ИКС5, ИКС6, ИКС7	
ПС – пурпурне скло	ПС5, ПС7, ПС8, ПС13, ПС14	
НС – нейтральне скло	НС1, НС2, НС3, НС6, НС7, НС8, НС9, НС10, НС11, НС12	
ТС – темне скло	ТС3, ТС10	
БС – безбарв- не скло	Ультрафіолетове	БС3, БС4, БС7, БС12
	Інфрачервоне	БС14

Оптичне кольорове скло нормується по десятковому показнику поглинання $\kappa(\lambda)$ шару скла товщиною в 1 мм. Спектральний коефіцієнт пропускання $\tau(\lambda)$ світлофільтра товщиною x виготовленого з кольорового скла на довжині хвилі випромінювання λ визначається як:

$$\tau(\lambda) = 10^{-\kappa(\lambda) \cdot x}; \quad (2.1.)$$

де $\kappa(\lambda)$ - десятковий показник поглинання кольорового скла; x – товщина світлофільтра у мм.

У фотометрії нейтральні світлофільтри застосовуються для розширення меж вимірювань у двох випадках:

1. При вимірюванні джерел світла зі світловим потоком (силою світла), що значно перевищує світловий потік (силу світла) світловимірювального джерела.

2. При вимірюванні джерел світла зі світловим потоком (силою світла) значно меншим за світловий потік (силу світла) світловимірювального джерела.

Для джерел світла з різним спектральним складом умови нейтральності можуть порушуватися. Умови проведення коректних фотометричних вимірювань вимагають щоб відхилення від нейтральності не перевищувало 5%.

Відхилення від нейтральності коефіцієнта пропускання Δ_i у відсотках визначається за виразом:

$$\Delta_i = \frac{|\tau_i - \tau|}{\tau} 100\%, (i = 1, 2, 3); \quad (2.2)$$

де τ – інтегральний коефіцієнт пропускання, що визначається виразом:

$$\tau = \frac{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot P(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} V(\lambda) \cdot P(\lambda) \Delta\lambda}; \quad (2.3)$$

де $\tau(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання світлофільтра; $V(\lambda)$ – відносна спектральна світлова ефективність; $P(\lambda)$ – відносний розподіл енергії випромінювання джерела типу А, В, або С; τ_1 – спектральний коефіцієнт пропускання при $\lambda = 440$ нм; τ_2 – спектральний коефіцієнт пропускання при $\lambda = 550$ нм; τ_3 – спектральний коефіцієнт пропускання при $\lambda = 650$ нм.

У якості Δ_i беруть максимальне з трьох абсолютних величин і визначають його один раз при вводі вимірювальної установки у експлуатацію.

Як видно з виразу (2.2) величина інтегрального коефіцієнта пропускання світлофільтрів залежить від розподілу енергії у спектрі джерела світла. У той же час при фотометричних (особливо колориметричних) вимірюваннях застосовуються ряд стандартних джерел світла типів А, В, С, D₆₅

Джерело типу А – це газонаповнене електрична лампа розжарення світла з корельовано колірною температурою $T_c = 2856$ К. Відтворює умови штучного освітлення електричними лампами розжарення.

Джерело типу В – це джерело типу А у комбінації з точно визначеним рідинним або скляним світлофільтром, призначеним для створення випромінювання з корельовано колірною температурою $T_c = 4874$ К. Відтворює умови прямого сонячного освітлення.

Джерело типу С – це джерело типу А у комбінації з точно визначеними рідинними або скляними світлофільтрами, призначеними для створення випромінювання з корельовано колірною температурою $T_c = 6774$ К. Відтворює умови освітлення розсіяним денним світлом.

Джерело типу D_{65} – повинне відтворювати випромінювання з корельовано колірною температурою $T_c = 6504$ К. Відтворює умови освітлення усередненим денним світлом. Використовується для вимірювання кольору зразків, що можуть люмінесціювати.

Порядок виконання роботи

1. Визначити спектральний розподіл коефіцієнта пропускання нейтрального світлофільтра виготовленого з певної марки кольорового скла заданої товщини (марка скла та товщина зразка визначається викладачем), для чого користуючись даними наведеними у додатку Б за виразом (2.1) визначають залежність спектрального коефіцієнта пропускання світлофільтра від довжини хвилі. Крім таблиці, визначену залежність подають також у графічному вигляді.

2. Визначити інтегральний коефіцієнт пропускання нейтрального світлофільтра при використанні його разом з джерелом світла заданої колірної температури (при обчисленнях використовуються відносні спектральні розподіли джерел світла типів А, В, С), для чого користуються виразом (2.3) та даними приведеними у додатках В та Г.

3. Визначити відхилення від нейтральності нейтрального світлофільтра при освітленні його випромінюванням від джерел світла А, В, С, для чого користуються виразом (2.2) та результатами об-

числення спектральних коефіцієнтів пропускання. Результати обчислень подають таблично та графічно.

Контрольні запитання

1. Закон Бугера Характеристики поглинання.
2. Види світлофільтрів. Спектрофотометричні характеристики світлофільтрів.
3. Що визначає особливості оптичних характеристик поверхні металів?
4. Запишіть формулу для визначення показника поглинання випромінювання металів. Які величини описують залежність показника поглинання від оптичних та електричних характеристик металів.
5. Застосування нейтральних світлофільтрів при фотометричних вимірюваннях.

Лабораторна робота 3
Методи вимірювання світлотехнічних параметрів
джерел світла та світлових приладів

Вивчення методів визначення колірної температури

Мета роботи:

1. Вивчення на практиці застосування методу "червоно-синього" відношення до вимірювання колірної температури джерел світла.

2. Вивчення на практиці методу оцінки селективності внутрішнього покриття поверхні фотометричної кулі.

Прилади і матеріали: Фотометрична лава, фотометрична куля; скляні світлофільтри марок КС11, СЗС9. Джерело світла з відомою залежністю T_c від параметрів живлення.

Теоретичні відомості

Колірна температура T_c – температура чорного тіла при якій його випромінювання співпадає за колірністю випромінювання досліджуваного тіла при його істинній температурі T_i .

Збіг колірностей порівнюваних випромінювань може спостерігатися коли збігається їх відносний розподіл енергії за спектром у видимій області. У цьому випадку форму кривої спектрального розподілу теплового випромінювання можна характеризувати відношенням ординат для двох довжин хвиль λ_1 і λ_2 видимого спектра. Залежність між колірною температурою нечорного тіла і його дійсною температурою описується виразом:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_{\lambda 1 T}}{\varepsilon_{\lambda 2 T}}}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}; \quad (3.1)$$

де $\varepsilon_{\lambda 1 T}$, $\varepsilon_{\lambda 2 T}$ коефіцієнти випромінювальної здатності для λ_1 і λ_2 ;

$$C_2 = \frac{hc}{k}.$$

Величину колірної температури визначають із співвідношення:

$$\ln\left(\frac{L_{\lambda 1T}}{L_{\lambda 2T}}\right) = \frac{1}{Tc} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \cdot C_2 + 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad (3.2)$$

де $L_{\lambda 1T}$, $L_{\lambda 2T}$ – спектральна яскравість на λ_1 і λ_2

Таким чином логарифм відношення $\frac{L_{\lambda 1T}}{L_{\lambda 2T}}$ випромінювача прямо пропорційний оберненому значенню колірної температури.

Метод вимірювання колірної температури

Метод полягає у вимірюванні відношення фотострумів при почерговому освітленні приймача випромінювання через два (або три) кольорових світлофільтра.

Відношення фотострумів, отримане для досліджуваної лампи, порівнюють з відношенням фотострумів, отриманим при освітленні того ж приймача через ті ж світлофільтри від контрольної або світловимірювальної лампи. Вимірювання колірної температури виконують за схемою приведеною на рис. 3.1.

Перед вимірюванням колірної температури T_c в Кельвінах повинно виконатися градуювання приладу "синьо-червоного відношення" за трьома світловимірювальними або контрольними лампами з відомою залежністю $T_c=f(U)$ або $T_c=a(I)$.

Лампу встановлюють на фотометричну лаву і подають напругу (струм), що відповідає різним величинам T_c .

Вимірюють фотоструми приймача випромінювання для кожної колірної температури при почергово введених двох кольорових світлофільтрах, зберігаючи незмінною відстань між лампою і приймачем випромінювання.

Відношення фотострумів при градуюванні визначається як середнє арифметичне вимірювань з трьома світловимірювальними лампами. Отримані величини не повинні відрізнятись один від одного понад 1,5%. За даними градуювання будують градувальний графік:

$$T_c = f\left(\frac{n_{\Phi 1cep}}{n_{\Phi 2cep}}\right); \quad (3.3)$$

де $n_{\Phi 1сер}$, $n_{\Phi 2сер}$ – середні величини фотострумів при освітленні приймачів випромінювання світловимірювальними лампами через перший і другий світлофільтр відповідно. Колірна температура лампи, що досліджується повинна визначатися з градуувального графіка за отриманими величинами відношень фотострумів

$$\frac{n_{\Phi 1сер}}{n_{\Phi 2сер}}$$

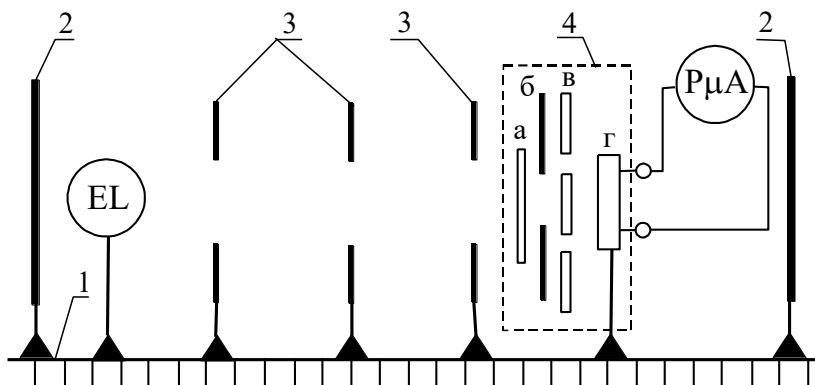


Рис. 3.1. Схема фотометричної установки для вимірювань колірної температури.

1 – фотометрична лава; 2 – кінцеві екрани; 3 – проміжні екрани; 4 – прилад "синьо-червоного відношення" а - світлорозсіювальне скло; б – діафрагма; в – касета з кольоровими світлофільтрами; г – приймач випромінювання. PμA – електровимірювальний прилад; EL – джерело світла.

Оцінка селективності покриття внутрішньої поверхні фотометричної кулі

Перед початком вимірювань градуують прилад, тобто визначають залежність (3.3). за даними градуування будують графік. Джерело світла, яке використовують градууванні встановлюють у центр фотометричної кулі. На виході світловимірювального отвору встановлюють прилад вимірювання колірної температури і по чергово визначають покази $n_{\Phi 1}$, $n_{\Phi 2}$ і підраховують їх відношення. За

градувальним графіком визначають колірну температуру T_c . Вимоги не селективності вважають виконаними, якщо колірна температура виміряна в кулі після багаторазових відбивань відрізняється від контрольної не більше за 200К для ламп розжарення і не більше за 100К для розрядних ламп.

Порядок виконання роботи

1. Виконати градування приладу синьо-червоного відношення, для цього:

а) зібрати установку показаною на рис. 3.1, при цьому у якості джерела світла встановлюють лампу з відомою залежністю T_c випромінювання від параметрів живлення (див. додаток Д);

б) при вставленому світлофільтрі одного кольору змінюючи параметри живлення джерела світла зняти покази електровимірювального приладу (три - п'ять показів для кожного значення змінюваного струму);

в) замінити світлофільтр та повторити вимірювання при тих же параметрах живлення джерела світла;

г) виконати обробку одержаних результатів у відповідності до додатку А, та визначити залежність (3.3) використовуючи дані подані у додатку Д, знайдену залежність подати у табличному та графічному вигляді.

2. Досліджуване джерело світла встановити у фотометричну кулю Згідно правил проведення вимірювання світлового потоку, а перед приймачем випромінювання встановити один з світлофільтрів приладу синьо-червоного відношення.

3. Встановити на джерелі світла параметри живлення рівні 0.9 від номінальних та зняти покази електровимірювального приладу.

4. Замінити світлофільтр та повторити вимірювання.

5. Визначити колірну температуру випромінювання досліджуваного джерела після багаторазового відбивання у фотометричній кулі, для цього:

а) обробити результати вимірювань згідно додатку А та визначити величину синьо – червоного відношення для номінального значення параметрів живлення джерела світла;

б) за визначеним відношенням та попередньо визначеною графічною залежністю (3.3) визначити колірну температуру випромінювання після багаторазового відбивання у фотометричній кулі.

6. За результатами проведеного дослідження зробити висновок стосовно селективності внутрішнього покриття фотометричної кулі.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення еквівалентної температури. Перерахуйте характеристики випромінювання, на основі яких визначається еквівалентна температура.

2. Радіаційна температура. Як її вимірюють? Яке співвідношення істинної температури випромінювача та радіаційної температури?

3. Яскравісна температура. Яке співвідношення істинної температури випромінювача та яскравісної температури?

4. Колірна температура. Яке співвідношення істинної температури випромінювача та колірної температури?

5. Що таке селективний та неселективний випромінювачі? Наведіть приклади таких випромінювачів.

Лабораторна робота 4
Методи вимірювання та світлотехнічних параметрів
джерел світла та світлових приладів
Визначення сили світла джерел світла.

Мета роботи: Вивчення об'єктивних методів вимірювання сили світла та створюваної джерелами світла освітленості.

Прилади і матеріали: Фотометрична лава; люксметр Ю-117, фотометр ФР-2; джерела світла (досліджуване та контрольне).

Теоретичні відомості

Методи ґрунтуються на почерговому порівнянні освітленості приймача випромінювання, що створюється джерелом світла яке вимірюється, з освітленістю приймача випромінювання, що створюється світловимірювальним або контрольним джерелом світла, сила світла якого відома.

Силу світла вимірюють за схемою, вказаною на рис. 1

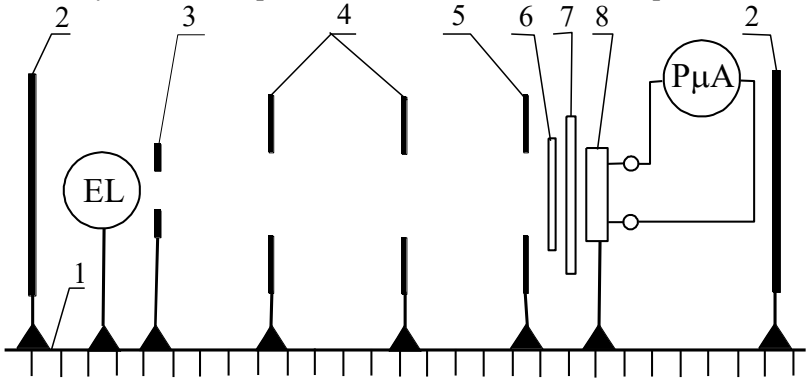


Рис. 4.1. Схема фотометричної установки для вимірювання сили світла.

1 – фотометрична лава; 2 – прикінцеві екрани; 3 – діафрагма перед лампою; 4 – проміжні діафрагми; 5 – діафрагма перед приймачем випромінювання; 6 – нейтральний світлофільтр; 7 – світлорозсіювальне скло; 8 – приймач випромінювання; P μ A - прилад для вимірювання фотоструму; EL - джерело світла.

Силу світла вимірюють двома методами:

- на одному рівні освітленості;

- при постійній відстані між приймачем випромінювання та джерелом світла.

Допускається виконувати вимірювання іншими методами, що забезпечують необхідну точність вимірювань.

Обладнання

Для вимірювання сили світла застосовують:

- фотометричну лаву;
- приймач випромінювання;
- світлорозсіювальне скло;
- нейтральний світлофільтр;
- світловимірювальні і контрольні джерела світла.

Довжина фотометричної лави повинна забезпечувати можливість дотримання відстані між приймачем випромінювання і джерелом світла, яка повинна складати не менше 10-кратного розміру тіла розжарення джерела світла, а освітленість на поверхні приймача випромінювання повинна перебувати в межах його лінійної залежності фотоструму від освітленості.

Вимірювальна шкала фотометричної лави повинна забезпечувати вимірювання відстаней між приймачем випромінювання і джерелом світла з похибкою, що не перевищує ± 1 мм.

Візки фотометричної лави повинні забезпечувати прямолінійне пересування джерела світла і приймача випромінювання по направляючим фотометричної лави і надійне кріплення у певному положенні.

Діафрагми фотометричної лави повинні мати отвори, центри яких лежать на осі фотометричної установки, що проходить паралельно направляючим лави. Кількість та положення діафрагм повинні унеможливити вплив розсіяного світла на результати вимірювань.

Отвори у діафрагмах, розміщених перед джерелом світла і приймачем випромінювання, повинні мати як мога менші розміри, але не менші за поверхню, що світиться у джерелі світла і світлочувливої площадки приймача випромінювання.

Перша діафрагма, якщо рахувати від джерела світла, встановлюється у безпосередній близькості від нього. Наступні діафрагми розміщуються послідовно одна за одною так, щоб коли наблизити

око до краю діафрагми, яка встановлюється і подивитися через отвір у попередніх діафрагмах то не було б видно приймач випромінювання.

Вимоги, що висуваються до світлорозсіювального скла, приймача випромінювання, нейтральних світлофільтрів, світловимірювальних та контрольних джерел світла такі ж як і при вимірюваннях світлового потоку у фотометричній кулі.

Загальні вимоги до проведення вимірювань

Вимірювання повинні виконуватися у затемненому приміщенні, стіни підлога і стеля яких повинні бути дифузно відбиваючими і мати коефіцієнт відбивання не більший за 0,1 та у кліматичних умовах таких же як і при вимірюваннях світлового потоку.

Під час вимірювань світловимірювальні джерела повинні перебувати у вертикальному положенні цоколем вниз, а контрольні та світловимірювальні джерела у такому положенні при якому задана сила світла співпадає з віссю фотометричної установки.

Центри світлочутливої поверхні приймача випромінювання, нейтрального світлофільтра, світловий центр тіла розжарення, джерела світла що вимірюється контрольного або світловимірювального джерела повинні перебувати на осі фотометричної установки, паралельній напрямляючим лави.

Поверхні приймача випромінювання і нейтрального світлофільтра повинні бути перпендикулярні до осі фотометричної установки.

З метою запобігання попаданню стороннього світла між приймачем випромінювання і джерелом світла встановлюються діафрагми.

Підготовка до вимірювань

На фотометричній лаві необхідно встановити світловимірювальне, контрольне або досліджуване джерело світла згідно схеми на рис. 1.

Перед початком вимірювань світлових параметрів освітлюють приймач випромінювання так як при вимірюваннях світлового потоку.

Перед вимірюваннями сили світла виконують градування приймача випромінювання за трьома світловимірвальними або контрольними джерелами світла.

Градування при $E = \text{const}$

Градування при одному рівні освітленості виконують наступним чином. Світловимірвальне або контрольне джерело світла зі силою світла $I_{\text{св}}$. Встановлюють на фотометричну лаву та шляхом зміни відстаней $l_{\text{св}}$ між джерелом світла та приймачем випромінювання на його поверхні створюють освітленість $E = \text{const}$, яку контролюють за показами реєструючого фотострум приладу. Градувальні коефіцієнти K_i (кд/м²) не повинні відрізнятись від $K_{\text{сер}}$ понад 1%.

Градувальні коефіцієнти K_i та $K_{\text{сер}}$ обчислюють за виразами:

$$K_i = \frac{I_{\text{св},i}}{l_{\text{св},i}^2}, \quad K_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^3 K_i}{3}; \quad (4.1)$$

де $I_{\text{св},i}$ - сила світла i -тої світловимірвального або контрольного джерела світла, кд; $l_{\text{св},i}$ - відстань між i -тою світловимірвальним або контрольним джерелом світла та приймачем випромінювання, м.

Градування при $l = \text{const}$

Градування при постійній відстані між приймачем випромінювання та світловимірним або контрольним джерелом виконують наступним чином. Світловимірне або контрольне джерело з силою світла $I_{\text{св}}$ встановлюють на фотометричній лаві і при збереженні незмінним відстані $l = \text{const}$ від джерела світла до приймача випромінювання. Знімають покази $n_{\text{св}}$.

Грудуйовочні коефіцієнти K_i (кд/под.) не повинні відрізнятись від $K_{\text{сер}}$ понад 1%. Градувальні коефіцієнти K_i та $K_{\text{сер}}$ обчислюють за виразами.

$$K_i = \frac{I_{\text{св},i}}{n_{\text{св},i}}, \quad K_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^3 K_i}{3}; \quad (4.2)$$

де $n_{св,i}$ – покази приладу, що вимірює фотострум при увімкненій світловимірювальному або контрольному джерелі світла.

Градування виконують не рідше ніж через 4 год. Роботи, а також при зміні типу джерела світла.

Проведення вимірювань та обробка результатів

I. Вимірювання на одному рівні освітленості.

Досліджуване джерело світла з силою світла $I_{вим}$ встановлюють на фотометричній лаві замість світловимірювального або контрольного та змінюючи відстань $l_{вим}$, між джерелом світла та приймачем випромінювання на його поверхні створюють таку ж освітленість $E = const$, що і при градуванні. Силу світла досліджуваного джерела світла ($I_{вим}$) обчислюють за виразом:

$$I_{вим} = K_{сер} \cdot l_{вим}^2; \quad (4.3)$$

де $K_{сер}$ – середній градувальний коефіцієнт, кд/м²; $l_{вим}$ – відстань між досліджуваним джерелом світла та приймачем випромінювання, м.

II. Вимірювання при постійній відстані між приймачем випромінювання та джерелом світла.

Досліджуване джерело світла з силою світла $I_{вим}$ встановлюють на фотометричну лаву замість світловимірювального або контрольного джерела., та при збереженні незмінною відстані $l = const$ від джерела світла до приймача випромінювання, що й при градуванні, знімають покази $n_{вим}$.

Силу світла досліджуваного джерела світла визначають за виразом:

$$I_{вим} = K_{сер} \cdot n_{вим}; \quad (4.4)$$

де $K_{сер}$ – середній градувальний коефіцієнт, кд/под; $n_{вим}$ – покази приладу, що вимірює фотострум при увімкненому досліджуваному джерелі світла.

При масових вимірюваннях допускається розташування досліджуваного та світловимірного джерела на двох кінцях світловимірної лави, а приймач випромінювання, розташований між ними періодично повертати до світловимірного джерела для перевірки та градування.

Довірча границя похибки результату вимірювання складає 5% при довірчій ймовірності $\alpha = 0,95$.

Проведення вимірювань об'єктивними методами

Об'єктивні методи вимірювання виконуються за допомогою фотоелектричних приймачів випромінювання і не потребують участі ока. Ці методи ґрунтуються на залежності в силу якої фотоелектричний струм прямо пропорційний освітленості створюваній джерелом випромінювання на чутливій площадці фотоприймача, яка у свою чергу пропорційна частині світлового потоку, що падає на фотоприймач. З огляду на це шкалу електровимірювального приладу з'єднаного з фотоелементом градуують безпосередньо у тих або інших фотометричних одиницях, наприклад в одиницях освітленості – люксах. Для градування шкали в одиницях освітленості використовують еталонне джерело світла з відомою силою світла.

Прилади призначені для безпосереднього визначення освітленості називаються люксметрами. Для визначення сили світла досліджуваного джерела необхідно знати освітленість створювану джерелом світла на поверхні фотоелемента і дистанцію фотометрування. Вважаючи джерело світла точковим і застосовуючи закон квадратів відстаней визначають силу світла джерела світла.

$$I = E \cdot \ell^2; \quad (4.5)$$

де I – сила світла досліджуваного джерела; E – освітленість створювана джерелом світла на фотоприймачі; ℓ – відстань між джерелом світла та фотоприймачем (рис. 2).

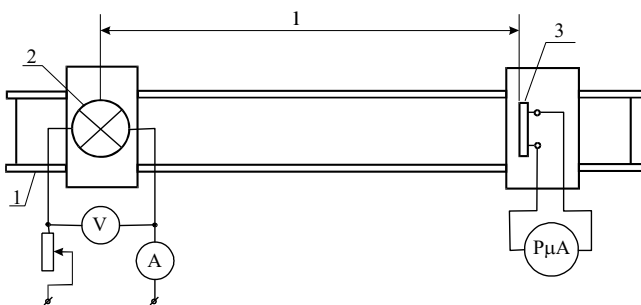


Рис. 4.2 .Схема лабораторної установки.

1- фотометрична лава; 2 – джерело світла; 3 – фотоприймач.

1. Визначення рівнів освітленості за допомогою люксометрів.

Технічні характеристики сучасних люксометрів дозволяють атестувати їх у якості робочих засобів вимірювань з межами відносною основної похибки, що не перевищує $\gamma_0 = 5\%$ за нормальних умов вимірювань.

Нормальними умовами вимірювання вважаються такі, що здійснюються за умов приведеними у таблиці 4.1.

Нормальні умови проведення вимірювань

Таблиця 4.1

Температура повітря, °С	20 ± 2
Атмосферний тиск, кПа (мм. рт. Ст.)	$100 \pm 4 (750 \pm 30)$
Відносна вологість повітря при 20°С, %	65 ± 15

Освітленість визначається як:

$$E_v = N \cdot m; \quad (4.6)$$

де N – покази вимірювального приладу; m – множник (визначається шкалою під діапазонів вимірювань)

Довірчі границі відносної похибки результату вимірювань з врахуванням умов проведення вимірювань при довірчій ймовірності $\alpha = 0,95$ визначатимуться за виразом:

$$\gamma_E = \pm k \cdot \sqrt{\gamma_0^2 + \sum_{i=1}^n \gamma_{qi}^2}; \quad (4.7)$$

де γ_0 – границя допустимої величини відносної основної похибки для нормальних умов вимірювання; γ_{qi} – границя допустимої величини i -тої додаткової відносної похибки за даних умов вимірювання (таблиця 4.2); k – коефіцієнт, що визначається прийнятою довірчою ймовірністю ($\alpha = 0,95$) і у відповідності з ГОСТ 8.207-76 $k = 1,1$

Границі допустимої величини додаткової відносної похибки

Таблиця 4.2

При розподілі спектральної густини потоку випромінювання у видимій області спектра, що відповідає розподілу джерела С з $T_s = 6500\text{К}$	$\pm 5\%$
--	-----------

При куті падіння випромінювання на площину світлочутливої поверхні фотоприймача понад 80° .	$\pm 5\%$
При зміні температури навколишнього середовища на кожний 1°	$\pm (0,5...1)\%$

2. Визначення сили світла за допомогою люксметрів.

Сила світла за допомогою люксметрів визначається за виразом:

$$I_v = E_v \cdot \ell^2. \quad (4.8)$$

Довірчі границі відносної похибки результату вимірювань з врахуванням умов проведення при довірчій ймовірності $\alpha = 0,95$ визначаються виразом:

$$\gamma_I = \pm k \cdot \sqrt{\left(\frac{\gamma_E}{k}\right)^2 + 4\gamma_{\ell}^2}; \quad (4.9)$$

де $\gamma_{\ell} = \frac{\Delta \ell}{\ell} 100\%$ відносна похибка визначення відстані; $\Delta \ell$ – абсолютна похибка визначення відстані; ℓ – виміряна відстань між джерелом світла та фоточутливою площадкою люксметра.

3. Вимірювання сили світла за ГОСТ 17616-82 "Лампи електричні.

Методи вимірювань електричних і світлових параметрів"

а) метод вимірювання при одному рівні освітленості $E = \text{const}$;

Градування виконується за виразом:

$$K_E = \frac{I}{\ell^2} \left[\frac{\kappa \partial}{\text{м}^2} \right]. \quad (4.10)$$

Сила світла визначається за виразом:

$$I = K_E \cdot \ell_{\text{вим}}^2; \quad (4.11)$$

б) метод вимірювання при постійній відстані між приймачем випромінювання та джерелом світла;

Градування виконується за виразом:

$$K_{\ell} = \frac{I}{n} \left[\frac{\kappa \partial}{\text{под.}} \right]. \quad (4.12)$$

Сила світла визначається за виразом:

$$I = K_{\ell} \cdot n_{\text{вим.}} \quad (4.13)$$

Довірчі границі відносної похибки результату вимірювань сили струму (n - за показами амперметра) з рахуванням умов проведення вимірювань при довірчій ймовірності $\alpha = 0,95$ визначається виразом:

$$\gamma = \pm k \sqrt{\gamma_0^2 + \sum_{qi} \gamma_{2i}}; \quad (4.14)$$

де

$$\gamma_0 = \pm \left[0.5 + 0.2 \left(\frac{X_k}{X} - 1 \right) \right]; \quad (4.15)$$

де X_k - кінцеве значення під діапазону; X - значення вимірюваної величини.

Порядок виконання роботи

1. Визначають освітленість створювану джерелом світла (світловим приладом), для цього:

- а) збирають установку зображену на рис. 4.2.;
- б) встановлюють номінальні величини параметрів живлення джерела світла;
- в) користуючись паспортом, інструкцією з експлуатації на люксметр виконують вимірювання рівня освітленості;
- г) рівень освітленості визначають за виразом (4.6) при чому за покази N беруть середнє арифметичне від 3-5 вимірювань (після вилучення промахів) виконаних за шкалою вимірювального приладу;
- д) довірчі границі відносної похибки результату вимірювань визначають за виразом 4.7 для чого при виконанні вимірювань здійснюють контроль кліматичних параметрів навколишнього середовища;

2. Визначають силу світла досліджуваного джерела світла за допомогою люксметра, для чого:

- а) на фотометричній лаві вимірюють відстань між джерелом світла ту фото чутливою площадкою приймача випромінювання люксметра;

б) користуючись результатами визначення освітленості та даними відстані між джерелом та фотоприймачем за виразом (4.8) визначають силу світла джерела випромінювання;

в) довірчі границі відносної похибки результату вимірювань визначають за виразом (4.9).

3. Визначають силу світла за методикою ГОСТ 17616-82 при одному рівні освітленості, для чого:

а) пересуваючи фоточутливий елемент на фотометричній лаві встановлюють довільний рівень освітленості за показами електровимірювального приладу і вимірюють відстань між джерелом світла та світлочутливою площадкою фотоприймача;

б) використовуючи дані визначеної сили світла (пункт 2) та відстані між фотоприймачем та джерелом за виразом (4.10) виконують градування приладу (джерело світла досліджуване у попередньому досліді приймається за контрольне);

в) замість контрольного джерела світла встановлюють досліджуване і подають на нього номінальні величини параметрів живлення;

г) змінюючи відстань між фотоприймачем та досліджуваним джерелом досягають того самого рівня освітленості, що й при градуванні (пункт 3а);

д) шукана сила світла визначається за виразом (4.11), довірчі границі абсолютної похибки результату вимірювань визначаються згідно додатку А.

4. Визначають силу світла за методикою ГОСТ 17616-82 при постійній відстані між фотоприймачем та джерелом світла, для чого:

а) встановлюють контрольне джерело і пересуваючи фоточутливий елемент на фотометричній лаві встановлюють довільну відстань між джерелом світла та світлочутливою площадкою фотоприймача, при цьому фіксують покази електровимірювального приладу приєднаного до фотоприймача;

б) використовуючи дані визначеної сили світла контрольного джерела (пункт 2) та покази електровимірювального приладу за виразом (4.12) виконують градування приладу ;

в) замість контрольного джерела світла встановлюють досліджуване і подають на нього номінальні величини параметрів живлення;

г) змінюючи відстань між фотоприймачем та досліджуваним джерелом встановлюють ту саму відстань між фотоприймачем та джерелом світла, що й при градуванні (пункт 4б);

д) шукана сила світла визначається за виразом (4.13), довірчі границі відносної похибки результату вимірювань визначаються за виразами (4.14 – 4.15).

Контрольні запитання

1. Правила зберігання та встановлення у фотометричні пристрої світловимірювальних ламп світлового потоку і сили світла.

2. Особливості конструкції світловимірювальних джерел світла.

3. Як виконуються вимірювання сили світла на розподільчому фотометрі?

4. Як використовують закон квадратів відстаней та закон косинусів для вимірювання сили світла?

5. Опишіть принципову схему лінійного фотометра. Опишіть конструкцію фотометричної головки.

Лабораторна робота 5
Методи вимірювання світлотехнічних параметрів
джерел світла та світлових приладів
Вивчення методів перевірки придатності фотоприймачів,
що застосовуються у фотометричних установках.

Мета роботи:

1. Ознайомитися на практиці та оволодіти з методами перевірки утомлюваності фотоприймачів.
2. Оволодіти методами перевірки пропорційності системи фотоприймач вимірювальний пристрій.

Прилади і матеріали: Фотометрична лава; люксметр, досліджуваний фотоприймач, електровимірювальний прилад, джерело світла типу СИС 107-1000, СИС107-1500 або ПЖ 220-500, ПЖ220-1000 тощо.

Теоретичні відомості

1. Перевірка утомлюваності фотоелемента

Утомлюваність фотоелемента – зміна чутливості з часом не повинна перевищувати 2% від величини початкового фотоструму при освітленості на поверхні коригуючого світлофільтра рівній 800 люкс.

Перевірка утомлюваності фотоелемента виконується ну установці зображеній на рис. 5.1.

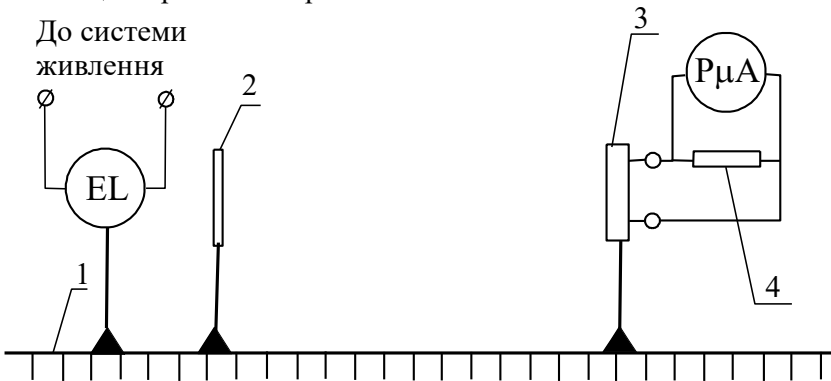


Рис. 5.1 установка для перевірки втомлюваності фотоелементів.
1 – фотометрична лава; 2 – шторка; 3 – фотоелемент; 4 – шунт; PμA – мікроамперметр зхі шкалою 10 – 100 μA.

У якості джерела випромінювання застосовують світловимірювальні джерела світла типу СИС 107-1000, СИС 107-1500 або прожекторні лампи типу ПЖ-1000 і їм подібні.

Допускається похибка у встановленні величини абсолютної освітленості $\pm 10\%$, а у встановленні колірної температури джерела випромінювання $\pm 100\text{K}$.

Перед вимірюванням утомлюваності фотоелемент необхідно витримувати не менше доби у темноті при нормальних кліматичних умовах і не засвічувати до початку випробувань.

Проведення випробувань

Через 5-10с після відкриття шторки 2 (рис. 1) знімають відлік n_1 приладом, що вимірює фотострум, другий відлік n_2 знімають через 10 хвилин при неперервному освітленні фотоелемента. Стомлюваність Δ у % вираховують за виразом:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%. \quad (5.1)$$

Обчислення виконують до десятих відсотка.

2. Перевірка пропорційності системи фотоелемент-вимірювальний прилад.

Відхилення від прямої пропорційності залежності між освітленістю фотоелемента і фотострумом при зміні освітленості у два рази допускається $\pm 1\%$.

Пропорційність перевіряють на фотометричній установці для вимірювання сили світла. У якості джерела світла застосовують світловимірювальні джерела світла або лампи типу ПЖ 220-500, ПЖ 220-1000 тощо зі стабільними параметрами.

Задаючись величинами відліків $n_1 = 0,5n'_{\max}$, та $n_2 = 1n'_{\max}$ (n'_{\max} - максимальне значення відліку даного діапазону вимірювань вимірювального приладу), визначають відстань між джерелом світла і фотоелементом $l_{0,5}$ l_1 відповідно.

При виконанні рівності

$$\frac{I_{\text{відн.}}}{0,5 \cdot l_{0,5}^2} = \frac{I_{\text{відн.}}}{1 \cdot l_1^2}; \quad (5.2)$$

де $I_{\text{відн.}}$ – відносна сила світла джерела випромінювання

Система фотоелемент-електровимірювальний прилад вважається пропорційною.

Відхилення від прямої пропорційності визначають за виразом:

$$\frac{(C_{0,5} - C_1)}{C_1} 100\% \leq 1\%; \quad (5.3)$$

де $C_{0,5} = \frac{I_{\text{відн.}}}{0,5 \cdot l_{0,5}^2}$, $C_1 = \frac{I_{\text{відн.}}}{1 \cdot l_1^2}$ - ціна вимірювальної шкали прила-

ду, що вимірює фотострум у середині та вкінці шкали вимірювального діапазону.

Порядок виконання роботи

1. Перевіряють утомлюваність фотоелемента, для цього :
 - а) збирають установку зображену на рис. 5.1;
 - б) після встановлення номінальної напруги на джерелі світла, за допомогою люксметра знаходять на фотометричній лаві відстань від джерела світла на якій освітленість складає $800 \text{ лк} \pm 10\%$;
 - в) на цю відстань встановлюється закритий шторкою досліджуваний фотоелемент, що пройшов попередню витримку у темноті на протязі однієї доби;
 - г) відкривають шторку фотоелемента і через 5 – 10 с знімають покази (3-5 показів) електровимірювального приладу n_1 а через 10 хвилин покази n_2 (3-5 показів);
 - д) після обробки результатів вимірювань згідно додатку А визначають утомлюваність фотоелемента за виразом (5.1).
2. Перевіряють пропорційність системи фотоелемент – електровимірювальний прилад на установці, схема якого зображена на рис. 5.1, для чого:
 - а) встановлюють контрольне або еталонне джерело світла з відомою силою світла та подають на нього номінальну напругу (струм);

б) пересуваючи фотоелемент вздовж фотометричної лави добиваються показів електровимірювального приладу рівних половині максимального значення відліку даного діапазону вимірювань вимірювального приладу і за шкалою фотометричної лави визначають відлік $l_{0,5}$ - відстань між джерелом світла та фотоелементом;

в) далі, пересуваючи фотоелемент вздовж фотометричної лави добиваються показів електровимірювального приладу рівних максимальному значенню відліку даного діапазону вимірювань вимірювального приладу і за шкалою фотометричної лави визначають відлік l_1 - відстань між джерелом світла та фотоелементом;

г) відхилення від прямої пропорційності системи фотоелемент – електровимірювальний прилад визначають за виразом (5.3).

Контрольні запитання

1. Опишіть будову вакуумного фотоелемента . Чим заповнюють балон газонаповненого фотоелемента?

2. Які елементи використовуються для виготовлення фотокатодів фотоелементів з зовнішнім фотоэффектом?

3. Розкажіть про відмінності характеристик вакуумного та газонаповненого фотоелемента. Дайте порівняльний аналіз їх характеристик.

4. Намалюйте схему ФЕП і поясніть принцип його роботи. Від чого залежить коефіцієнт вторинної емісії?

5. Які фактори впливають на темновий струм ФЕП ?

6. Як визначити коефіцієнт підсилення ФЕП ? Чому має місце відхилення від лінійності світлової характеристики ФЕП ?

7. Фоторезистори. Їх основні властивості.

8. Які бувають режими роботи фотоелементів з р-п переходом ? Коли вони застосовуються.

9. Розкажіть про основні властивості фотодіодів.

10. Розкажіть про основні властивості селенового фотоелемента.

11. Чому селенові фотоелементи набули при світлових вимірюваннях велике значення , порівняно з іншими фізичними приймачами ?

Лабораторна робота 6
Методи вимірювання світлотехнічних характеристик
складових авіаційних світлосигнальних пристроїв
Дослідження спектральних коефіцієнтів пропускання
кольорових світлофільтрів.

Мета роботи:

1. Оволодіти на практиці методами визначення спектральних коефіцієнтів пропускання світлофільтрів.
2. Оволодіти на практиці з методами градування монохроматорів.

Прилади і матеріали: Кольорові світлофільтри, монохроматор УМ-2 Джерела світла з суцільним та лінійчатим спектром, градувальний світлофільтр зі скла ПС7 або ЗС7 (аналогом за призначенням).

Теоретичні відомості

Для розкладання складного випромінювання у спектр широко застосовується явище дисперсії та дифракції. Суть цих явищ полягає наступному: Випромінювання рваних довжин хвиль по різному відхиляється від початкового напрямку, коли проходить крізь диспергуючу (дифрагуючу) систему основним елементом якої є призма, дифракційна ґратка, тощо. На рис. 6.1 показана принципова схема спектрального приладу з допомогою якого визначають спектральний склад випромінювання.

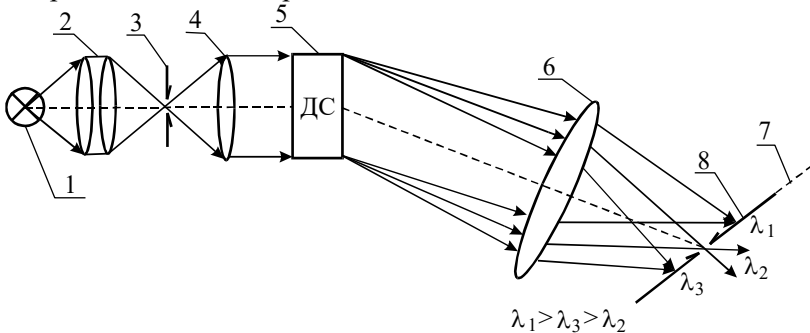


Рис. 6.1. Принципова схема спектрального приладу з диспергуючою (дифрагуючою) системою.

1- джерело випромінювання, 2- конденсор, 3- вхідна щілина, 4 - об'єктив коліматора; 5 – диспергуюча (дифрагуюча) система; 6 - об'єктив камери; 7 – фокальна площина об'єктива камери; 8 - вихідна щілина.

Потік випромінювання через вхідну щілину 3 попадає на об'єктив коліматора 4, який перетворює його в майже паралельний пучок, а об'єктив камери 6 встановлений після диспергуючої (дифрагуючої) системи знову збирає його у площині вихідної щілини 8. Проходячи через диспергуючу (дифрагуючою), світло завдяки явищам дисперсії або дифракції розкладається у спектр. Вихідна щілина виділяє зі спектра вузьку спектральну полосу, яку можна вважати монохроматичною. Змінюючи положення щілини або повертаю диспергуючу (дифрагуючу) систему можна виділити випромінювання потрібної частини спектра. Тому спектральну лінію можна визначити як зображення вхідної щілини, що створене монохроматичним випромінюванням у спектральному приладі.

Визначення спектрального коефіцієнта пропускання світлофільтрів виконується за допомогою універсального монохроматора УМ-2, призначеного для виділення вузької спектральної ділянки. На рис. 6.2 зображена схема установки для визначення спектральних коефіцієнтів пропускання світлофільтрів.

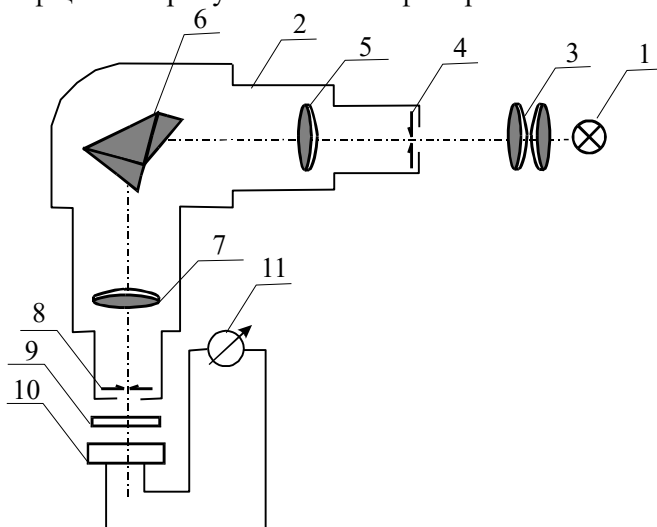


Рис. 6.2 Схема установки для визначення спектральних коефіцієнтів пропускання.

1- джерело випромінювання, 2- монохроматор УМ-2, 3 - конденсор 4 - вхідна щілина, 5 - об'єктив коліматора; 6 – призма; 7 - об'єктив камери; 8 - вихідна щілина; 9 – досліджуваний світлофільтр; 10 фотоприймач; 11 – електровимірний прилад.

Принцип дії установки полягає у наступному: Світловий потік джерела світла 1 збирається конденсором 3 у площині вхідної щілини 4 монохроматора 2. Вхідна щілина розташована у фокальній площині об'єктива коліматора 5 і тому світловий потік падає на призму 6 паралельним пучком. Після проходження через призму 6 світловий потік, розкладений за спектром, збирається об'єктивом камери 7 у площині вихідної щілини монохроматора. При заданому положенні призми у вихідну щілину проходить світловий потік досить вузької ділянки спектра, який можна вважати монохроматичним (тобто потік практично однієї довжини хвилі).

При повороті призми спектр буде переміщуватися відносно вихідної щілини. Таким чином з вихідної щілини монохроматора при різних положеннях призми будуть виходити світлові потоки різних довжин хвиль. Монохроматичний світловий потік, що виходить з монохроматора падає на фотоприймач 10, фотострум якого вимірюється електровимірювальним пристроєм 11.

Якщо перед фотоприймачем встановити світлофільтр, то величина фотоструму зменшиться пропорційно його коефіцієнта пропускання. Тому для визначення величини спектрального коефіцієнта пропускання світлофільтра τ_λ достатньо знати відношення показів електровимірювального приладу при встановленому n і без світлофільтра n_0 при різних довжинах хвиль.

$$\tau_\lambda = \frac{n}{n_0}. \quad (6.1)$$

Кут відхилення променя призмою залежить від кута падіння променів на грань призми, показника заломлення матеріалу з якого виготовлена призма та кутів при вершині призми. У відповідності з цим залежність кута повороту призми та від довжини хвилі випромінювання $n^o = f(\lambda)$ має нелінійний характер. Тому перед початком роботи необхідно виконати градування монохроматора, тобто визначити вид функції $n^o = f(\lambda)$. З цією метою використовують ртутно-кварцеву лампу, що має лінійчатий спектр випромінювання. Зокрема у видимому діапазоні лінії ліній з довжинами хвиль 404,6 нм; 435,8 нм; 491,6 нм; 546,1 нм; 577,0 нм; 690,7 нм. Якщо виконати сканування спектра такої лампи і засікти величини кута повороту призми, що відповідають відомим лініям лінійчатого спе-

ктра джерела, то за цими даними можна побудувати градувальну криву, яку можна використати для визначення виділеної монохроматором довжини хвилі випромінювання джерела з суцільним спектром. Приклад такого градувального графіка показано на рис. 6.3.

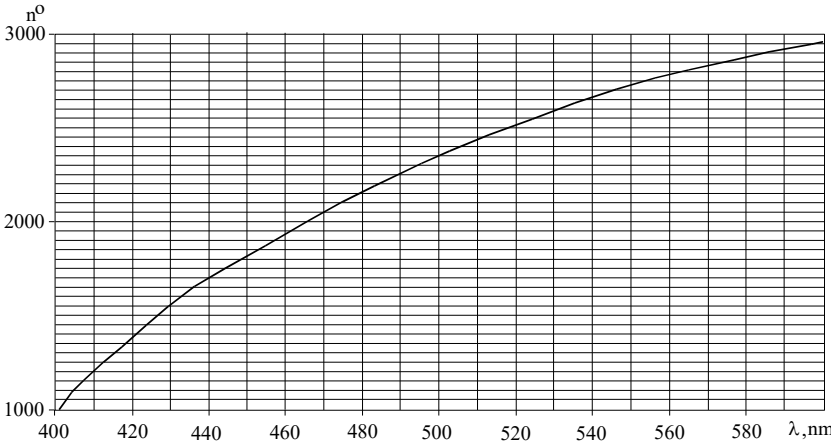


Рис. 6.3. Приклад градувального графіка монохроматора УМ-2 побудованого за допомогою спектра ртутно-кварцевої лампи.

Якщо відсутнє джерело з лінійчатим спектром то для градування монохроматора можна використати криву, що ілюструє залежність спектрального коефіцієнта пропускання спеціального градувального світлофільтра виготовленого зі скла марки ПС7. Особливою відзнакою такого світлофільтра є те що його спектральна крива пропускання має ряд вузьких максимумів та мінімумів які припадають на всю область видимого діапазону випромінювання. Якщо побудувати експериментально отриману залежність $\tau_\lambda = f(n^0)$ такого світлофільтра, то за характерним малюнком піків та провалів можна визначити і побудувати залежність $n^0 = f(\lambda)$ яку також можна використовувати для визначення довжини хвилі монохроматичних пучків випромінювання, що виділяє монохроматор. Десяткові показники поглинання скла ПС7 (ЗС7) наведено у додатку Є.

Порядок виконання роботи

1. Виконати градуювання монохроматора, для чого:
 - а) за даними наведеними у додатку Є розрахувати спектральну залежність коефіцієнта пропускання градуювального світлофільтра застосовуваного у роботі, результати обчислень подати таблично та графічно;
 - б) зібрати установку зображену на рис 6.2, але не встановлювати світлофільтр;
 - в) обертаючи барабан повороту призми з кроком не меншим за 50^0 фіксувати покази електровимірювального приладу, результати вимірювання подати таблично і графічно з тим де масштабом по осі довжин хвиль, що й попередній графік;
 - г) повернути барабан у вихідне положення і повторити вимірювання але зі встановленим градуювальним світлофільтром, подані дані подати таблично і графічно з рівним попереднім графікам масштабом по осі довжин хвиль;
 - д) порівнюючи графічні дані попередніх обчислень та вимірювань визначити градуювальну залежність кута повороту барабана від довжини хвилі, знайдену залежність подати графічно.
2. Виконати вимірювання спектральної залежності коефіцієнта пропускання досліджуваного світлофільтра, для чого:
 - а) встановити перед вихідною щілиною досліджуваний світлофільтр і обертаючи барабан повороту призми з кроком не меншим за 50^0 фіксувати покази електровимірювального приладу, результати вимірювання подати таблично і графічно;
 - б) використовуючи градуювальний графік та вираз (6.1) визначають шукану спектральну залежність коефіцієнта пропускання досліджуваного світлофільтра, результати підрахунків та обчислень подати таблично і графічно.

Контрольні запитання

1. Просторове розкладання випромінювання, що має суцільний спектр. Визначення монохроматичного та однорідного випромінювань.
2. Види спектрів складного випромінювання. Функція спектральної густини потоку випромінювання.
3. Спектральна густина потоку випромінювання у рівнохвильовому та рівночастотному спектрах.

4. На яких фізичних явищах ґрунтується робота спектральних приладів?

5. Намалювати схему та пояснити принцип роботи спектральних приладів.

Лабораторна робота 7
Методи вимірювання світлотехнічних характеристик
складових авіаційних пристроїв
Дослідження колірних характеристик
авіаційних світлофільтрів.

Мета роботи: Оволодіння на практиці методами розрахунку координат кольору, колірного тону і чистоту кольору (насиченість), інтегрального коефіцієнта пропускання кольорових світлофільтрів, що застосовуються у авіаційних світлосигнальних системах.

Прилади і матеріали: Отримані експериментально дані спектральних коефіцієнтів пропускання, дані відносного розподілу енергії у спектрі вибраного джерела, дані розподілу кривих сумування.

Теоретичні відомості

Визначення колірного тону і чистоти кольору виконується за результатами розрахунків. Розрахунки виконуються за обчисленими або вимірними величинами спектральних коефіцієнтів пропускання і даними розподілу енергії у спектрі вибраного джерела випромінювання.

Будь-який колір C може бути отриманий шляхом змішування трьох основних взаємно незалежних кольорів, взятих у певних кількостях

$$C = x' \cdot X + y' \cdot Y + z' \cdot Z; \quad (7.1)$$

де X, Y, Z – основні кольори, x', y', z' – колірні коефіцієнти, що вказують у яких співвідношеннях потрібно змішувати основні кольори.

Для визначення колірного тону і чистоти кольору користуються колірним трикутником сторонами якого є координати кольоровості x, y та z . Ці координати визначаються за виразами:

$$x = \frac{x'}{x' + y' + z'}, y = \frac{y'}{x' + y' + z'}, z = \frac{z'}{x' + y' + z'}. \quad (7.2)$$

Сума координат кольоровості $x + y + z = 1$. Для визначення коефіцієнтів кольору необхідно знати відносну спектральну інтенсивність випромінювання P_λ джерела світла, величини питомих координат кольору $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ і спектральні коефіцієнти пропускання світлофільтрів τ_λ .

$$x' = \int_{380}^{760} P_{\lambda} \cdot \bar{x} \cdot \tau_{\lambda} d\lambda, y' = \int_{380}^{760} P_{\lambda} \cdot \bar{y} \cdot \tau_{\lambda} d\lambda, z' = \int_{380}^{760} P_{\lambda} \cdot \bar{z} \cdot \tau_{\lambda} d\lambda. \quad (7.2)$$

Існує кілька способів розрахунку зазначених інтегралів. Найбільш природній полягає у визначенні добутків типу $P_{\lambda} \cdot \bar{x} \cdot \tau_{\lambda}$ через рівні малі проміжки $\Delta\lambda$ і подальшого їх сумування. Для такого розрахунку можна користуватися таблицями заздалегідь визначених добутків $P_{\lambda} \cdot \bar{x}$, $P_{\lambda} \cdot \bar{y}$, $P_{\lambda} \cdot \bar{z}$ з інтервалами 10 або 5 нанометрів.

На колірному графіку усі спектральні кольори від 400 до 700 нм розташовані на граничній кривій – локусі. У центрі область, що відповідає білому кольору. Знаючи величини координат кольоровості x та y на колірному графіку можна знайти точку, що відповідає цим координатам. Далі через точку, що відповідає координатам кольоровості джерела типу А (В, С) і знайдену точку проводять пряму до перетину з локусом. Точка перетину з локусом буде визначати колірний тон випромінювання джерела, що пройшло через світлофільтр. Чистоту кольору p визначають або за кривими рівної чистоти кольору, або за виразами:

$$p = \frac{y_{\lambda}}{y} \frac{(x - x_{\delta})}{(x_{\lambda} - x_{\delta})} = \frac{y_{\lambda}}{y} \frac{(y - y_{\delta})}{(y_{\lambda} - y_{\delta})}; \quad (7.3)$$

де x_{λ} , y_{λ} - координати кольоровості однорідного (чистого спектрального) випромінювання; x_{δ} , y_{δ} – координати кольоровості джерела білого випромінювання; x , y – координати кольоровості суміші білого і однорідного випромінювань.

Координати кольоровості джерел різних типів наведено у таблиці 7.1. Величини x_{λ} , y_{λ} визначаються при визначенні колірною тону, вони є координатами точки перетину з локусом продовження лінії, що проходить через точки x координатами $[x, y]$, $[x_{\delta}, y_{\delta}]$.

Координати кольоровості джерел різних типів

Таблиця 7.1

Тип джерела	T _c	X	У
А	2854	0,448	0,408
В	4800	0,348	0,352
С	6500	0,310	0,316
Е	5000	0,333	0,333

З огляду на (7.2) інтегральний коефіцієнт пропускання кольорового світлофільтра можна визначити з виразу:

$$\tau = \frac{y'_{\tau}}{y'}; \quad (7.4)$$

де y' та y'_{τ} – колірні коефіцієнти випромінювання, що впало і пройшло крізь світлофільтр відповідно.

Порядок виконання роботи

1. Визначають координати кольоровості досліджуваного світлофільтра виготовленого з певної марки кольорового скла заданої товщини (марка скла та товщина зразка визначається викладачем), для чого:

а) користуючись даними десяткових показників поглинання наведеними у додатку Б за виразом (2.1) визначають залежність спектрального коефіцієнта пропускання світлофільтра від довжини хвилі. Крім таблиці, визначену залежність подають також у графічному вигляді;

б) використовуючи дані відносного спектрального розподілу енергії джерел (додаток В), спектральною залежністю відносної світлової ефективності (додаток Г), та спектральним розподілом питомих координат кольору або добутками питомих координат кольору на величини відносного спектрального розподілу енергії випромінювання джерел світла (додаток Ж) за виразом (7.2) визначають координати кольору випромінювання джерела світла заданого типу, що пройшло через світлофільтр;

в) виконані обчислення подають таблично (можливий варіант таблиці наведено нижче).

Розрахунок координат кольору випромінювання, що пройшло крізь світлофільтр

Таблиця 7.2

$\lambda, \text{нм}$	τ	Координати кольору випромінювання, що падає			Координати кольору випромінювання, що пройшло		
		$\bar{x}_i \cdot P_i$	$\bar{y}_i \cdot P_i$	$\bar{z}_i \cdot P_i$	$\bar{x}_i \cdot P_i \cdot \tau_i$	$\bar{y}_i \cdot P_i \cdot \tau_i$	$\bar{z}_i \cdot P_i \cdot \tau_i$
380
---	- - -	---	---	---	---	---	---
760
$y' = \sum_{i=1}^n \bar{y}_i P_i = 100$				$x'_\tau = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot P_i \tau_i$	$y'_\tau = \sum_{i=1}^n \bar{y}_i \cdot P_i \tau_i$	$z'_\tau = \sum_{i=1}^n \bar{z}_i \cdot P_i \tau_i$	

2. Визначають інтегральний коефіцієнт пропускання світлофільтра, для цього використовують результати сумування y'_τ і той факт що величина y' нормована таким чином, що її значення рівне 100, тому значення величини y'_τ чисельно буде рівним інтегральному коефіцієнту пропускання вираженому у процентах.

3. Визначають колірний тон випромінювання, для чого:

а) на графіку кольоровості [x y] (додаток 3) наносять координати кольору, що відповідають координатам випромінювання вибраного джерела світла x_6 y_6 (див табл. 7.1), та підраховані координати випромінювання, що пройшло крізь світлофільтр x_τ, y_τ ;

б) через знайдені точки проводять пряму лінію до перетину з локусом на якому позначені довжини хвиль однорідних (чистих спектральних) тонів і за цією точкою перетину визначають довжину хвилі у нанометрах домінуючого випромінювання тобто – колірний тон.

4. Визначають чистоту (насиченість) кольору випромінювання, що пройшло крізь світлофільтр, для цього:

а) визначають координати точки x_λ, y_λ перетину лінії, що сполучає координати кольору випромінювання джерела світла та випромінювання, яке пройшло крізь світлофільтр (див. п.3);

б) за виразом (7.3) або за лініями рівної чистоти кольору на графіку кольоровості визначають величину чистоту кольору випромінювання, що пройшло через досліджуваний світлофільтр.

Контрольні запитання

1. Чому система XYZ називається розрахунковою?
2. Діаграма колірності x y та її особливості.
3. Два способи систематизації та кількісного вираження кольорів. На чому вони ґрунтуються, їх порівняльні характеристики, переваги та недоліки.
4. Розкажіть про основні положення теорії трикомпонентного кольорового зору Юнга-Гельмгольца.
5. Які фактори крім фізичних характеристик випромінювання (потужність, спектральний склад) впливають на відчуття кольору.
6. Перерахуйте основні закони адитивного змішування кольорів.
7. Опишіть принципову схему колориметра. Поясніть, що таке колориметричні умови спостереження.
8. Яка величина характеризує вплив спектрального складу джерела світла на зорове сприйняття кольорових об'єктів.
9. Способи отримання кольорів. Чому субтрактивний спосіб вважається різновидністю адитивного.
10. Розкажіть про джерела білого світла, які застосовуються у колориметрії.

Лабораторна робота 8
Методи вимірювання світлотехнічних характеристик
складових авіаційних світлосигнальних систем
Дослідження світлотехнічних характеристик імпульсних
джерел світла.

Мета роботи: Оволодіння на практиці методами визначення освічування, експозиції та ефективної сили світла.

Прилади і матеріали: Імпульсне джерело світла ИКС-10. з блоком живлення, джерело постійного світла, Осцилоскоп С1-97, фотоелемент електровимірювальний прилад, люксметр або фотометр.

Теоретичні відомості

Енергетичні і світлові величини, що характеризують спалах

У авіаційних світлосигнальних система набули поширення імпульсні джерела світла – тобто джерела світла енергетичні і світлові характеристики яких швидко змінюються у часі. На рис. 8.1 показана характерна крива зміни миттєвих значень сили світла імпульсного джерела за час одного спалаху

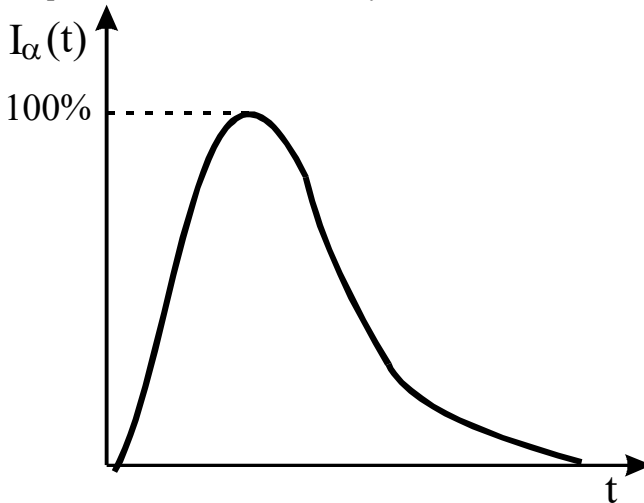


Рис. 8.1. Зміна миттєвої сили світла імпульсного джерела у часі

Для характеристики імпульсного джерела використовуються величини, відмінні від тих, якими характеризуються джерела постійної дії. Так, сила світла імпульсного джерела в обраному напрямку характеризується фронтами наростання і зменшення миттєвих значень сили світла, максимальним значенням сили світла, що часто називають амплітудним, та інтегральною характеристикою, що називається освічування, [кд с]:

$$\Theta = \int_0^{t_{всп}} I_{\alpha}(t) dt; \quad (8.1)$$

де Θ - освічування; $t_{всп}$ - тривалість спалаху; $I_{\alpha}(t)$ миттєві значення сили світла в обраному напрямку α .

Під тривалістю спалаху $t_{всп}$ розуміють час, протягом якого світлова чи енергетична величина, що характеризує спалах, буває рівною або більшою певної частини її амплітудної величини. Стосовно до освічування $t_{всп}$ - це час, протягом якого миттєве значення сили світла

$$I_{\alpha t} \geq n I_{\alpha \max}, \text{ де } 0 < n < 1$$

Дотепер немає спільної думки у визначенні тривалості спалаху. Під тривалістю спалаху розуміють час, протягом якого сила світла задовольняє одному з нерівностей:

$$I_{\alpha t} \geq 0.50 I_{\max}; \quad I_{\alpha t} \geq 0.35 I_{\max}; \quad I_{\alpha t} \geq 0.1 I_{\max}$$

Тому, користуючись освічуванням і іншими інтегральними характеристиками спалаху, слід домовитися для якої тривалості спалаху вони визначалися.

Енергетичне освічування, [Дж с⁻¹]

$$\Theta_e = \int_0^{t_{всп}} I_{\alpha}(t) dt. \quad (8.2)$$

Для оцінки впливу імпульсного джерела на приймач користуються поняттями експозиція (кількість освітлення), лк•с і енергетична експозиція (кількість опромінення), Дж•м⁻²:

$$H = \int_0^{t_{всп}} E(t) dt, \quad H_e = \int_0^{t_{всп}} E_e(t) dt; \quad (8.3)$$

Яскравість спалаху в обраному напрямку α характеризується амплітудним значенням $L_{\alpha \max}$ (за період спалаху) і інтегральним

значенням, що називають інтегралом імпульсу яскравості, $\text{кД} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$:

$$\int_0^{t_{\text{всн}}} L_{\alpha}(t) dt; \quad (8.4)$$

де $L_{\alpha}(t)$ - миттєві значення яскравості.

Енергетична яскравість спалаху в обраному напрямку простору визначається аналогічно і характеризується інтегралом імпульсу енергетичної яскравості, $\text{Дж} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$:

$$\int_0^{t_{\text{всн}}} L_{e\alpha}(t) dt; \quad (8.5)$$

де $L_{e\alpha}(t)$ - миттєві значення енергетичної яскравості.

Світлова енергія спалаху, $\text{лм} \cdot \text{с}$, випромінювана за час спалаху:

$$Q_v = \int_0^{t_{\text{всн}}} \Phi_v(t) dt; \quad (8.6)$$

де $\Phi_v(t)$ - миттєві значення світлового потоку спалаху.

Величину Q раніш називали світлосумою спалаху.

Енергія випромінювання спалаху, Дж :

$$Q_e = \int_0^{t_{\text{всн}}} \Phi_e(t) dt; \quad (8.7)$$

де $\Phi_e(t)$ - миттєві значення потоку випромінювання спалаху, Вт .

Для живлення імпульсного джерела звичайно використовуються схема з конденсатором. Це найбільш розповсюджене і зручне джерело живлення імпульсної лампи. Знаючи ємність конденсатора і напругу, до якого він заряджається, легко визначити світлову й енергетичну ефективність спалаху, імпульсного джерела, $\text{лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$:

$$K_{\text{всн}} = \frac{2 \int_0^{t_{\text{всн}}} \Phi(t) dt}{CU^2}. \quad (8.8)$$

$$K_{евс} = \frac{2 \int_0^{t_{всп}} \Phi_e(t) dt}{CU^2}; \quad (8.9)$$

де $K_{всп}$ і $K_{евсп}$ - світлова й енергетична ефективність спалаху; C - ємність конденсатора, що живить; U - напруга на обкладках конденсатора на початку спалаху.

Світлотехнічні та енергетичні параметри трубчастих імпульсних ламп

Імпульсна лампа характеризується миттєвими значеннями тих параметрів, постійні величини яких характеризують лампу постійної дії. Це миттєві значення: у обраному напрямку енергетичної сили світла $I_{e\alpha t}$ і сили світла $I_{\alpha t}$; потоку випромінювання Φ_{et} і світлового потоку Φ_t ; енергетичної світності M_{et} і світності M_t і інших світлотехнічних параметрів. Усі вони приведені вище.

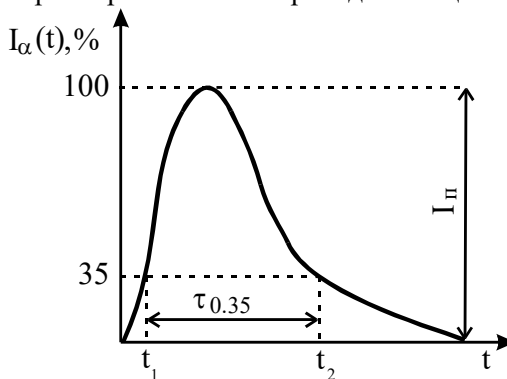


Рис. 8.2 До пояснень миттєвих значень імпульсного джерела світла.

Для трубчастих імпульсних ламп сила світла й освічування визначаються в напрямку, перпендикулярному осі лампи, при горизонтальному положенні лампи ($\alpha = 0$). Любою з енергетичних чи світлотехнічних параметрів, що характеризують спалах, змінюється за час спалаху від нульового до пікового (максимального) значення і знову від пікового до нульового. Імпульсне джерело крім миттєвих значень параметрів характеризується ще й інтегральними параметрами. Основними параметрами імпульсного джерела світла є

миттєві значення сили світла $I_{\square}(t)$, пікове (максимальне) значення сили світла I_{π} і освічування Θ . Криві миттєвих значень сили світла різних трубчастих імпульсних джерел $I_{\alpha}(t)$ мають характерний вид і при невеликих індуктивностях контуру (до 10 мкГн) зміною масштабів по осях ординат можуть бути приведені до кривої, зображеної на малюнку 2.

У вітчизняній літературі під тривалістю спалаху імпульсної лампи $t_{всп} = \tau$ розуміють час, протягом якого миттєві значення сили світла бувають рівні і більші за $0,35 I_{\pi}$. Малі зміни форми цієї кривої у різних імпульсних трубчастих ламп дозволили встановити наступні співвідношення [*]:

$$\Theta'_{омн} = \frac{\Theta}{I_{\pi} \tau_{0,35}} = \frac{\int_0^{t_1} I_{\alpha}(t) dt}{I_{\pi} \tau_{0,35}} \approx 0,86 \pm 0,04; \quad (8.10)$$

$$\Theta'_{омн} = \frac{\Theta}{\int_0^{\infty} I_{\alpha}(t) dt} \approx 0,81 \pm 0,04. \quad (8.11)$$

Ці співвідношення дозволяють зменшити число параметрів, що характеризують спалах трубчастої лампи, до двох. Це - пікове значення сили світла і тривалість спалаху або освічування і тривалість спалаху.

Форму імпульсу $I_{\alpha}(t)$ (див. мал. 8.2) пропонують [3] описувати наступним виразом:

$$I_{\alpha}(t) = I \left[\frac{t}{t_n} \exp\left(1 - \frac{t}{t_n}\right) \right]^{\beta}; \quad (8.12)$$

де $I_{\alpha}(t)$ - миттєве значення сили світла у напрямку, перпендикулярному осі лампи; I_{π} - пікове (максимальне) значення сили світла у цьому ж напрямку; t і t_n - відповідно поточний час і час досягнення пікової величини сили світла.

Параметр β може мати значення від 0,14 до 1,2, що зростають з ростом індуктивності контуру. При великих величинах індуктивності $\beta = 3$. Виразом (11) рекомендують користатися при зміні ене-

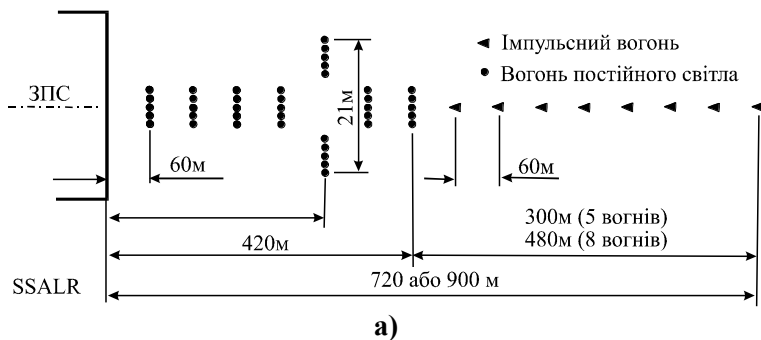
ргії розряду від 50 до 14500 Дж і ємності живильного конденсатора від 200 до 2500 мкф.

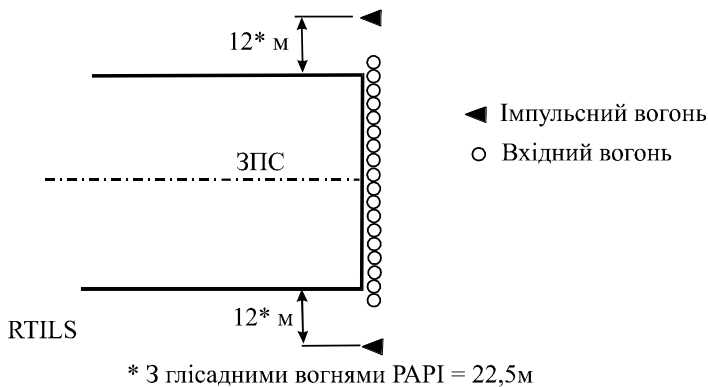
У категорійних авіаційних світлосигнальних системах знайшли своє застосування імпульсні вогні.

Імпульсні вогні в основному використовуються для забезпечення безпечної посадки повітряного судна в складних метеоумовах. Їх застосовують у випадку, коли яскравість вогнів постійного горіння в системі вогнів наближення, що працюють при повній інтенсивності, стає недостатньою, щоб гарантувати безпечну посадку. Використовують систему імпульсних вогнів і при гарній видимості, з метою полегшення виявлення місця розташування злітно-посадочної смуги в умовах міста. Як правило система імпульсних вогнів наближення має 3 рівні регулювання яскравості. Це пояснюється тим, що потужна система з одним рівнем яскравості заподіює осліплення при гарній видимості, особливо вночі.

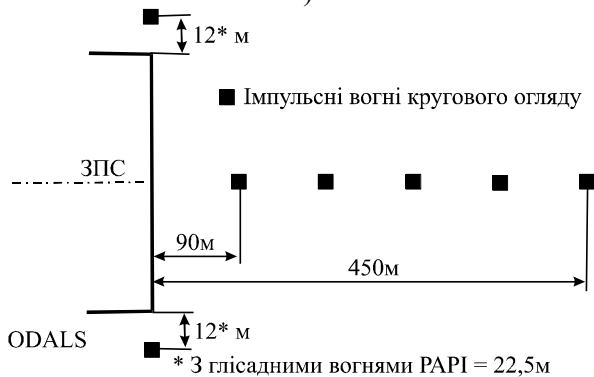
Відповідно до вимог ІКАО імпульсні вогні можуть використовуватися у:

- у підсистемі вогнів наближення точного заходу на посадку (категорія II, III);
- у підсистемі вогнів позначення порогу ЗПС;
- як складова частина підсистеми вогнів наближення та вогнів імпульсної лінії;
- у підсистемі вогнів наближення не категорійних систем посадки.





б)



в)

Рис. 8.2. Схеми розміщення імпульсних вогнів в у системі світлосигнальної системи посадки

Імпульсний вогонь складається з освітлювальної арматури і індивідуальної шафи контролю і керування. Джерело світла – газорозрядна імпульсна ксенонова лампа. Типовий відносний розподіл енергії у спектрі показаний на рис. 8.3

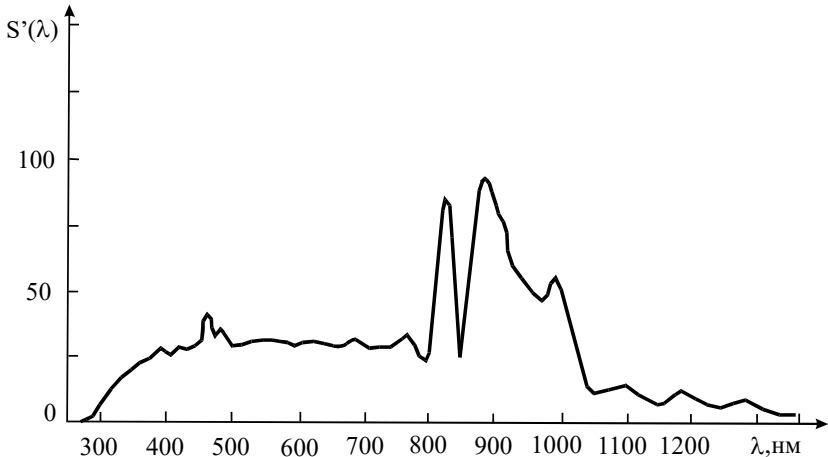


Рис. 8.3. Відносний розподіл енергії у спектрі імпульсного ксенонового джерела світла.

Порядок виконання роботи

1. Визначити експозицію, освітчування створювану імпульсним джерелом світла та час тривалості імпульсу за рівнем 0,35, для чого:

а) зібрати установку зображену на рис. 8.4: та ознайомитись з інструкцією по експлуатації електронно-вимірювальних приладів, що застосовуються у роботі.

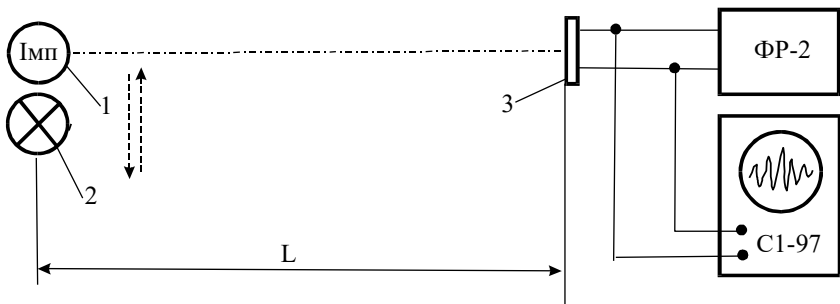


Рис. 8.4. Схема установки для визначення світлотехнічних параметрів імпульсних джерел світла.

1 – імпульсне джерело світла, 2 – постійне джерело світла, 3 – фотоприймач фотометра.

б) встановити імпульсне джерело світла і відрегулювати параметри осцилографа таким чином, щоб на екрані можна було б спостерігати увесь імпульс (крива 1 рис. 8.5);

в) фломастером або м'яким олівцем перемалювати на прозорій плівці встановленій перед екраном форму імпульсу (крива 1 рис 8.5) та зафіксувати при цьому параметри масштабу розгортки по вертикалі (величина пропорційна освітленості фотоприймача) та горизонталі (час імпульсу);

г) замінити імпульсне джерело на постійне з відомою силою світла і подати на нього номінальне значення параметрів живлення;

д) фломастером або м'яким олівцем позначити на тій же прозорій плівці встановленій перед екраном форму су (крива 2 рис 8.5) рівень сигналу від постійного джерела при тих же параметрах розгортки по вертикалі та горизонталі.

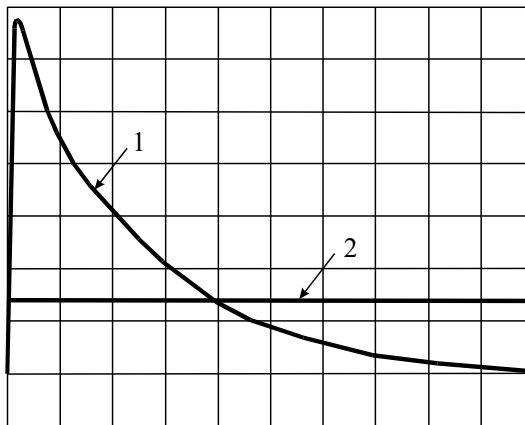


Рис. 8.5. Зображення сигналу від імпульсного 1- та постійного –2 джерел світла на екрані осцилоскопа.

2. Світлотехнічні величини імпульсного джерела світла знаходять за допомогою градуювання отриманого осцилоскопичного зображення постійним джерелом світла, відомі параметри якого дозволяють знайти масштаб зображення імпульсу по вертикалі у світлотехнічних одиницях (сила світла або освітленість.), а величина часу розгортки променя осцилоскопа – масштаб зображення по горизонталі (тривалість імпульсу):

а) визначивши палеткою з міліметровим кроком площу обмежену кривою 1 (рис 8.5) та знаючи масштаб зображення імпульсу у світлотехнічних та часових одиницях визначають експозицію або освічування створювану імпульсним джерелом світла, а також максимальне або пікове значення сила світла (освітленості) та час імпульсу на рівнів 0,25 від I_{\max} .

Контрольні запитання

1. Яка величини є основною для характеристики випромінювання, що змінюється у часі?
2. Що таке енергетична експозиція? Одиниці її вимірювання.
3. Назвіть основні параметри імпульсного випромінювання.
4. З якою метою застосовуються імпульсні вогні у складі авіаційних світлосигнальних систем.
5. Поясніть методику визначення світлотехнічних параметрів імпульсних світлотехнічних пристроїв та джерел світла.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуторов М.М. Основы светотехники и источники света: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд. доп. и перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 384 с.
2. Справочная книга по светотехнике /Под ред. Ю. В. Айзенберга. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 528с.
3. Импульсные источники света / Под ред. И.С. Маршака М.: Энергия, 1978. 472 с.
4. Тиходеев П. М. Световые измерения в светотехнике. – Л.: Госэнергоиздат 1962, -464с.
5. І.М. Кучерук, В.П. Дущенко, В.М. Андріанов Обробка результатів фізичних вимірювань. – К.: Вища школа , 1981 215с.
6. Скороход А.В. Элементы теории вероятностей та випадкових процесів. - К.: Вища школа , 1975, 296 с.
7. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. - М.: Наука , 1968,288 с.
8. Справочная книга по светотехнике / Под. Ред. Ю.Б.Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.
9. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы) – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 268 с.
10. Сапожников Р.А. Теоретическая фотометрия. – Л.: Энергия, 1977. – 261 с.
11. Щепина Н.С. Основы светотехники. – М.: Энергоатомиздат, 1985: – 344 с.
12. Рохлин Г.И. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
13. Эпштейн М.И. Измерения оптического излучения в электронике. – М.: Энергия, 1975. – 248 с.
14. Гуревич М.М. Введение в фотометрию. – Л.: Энергия, 1968. – 192 с.
15. ГОСТ 8.332-78 Световые измерения.
16. ГОСТ 14686-69. Средства измерения световых величин. Термины.
17. ГОСТ 13088-67. Колориметрия. Термины, буквенные обозначения.
18. ГОСТ 20526-82. Приборы электровакуумные фото- электронные. Термины и определения. 19. ГОСТ 21934-83. Приемники из-

- лучения полупроводниковые (фотоэлектрические и фотоприёмные устройства). Термины и определения.
20. ГОСТ 10171-82. Лампы накаливания электрические светоизмерительные рабочие. Технические условия.
 21. ГОСТ 24286-80. Импульсная фотометрия. Термины, определения и буквенные обозначения.
 22. ДСТУ 3623-97. Лампи електричні. Терміни та визначення.
 23. ДСТУ 2691-94. Метрологія. Терміни та визначення.
 24. ДСТУ 3394-96. Метрологія. Схема для вимірювання світлових величин.
 25. ГОСТ 8.332 – 78. Световые измерения . Значения относительной спектральной световой эффективности.
 26. ГОСТ 7721 – 89. Источники света для измерения света. Типы. Технические требования. Маркировка.
 27. ГОСТ 9242 – 59. Светофильтры сигнальные для транспорта. Методы измерения цветности и коэффициента пропускания.
 28. ГОСТ 17616 – 82. Лампы электрические. Методы измерения электрических и световых параметров.

ДОДАТКИ

Додаток А

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Вимірювання фізичних величин – це процес, що має певну складність і залежить від роду вимірюваної величини, характеру використання апаратури, методів вимірювання і нарешті, від самого дослідника (його досвіду, досконалості органів чуття та ін.). Усі ці фактори впливають на процес вимірювання по різному і призводять до появи похибки, тобто відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Деякі фактори впливають на процес вимірювання нерегулярно, тому похибки також змінюються не регулярно. Вони мають випадковий характер, тому їх називають випадковими похибками. Похибку вимірювання визначають як відхилення результату вимірювання величини від істинного значення вимірюваної величини. Різницю між результатом вимірювання x та істинним значенням a вимірюваної величини називають абсолютною похибкою:

$$\Delta x = x - a \quad (9.1)$$

Крім абсолютної похибки, є ще поняття відносної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{a}; \quad (9.2)$$

де Δx – абсолютна похибка; a – істинне значення вимірюваної величини.

Для зменшення впливу випадкових похибок виконують багаторазове спостереження вимірюваної величини x і у якості оцінки її істинного значення приймають середнє арифметичне:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (9.3)$$

де x_i – результати i -того спостереження вимірюваної величини n – повне число спостережень.

За результатом серії спостережень можна оцінити розкид результатів окремих вимірювань відносно істинного значення вимірюваної величини. Для цього обчислюють середньоквадратичне відхилення окремого результату:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (9.4)$$

Крім випадкових, ще розрізняють грубі (або промахи), інструментальні та систематичні похибки. Отже, загальна похибка вимірювань включає складові цих похибок.

Під грубими похибками розуміють похибки вимірювань, які істотно перевищують похибку очікувану при певних умовах. Грубі похибки можуть стати проявом раптової зміни умов вимірювань (зміна напруги мережі, зміна температури, вологості та інших параметрів середовища). До грубих похибок приводять також звичайні помилки при вимірюванні та записі результатів вимірювання. Уникнути грубих похибок (промахів) можна при повторних вимірюваннях, а також при ретельному аналізі результатів вимірювань.

Інструментальні похибки зумовлені похибками засобів вимірювань. До інструментальних похибок належать похибки схеми і технологічні похибки. Похибки схеми характеризуються самою структурною схемою засобів вимірювань. Технологічні похибки виникають внаслідок неточності виготовлення окремих елементів. У багатьох випадках до приладів додаються паспортні дані, в яких вказуються величини похибок (клас точності приладу, найбільша абсолютна похибка та ін.)

Систематичні похибки виникають там де вимірювальні прилади або установки мають певні недоліки, що призводять до систематичного підвищення або заниження величин. У метрології встановлено таку класифікацію систематичних похибок: методичні, інструментальні, похибки викликані впливом зовнішніх умов, похибки з-за неправильного встановлення елементів вимірювальної схеми, суб'єктивні похибки. Правильний вибір та прискіпливий аналіз методу вимірювань та вимірювальних приладів дозволяє вилучати окремі систематичні похибки або враховувати їх введенням поправок у розрахункові вирази, а інші звести до мінімуму. Ці не вилучені залишки повинні бути оцінені при визначенні загальної похибки вимірювань. Найчастіше вилученими систематичними похибками є похибки вимірювальних засобів. Проте слід пам'ятати, що якщо похибка вимірювань деякої величини x_j у даній точці

шкали конкретного приладу є систематичною, то для сукупності однотипних приладів ця похибка є випадковою. У працездатного приладу ця похибка не повинна виходити за межі $\pm \Delta x_j$, що визначаються максимальною похибкою вказаною у паспорті на прилад або відповідати класу його точності. Вважають, що в цих межах будь-яке значення не вилюченої похибки є рівно ймовірним (рівномірний або прямокутний розподіл). Оцінка середньоквадратичного

відхилення такого розподілу рівна $\frac{\Delta x_j}{\sqrt{3}}$. Якщо результат вимірю-

вань спотворений кількома не вилюченими систематичними похибками з рівномірним законом розподілу, то межу (максимальне значення) θ сумарної систематичної похибки при числі складових $m > 4$ можна оцінити за виразом:

$$\theta = k_p \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m \theta_j^2} = k_p \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)_{x_j = \bar{x}_j}^2 \cdot (\Delta x_j)^2} ; \quad (9.5)$$

де, $\theta_j = \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)_{x_j = \bar{x}_j} \cdot (\Delta x_j)$ - границя j -тої систематичної похиб-

ки, k_p – коефіцієнт, що залежить від довірчої ймовірності α , з якою оцінюється сумарна систематична похибка

Залежність коефіцієнта k_p від величини α

Таблиця 9.1

α	0,90	0,95	0,99
k_p	0,95	1,1	1,4

При малій кількості складових $m \leq 4$ оцінка θ за попереднім виразом може виявитися заниженою і її слід визначати за виразом:

$$\theta = \sum_{j=1}^m |\theta_j| = \sum_{j=1}^m \left| \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)_{x_j = \bar{x}_j} \cdot \Delta x_j \right| . \quad (9.6)$$

Похибку вимірюваної величини прийнято характеризувати довірчим інтервалом, у який істинне значення величини x попадає з

заданою довірчою ймовірністю α . При розподілі випадкової похибки за нормальним законом довірчий інтервал знаходять за виразом:

$$x = \bar{x} \pm S_x^- \cdot t_{\alpha, n} - \theta; \quad (9.7)$$

де $t_{\alpha, n}$ – параметр розподілу Студента, що залежить від прийнятої ймовірності α та числа спостережень n . (додаток Л); S_x^- – середньоквадратична похибка результату серії вимірювань або середньоквадратична похибка середнього арифметичного:

$$S_x^- = \frac{S_n}{\sqrt{n}}. \quad (9.8)$$

ВИЯВЛЕННЯ І УСУНЕННЯ ПРОМАХІВ, ДОПУЩЕНИХ ПРИ ВИМІРЮВАННЯХ

Якщо в серії рівноточних вимірювань тієї самої фізичної величини (n — невелике) дістали один з результатів, який дуже відрізняється від усіх інших, то виникає підозра, що допущено грубу помилку — промах. У таких випадках треба одразу ж перевірити, чи не порушено основні умови вимірювань. Наявність промаху може значно спотворити як середнє значення вимірюваної величини, так і межі надійного інтервалу.

Тому з серії вимірювань треба вилучити той результат вимірювань, який є промахом. Однак сам факт значного відхилення одного з результатів вимірювань від інших не дає ще права на вилучення цього вимірювання як промаху. Потрібно встановити, чи таке відхилення не є наслідком статистичного розсіювання.

При невеликій кількості вимірювань n , що не перевищує 10-20 доцільно для виявлення промахів застосовувати критерії, які можна дістати при використанні випадкової величини v :

$$v = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sqrt{\frac{n-1}{n} \cdot S_n^2}} \quad \text{або} \quad v = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{\sqrt{\frac{n-1}{n} \cdot S_n^2}}; \quad (9.9)$$

де x_{\max} ; x_{\min} – відповідно найбільше і найменше значення вимірюваної величини в серії з n вимірювань, S_n^2 – середньоквадратична похибка окремого вимірювання.

Випадкову величину v описують законом розподілу, густина ймовірності якої визначається виразом:

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{\pi(n-1)}} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{v^2}{n-1}\right)^{\frac{n-4}{2}}; \quad (9.10)$$

У додатку К наведено значення v_{max} — максимально можливі значення v_i , які можуть виникати внаслідок статистичного розсіювання для відповідних значень надійності α .

Для виявлення промахів знаходимо середнє арифметичне \bar{x} серії вимірювань і середню квадратичну похибку S_n . При розрахунках використовуємо всі значення x_i . Потім обчислюють відносне відхилення v за виразом (9,9) для $x_{max}(x_{min})$ серії з n вимірювань якщо ж виявиться, що одержане значення $v > v_{max}$ при заданій надійності α , то це означає, що результат x_{max} (x_{min}) можна розглядати як промах. Цей результат слід вилучити із серії n вимірювань і знайти нові значення \bar{x} і S_n для серії $n-1$ вимірювань. Так само роблять і з тими результатами вимірювань, які відрізняються від усіх інших. Якщо ж величина $v < v_{max}$ для тих самих значень n і α , то результат $x_{max}(x_{min})$ буде наслідком статистичного розсіювання і немає ніяких підстав розглядати його як промах.

Значення v_{max} для різних значень числа вимірювань n і надійності α

Таблиця 9.2

N	$\alpha = 0,90$	$\alpha = 0,95$	$\alpha = 0,975$	$\alpha = 0,999$
3	1,41	1,41	1,41	1,41
4	1,65	1,69	1,71	1,72
5	1,79	1,87	1,92	1,96
6	1,89	2,00	2,07	2,13
7	1,97	2,09	2,18	2,27
8	2,04	2,17	2,27	2,37
9	2,10	2,24	2,35	2,46
10	2,150,33	2,29	2,41	2,54
11	2,190,29	2,34	2,47	2,61

НЕПРЯМІ ВИМІРЮВАННЯ І ЇХ ОБРОБКА

Проводячи фізичні дослідження, знаходять фізичні величини, які не можна визначити прямими вимірюваннями. Так, неможливо прямими вимірюваннями визначити в лабораторних умовах ряд електричних, магнітних, світлових величин. Такі величини визначають непрямыми вимірюваннями. Непрямыми вимірюваннями називають такі, в яких шукана величина виражається явною функцією інших величин x_j ($j = 1, 2, \dots, m$), які знаходять прямими вимірюваннями. Завдання обробки результатів при непрямих вимірюваннях, як і при прямих вимірюваннях — це знаходження шуканої величини та встановлення надійного інтервалу із заданою надійністю.

Шукана величина y в загальному випадку виражається через величини x_j функціональною залежністю:

$$y=f(x_j) \quad (9.11)$$

У конкретних задачах вважається, що функція $f(x_j)$ задана в явній формі, а також відомі математичні і фізичні константи, що входять у (9.11). Кожний з аргументів x_j вимірюють різними методами, причому вимірювання деяких з них можуть бути одноразовими, інші - багаторазовими залежно від точності вимірювання і характеру вимірюваної величини.

Шукана величина y може бути функцією одного і багатьох параметрів, може виражатись через них лінійно й нелінійно.

Оскільки в більшості випадків теоретичні дисперсії розподілу результатів прямих вимірювань невідомі, то оцінку дисперсії результату непрямих вимірювань обчислюють за виразом:

$$S_y^2 = \sum_{j=1}^m \left[\frac{\partial f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)}{\partial x_j} \right]^2 \cdot S_{x_j}^2 ; \quad (9.12)$$

Коли математичне сподівання похибки результату непрямих вимірювань не дорівнює нулю, то ця похибка складатиметься як з випадкової похибки, так і з систематичної похибки θ , яку знаходять за виразом

$$\theta = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} \right) \cdot S_{x_j}^2 . \quad (9.13)$$

Вираз (9.13) записаний для випадків, коли похибки вимірювань x_j попарно не корелюються..

Для вилучення систематичної похибки θ з результату непрямих вимірювань, потрібно до величини y додати значення θ з протилежним знаком.

Остаточний результат непрямих вимірювань записують так:

$$y = \bar{y} \pm t_{an} \cdot S_{\bar{y}} - \theta . \quad (9.14)$$

Для малих чисел $n_j < 20$ коефіцієнт t_{an} знаходять у таблиці коефіцієнтів Стьюдента з ефективним числом ступенів вільності, яке обчислюється за виразом

$$k_{ef} = \frac{\left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)}{\partial x_j} \right) \cdot S_{x_j}^2 \right]}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{n_j - 1} \left(\frac{\partial f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)}{\partial x_j} \right)^2 \cdot S_{x_j}^4} ; \quad (9.15)$$

де n_j — число прямих вимірювань величини x_j , яке для різних параметрів у загальному випадку буде неоднаковим. Якщо кількість прямих вимірювань для всіх параметрів рівняння однакова і дорівнює n , то вираз (9.15) набуває вигляду

$$k_{ef} = (n - 1) \cdot \frac{\left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)}{\partial x_j} \right) \cdot S_{x_j}^2 \right]}{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)}{\partial x_j} \right)^2 \cdot S_{x_j}^4} . \quad (9.16)$$

Аналогічно, як знаходять коефіцієнт Стьюдента. Надійну границю випадкового відхилення результату непрямих вимірювань для надійності α знаходять

$$\Delta y = t_{\text{анеф}} S_{\bar{y}} = t_{\text{анеф}} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2} \cdot S_{x_j}^2. \quad (9.17)$$

Відносна похибка результату непрямих вимірювань

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \pm \frac{\Delta y}{y} = \pm \frac{t_{\text{анеф}} \cdot S_{\bar{y}}}{y} = \pm t_{\text{анеф}} \sqrt{\sum_{j=1}^m \frac{1}{f^2} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2} \cdot S_{x_j}^2 = \\ &= \pm t_{\text{анеф}} \sqrt{\sum_{j=1}^m \left[\frac{\partial(\ln f)}{\partial x_j} \right]^2} S_{x_j}^2. \end{aligned} \quad (9.18)$$

Аналіз виразів (9.17, 9.18) для конкретних задач показує, який з аргументів x_j вносить значну похибку і що необхідно підвищити точність його вимірювання.

Коефіцієнти Стьюдента

Таблиця 9.3

N												
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	0,33	0,51	0,73	1,0	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,7
3	0,29	0,45	0,62	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,28	0,42	0,58	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,27	0,41	0,57	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,27	0,41	0,56	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,27	0,40	0,55	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,26	0,40	0,55	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,26	0,40	0,54	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,26	0,40	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	0,26	0,40	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
12	0,26	0,40	0,54	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,4	4,5
13	0,26	0,40	0,54	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3

14	0,26	0,39	0,54	0,69	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,0	4,2
15	0,26	0,39	0,54	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
16	0,26	0,39	0,54	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	2,9	4,0
17	0,26	0,39	0,54	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0
18	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	4,0
19	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	3,9
20	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9	3,9
21	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,8	3,9
22	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,8	3,9
23	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,8	3,9
24	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,8	3,9
25	0,26	0,39	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,8	3,9
26	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,8	3,9
27	0,26	0,39	0,53	0,68	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,8	3,9

ГРАФІКИ

У фізичних та інших експериментальних дослідженнях графіки використовують з різною метою. Якщо табличні значення можуть вказувати на зміну досліджуваної величини, то графічне зображення досліджуваної залежності наочно вказує на характер залежності і в багатьох випадках може служити для теоретичного аналізу даної залежності.

Графіки часто використовують для порівняння експериментальних даних з даними, одержаними на основі теоретичних уявлень. Графіками також користуються для встановлення вигляду емпіричної формули, яка виражає співвідношення між двома величинами.

У переважній більшості для побудови графіків використовують прямокутну систему координат. Інші системи координат, наприклад полярну систему, також застосовують для графічного зображення результатів вимірювань, але значно рідше. У прямоку-

тній системі координат прийнято на горизонтальній осі відкласти незалежну змінну, тобто величину, яку експериментатор задає сам, а на вертикальній осі — ту величину, яку він визначає.

На кожній осі вибраної системи координат будують шкалу. Шкали, які наносяться на звичайних вимірювальних лінійках із сталою ціною поділки, називають рівномірними. Для графічних зображень експериментальних даних, крім рівномірних шкал, використовують особливі, які називаються шкалами функції або функціональними шкалами.

Для побудови функціональної шкали неперервної і монотонної функції $f(x)$ на відрізку $[a, b]$ вираховують значення цієї функції для ряду рівновіддалених значень аргументу x_1, x_2, \dots, x_m , включаючи початок і кінець інтервалу. Потім відкладають на даній осі в більшості випадків від точки, що відповідає значенню функції $f(a)$, відрізки довжиною $\mu[f(x) - f(a)]$. Величину масштабу μ визначають із співвідношення:

$$\mu[f(b) - f(a)] = l ;$$

де l — наперед вибрана довжина шкали.

Кінці кожного відрізка $\mu f(x_i)$ на шкалі позначаються відповідними значеннями аргументу x_i . При цьому дістаємо шкалу з нерівномірною довжиною поділок для рівновіддалених значень аргументу.

Функціональні шкали знаходять широке застосування при обробці експериментальних даних і часто полегшують знаходження виду функції для побудови емпіричної формули. Спеціальним підбором функціональних шкал графіки багатьох функцій можуть бути зведені до прямолінійного виду.

Наприклад розглянемо рівняння кубічних парабол:

$$\text{а) } y = x^3; \text{ б) } y = 2x^3 + 8; \text{ в) } y = -\frac{x^3}{4} + 30; \quad 9.19)$$

Побудуємо на осі ординат звичайну рівномірну шкалу, а на осі абсцис — функціональну шкалу кубів. Побудова такої шкали рівнозначна заміні змінних $x^3 = z$. У нових змінних рівняння (9.19) будуть рівняннями першого степеня, графіки яких зображено від-

повідно на рис. 1. Прикладом функціональних шкал є шкали логарифмічної лінійки.

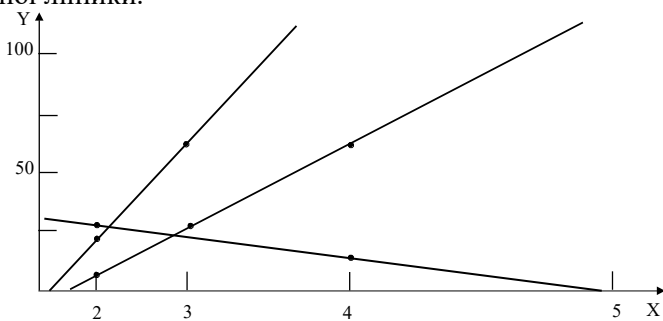
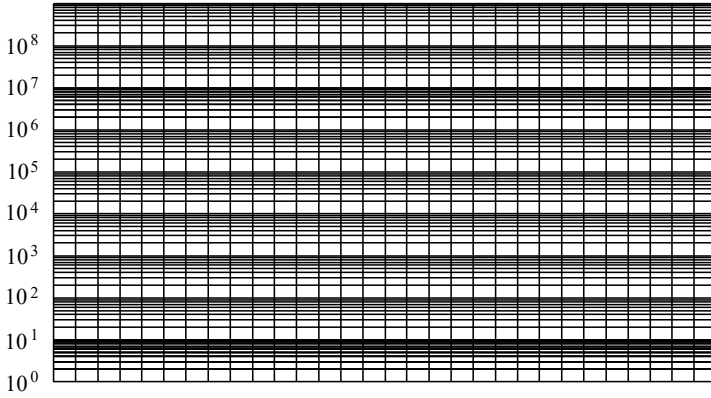


Рис. 9.1

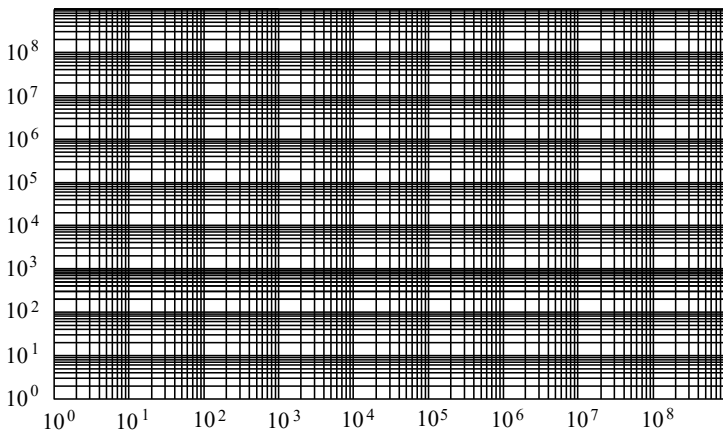
Координатні сітки, які побудовані за допомогою функціональних шкал, називають функціональними сітками. Будь-яка неявна функція, задана у вигляді

$$a\varphi(x) + b\psi(y) + c = 0; \quad (9.20)$$

де a , b , c — сталі, зображатиметься прямою лінією на функціональній сітці, в якій на осі абсцис побудована функціональна шкала функції $\varphi(x)$, а на осі ординат — функціональна шкала функції $\psi(x)$. Функції $\varphi(x)$ і $\psi(x)$ повинні бути монотонними і неперервними. На практиці, крім сіток з рівномірними шкалами (міліметровий папір), часто застосовують так званий напівлогарифмічний і логарифмічний папір. У напівлогарифмічному папері координатна сітка побудована з рівномірної і логарифмічної шкал (рис. 9.2а), а в логарифмічному папері координатна сітка побудована з логарифмічних шкал (рис. 9.2б).



а



б

Рис. 9.2 Напівлогарифмічна - а та логарифмічна - б координатна сітки

У логарифмічній координатній сітці, як відомо, початком координат є точка $x = 1, y = 1$. Тому при використанні такої сітки з даними x_i, y_i потрібно виконати перетворення так, щоб $x_i > 1$ і $y_i > 1$. Початок координат у напівлогарифмічній координатній сітці відповідає точці $x=0, y=1$. Тому потрібно зробити перетворення так, щоб $y_i \geq 1$. Перетворення x_i, y_i можна здійснити множенням їх на вибраний множник.

Після вибору паперу з певною функціональною сіткою для побудови графіків важливим є встановлення масштабу, при виборі якого слід дотримуватися вимог:

а) масштаб повинен бути простим і виражатися по можливості цілим числом. Звичайно, найкраще, коли одиниця вимірюваної величини або 10^n одиниць відповідає 1 см (n — ціле додатне або від'ємне число);

б) ціна мінімальної поділки функціональної шкали повинна дорівнювати приблизно величині похибки вимірюваної величини (рис. 9.3б). Коли ж похибка відповідає десяткам малих поділок шкали, то може бути розсіювання експериментальних даних таким, що неможливо буде встановити характер залежності (рис. 9.3а). Якщо ж похибка відповідатиме порядку десятої частки найменшої поділки, то всі випадкові відхилення настільки згладяться на кривій, що неможливо буде робити висновки про точність вимірювань (рис. 9.3, в);

в) масштаби для кожної координатної осі після врахування вимог а і б вибирають незалежно один від одного. Однак вони повинні бути такими, щоб криві не були дуже розтягнутими вздовж однієї осі. Відносна похибка підрахунків з таких графіків може бути порівняно великою і сам графік буде мало наочним. Якщо ж крива досить розтягнута вздовж осі ординат і круто нахилена до осі абсцис, то незначна похибка при визначенні величини x приведе до помітної похибки при визначенні з графіка величини y ;

г) у тих випадках, коли інтервал, в якому лежать значення аргументу або функції, далеко від нуля, доцільно на відповідній осі відлік починати не з нуля, а з деякого значення, яке трохи менше від числа, що визначає початок інтервалу.

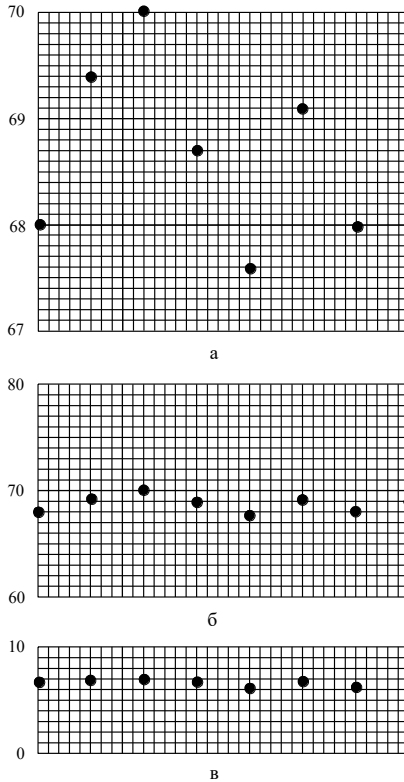


Рис. 9.3. Залежність форми графіка від вибраного масштабу.

У кінці кожної координатної осі вказують одиниці вимірювання нанесених величин. Цифровий матеріал також доцільно записувати за допомогою десяткового множника аналогічно, як і при складанні таблиць. Приступаючи до побудови графіків, треба, мати на увазі, яких змін параметрів можна чекати в даному фізичному явищі. При дослідженні можуть мати місце такі випадки, які характеризують різними законами зміни фізичної величини.

У першому з них, наприклад, можна зустрітися з результатами, коли протікання фізичних процесів зазнаватиме швидких, раптових змін, що супроводитиметься такими самими швидкими змінами тих або інших параметрів системи. Так, при монотонній зміні температури тіла в певних інтервалах повинні монотонно змінюва-

тись його теплоємність, механічні, електричні та оптичні властивості.

Але коли при певній температурі в тілі відбуватимуться фазові переходи, то зазнаватимуть стрибка числові значення об'єму та інших характеристик тіла.

На кривих залежності спектральних коефіцієнтів пропускання, поглинання, відбиття від довжини хвилі для різних частот також спостерігається значна кількість максимумів і мінімумів, положення яких відшукують за значеннями резонансних частот електрично-заряджених частинок тіла і їх агрегатів.

За допомогою динамічних методів проведення експерименту автоматичні самописні прилади на діаграмних стрічках виписують неперервні криві зміни параметрів, величини яких використовують для розрахунків. У таких випадках значно полегшується процес побудови графіків. Набагато важче передбачити характер графіка, побудованого на експериментальних даних, одержаних статичними методами. При цьому уважно перевіряють відносно розміщення експериментальних точок на графіку. Якщо точки розкидані хоча б в одній частині графіка і є підстави думати про можливість якогось явища, то для цієї ділянки графіка слід провести повторні вимірювання як для тих самих значень аргументу, так і для сусідніх значень.

У випадку, коли фізичне явище повинно протікати плавно і всі параметри системи при цьому мають також змінюватись плавно, а на графіку одна або дві експериментальні точки лежать від кривої лінії на відстанях значно більших, ніж величина похибки, і якщо немає підстав вважати, що в даній області могли мати місце різні зміни в досліджуваній залежності, то такі відхилення можна пояснити грубою помилкою у вимірюваннях або в обчисленнях. Такі точки треба перевірити. Коли ж при повторних вимірюваннях дістали подібний результат, то такі результати можуть свідчити про різні зміни параметрів системи, яких не передбачили в процесі досліду. У таких випадках треба дослідити ділянки кривої $y = f(x)$ біля значень x , для яких спостерігаються подібні відхилення.

При побудові графіків бажано дотримуватись таких вимог:

а) якщо на одній і тій самій координатній сітці наносяться дані, які дістали експериментально, і теоретична крива, то експе-

риментальні дані треба відмічати точками або іншими значками чітко. Точки на теоретичній кривій не наносять;

б) через експериментальні точки проводять плавну криву так, щоб вона найближче проходила до істинної функціональної залежності.

Якщо ж просто сполучити всі точки, то можна дістати ламану лінію, яка нічого спільного не матиме з шуканою залежністю. Форма ламаної лінії не відтворюватиметься при повторних вимірюваннях, бо кожний результат вимірювання супроводжується похибками. Похибку експериментальних даних на графіках можна вказувати знаками показаними на рис. 9.5.

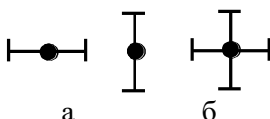


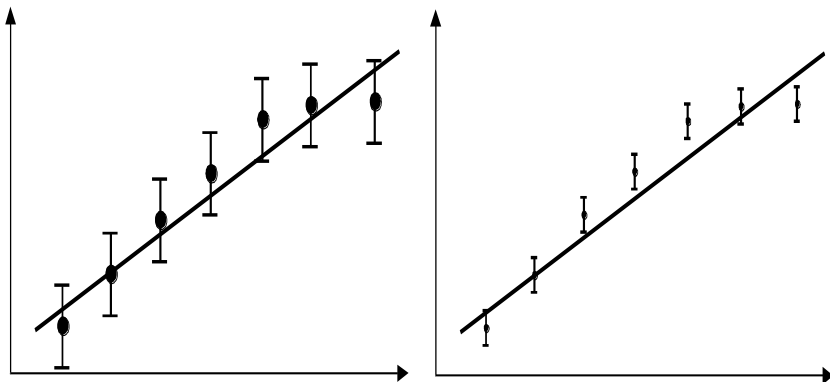
Рис 9.4 графічне зображення похибки експериментальних даних

Довжина лінії від точки в кожному сторону по горизонталі і по вертикалі вказує на графіку величину похибки. Такі знаки бажано наносити на графіки, коли різні експериментальні точки дістали з неоднаковою точністю, а також при порівнюванні експериментальних даних з теоретичними. Так, на рис. 9.5.4а відхилення результатів експерименту від теорії не слід вважати значним, а на рис. 9.5б для того самого явища відхилення буде значним.

При побудові графіків, якщо хід кривої плавний, немає потреби наносити велику кількість точок, вказують тільки відповідним способом ширину інтервалів реєстрації зміни аргументу. Але якщо на кривій з'являються точки, які вказують на можливість екстремумів і перегинів, то в області таких точок потрібно зробити

Рис. 9.5 Графічне подання результатів вимірювання отриманих з різною точністю.

більше вимірювань і нанести на координатній сітці більше експериментальних даних.



Коли ж при побудові графіків на основі експериментальних даних дістали криву лінію, то в деяких випадках бажано вибором різних функціональних шкал привести дану залежність до лінійної. Складнішими будуть випадки, коли закон фізичного явища описується рівнянням, в яке входить три і більше змінних $f(x,y,z)=0$. У таких випадках часто одній із змінних величин надають ряд фіксованих значень. Для кожного з таких значень треба дослідити залежність між двома іншими величинами. Так, тангенс кута діелектричних втрат діелектриків залежить як від температури T , так і від частоти ν . Здебільшого досліджують також залежність $\text{tg}\delta=f(T)$ при фіксованих значеннях частоти. Якщо є відповідна апаратура, то досліджують також залежність $\text{tg}\delta=f(\nu)$ при сталій температурі.

Для наочності залежностей вигляду $f(x,y,z) = 0$ використовують тривимірні системи координат.

Додаток Б

Десятковий показник поглинання $k(\lambda)$ шару скла товщиною 1 мм по маркам

Дов. хв.	Марка скла									
	НС1	НС2	НС3	НС6	НС7	НС8	НС9	НС10	НС11	НС12
380	0,011	0,080	0,200	0,127	0,222	0,443	0,894	1,319	3	3
400	0,031	0,080	0,200	0,062	0,123	0,294	0,619	0,990	2,303	3
420	0,050	0,140	0,384	0,071	0,127	0,288	0,595	0,930	2,107	3
440	0,079	0,286	0,541	0,066	0,125	0,283	0,580	0,900	2,020	3
450	0,081	0,290	0,552	0,061	0,116	0,271	0,560	0,875	1,960	3
460	0,080	0,279	0,538	0,055	0,109	0,258	0,541	0,846	1,887	3
480	0,073	0,240	0,480	0,053	0,109	0,260	0,544	0,850	1,887	3
500	0,070	0,232	0,464	0,053	0,111	0,274	0,558	0,875	1,900	3
520	0,071	0,232	0,464	0,051	0,110	0,274	0,560	0,875	1,917	3
540	0,073	0,240	0,450	0,050	0,107	0,260	0,547	0,861	1,887	3
550	0,071	0,224	0,440	0,050	0,106	0,258	0,545	0,854	1,887	3
560	0,066	0,208	0,425	0,051	0,107	0,260	0,547	0,861	1,887	3
580	0,072	0,232	0,395	0,053	0,113	0,269	0,563	0,881	1,917	3
600	0,078	0,248	0,460	0,055	0,116	0,275	0,574	0,895	1,900	3
620	0,079	0,250	0,487	0,058	0,115	0,272	0,568	0,875	1,850	3
640	0,081	0,264	0,520	0,059	0,117	0,273	0,552	0,862	1,784	3
650	0,076	0,252	0,480	0,060	0,118	0,274	0,546	0,862	1,750	3
660	0,070	0,218	0,408	0,060	0,118	0,274	0,541	0,850	1,713	3
680	0,043	0,128	0,244	0,062	0,116	0,264	0,503	0,810	1,577	2,725
700	0,030	0,080	0,144	0,064	0,112	0,250	0,457	0,755	1,427	2,345
720	0,030	0,070	0,107	0,068	0,114	0,250	0,440	0,735	1,34	2,120
740	0,020	0,062	0,099	0,074	0,120	0,260	0,438	0,736	1,280	1,995
750	0,020	0,060	0,097	0,078	0,124	0,265	0,440	0,744	1,260	1,970
760	0,022	0,055	0,097	0,081	0,129	0,274	0,446	0,752	1,243	1,925

Додаток Б (продовження)

Десятковий показник поглинання $k(\lambda)$ шару скла товщиною 1 мм по маркам

Дов. хв.	Марка скла									
	ТС3	ТС10	УФС1	ФС6	СС2	СС8	СС15	СЗС7	СЗС22	ЗС3
380	3	0,150	0,035	0,023	0,015	0,092	0,060	0,026	0,046	0,076
400	3	0,150	0,230	0,035	0,010	0,078	0,046	0,015	0,017	0,080
420	2,640	0,430	0,720	0,082	0,010	0,072	0,052	0,011	0,009	0,190
440	2,715	0,670	1,030	0,190	0,016	0,080	0,079	0,010	0,008	0,300
450	2,768	0,670	1,070	0,300	0,025	0,102	0,103	0,009	0,007	0,320
460	2,760	0,630	1,100	0,450	0,040	0,130	0,140	0,009	0,007	0,310
480	2,665	0,520	1,330	0,950	0,079	0,230	0,350	0,010	0,007	0,250
500	2,490	0,450	1,700	1,470	0,152	0,400	0,750	0,014	0,011	0,184
520	2,250	0,390	2,300	1,750	0,244	0,640	1,310	0,032	0,028	0,150
540	2,070	0,370	2,500	1,650	0,256	0,781	2,000	0,067	0,076	0,186
550	2,000	0,370	2,500	1,550	0,220	0,730	1,900	0,079	0,116	0,220
560	1,965	0,360	2,750	1,500	0,200	0,700	1,700	0,1	0,182	0,260
580	1,970	0,310	3,500	2,200	0,330	1,080	2,400	0,155	0,371	0,410
600	2,065	0,300	3,200	3,200	0,398	1,381	3,100	0,214	0,673	0,593
620	2,238	0,330	3,000	3,100	0,370	1,461	2,900	0,280	1,093	0,801
640	2,380	0,320	2,400	3,100	0,392	1,620	3,300	0,352	1,640	0,992
650	2,444	0,290	1,750	3,400	0,384	1,641	3,300	0,380	1,990	1,080
660	2,485	0,240	1,150	3,500	0,330	1,633	2,900	0,419	2,390	1,131
680	2,558	0,150	0,360	2,700	0,180	1,370	1,750	0,484	3	1,230
700	2,580	0,100	0,120	1,280	0,044	1,040	1,040	0,533	3	1,370
720	2,525	0,100	0,080	0,430	0,009	1,020	0,920	0,570	3	1,420
740	2,360	0,110	0,095	0,130	0,001	1,018	0,910	0,595	3	1,460
750	2,225	0,120	0,110	0,067	0,000	1,000	0,930	0,611	3	1,460
760	2,180	0,130	0,125	0,036	0,000	1,012	0,950	0,613	3	1,450

Додаток Б (продовження)

Десятковий показник поглинання $k(\lambda)$ шару скла товщиною 1 мм по маркам

Дов хв.	Марка скла									
	ЗС11	ЖЗС6	ЖЗС12	ЖЗС17	ЖСЗ	ЖС19	ОС5	КС11	КС13	КС17
380	4,8	3	3	3	1,250	0,071	1,170	3	3	3
400	3,200	2,300	3	3	0,390	0,170	1,170	3	3	3
420	1,950	1,210	3	3	0,170	0,190	1,160	3	3	3
440	1,070	0,680	2,830	3	0,082	0,110	1,030	3	3	3
450	0,770	0,490	2,330	3	0,052	0,060	0,900	3	3	3
460	0,570	0,340	1,860	2,960	0,036	0,052	0,800	3	3	3
480	0,330	0,180	1,270	2,320	0,014	0,035	0,610	3	3	3
500	0,210	0,100	0,820	1,830	0,007	0,030	0,460	3	3	3
520	0,150	0,056	0,660	1,500	0,004	0,005	0,360	3	3	3
540	0,170	0,040	0,600	1,400	0,002	0,002	0,268	3	3	3
550	0,210	0,038	0,620	1,430	0,002	0,001	0,230	3	3	3
560	0,270	0,040	0,650	1,470	0,002	0,001	0,200	3	3	3
760	1,430	0,050	0,800	1,550	0,003	0,001	0,150	2,4	3	3
600	0,620	0,070	1,040	1,760	0,005	0,001	0,120	0,248	2,4	3
620	0,840	0,094	1,350	2,130	0,006	0,001	0,100	0,023	0,24	2,4
640	1,040	0,110	1,570	2,380	0,008	0,001	0,084	0,007	0,019	1,600
650	1,120	0,110	1,660	2,430	0,007	0,001	0,080	0,006	0,008	0,800
660	1,200	0,110	1,730	2,380	0,007	0,002	0,076	0,005	0,006	0,330
680	1,290	0,092	1,690	2,180	0,006	0,002	0,070	0,004	0,003	0,020
700	1,400	0,087	1,700	2,000	0,005	0,002	0,066	0,003	0,003	0,020
720	1,410	0,070	1,690	1,880	0,003	0,002	0,063	0,003	0,003	0,005
740	1,430	0,057	1,650	1,800	0,002	0,001	0,061	0,004	0,003	0,005
750	1,420	0,050	1,630	1,790	0,002	0,001	0,060	0,004	0,003	0,005
760	1,430	0,042	1,610	1,800	0,002	0,001	0,060	0,004	0,004	0,005

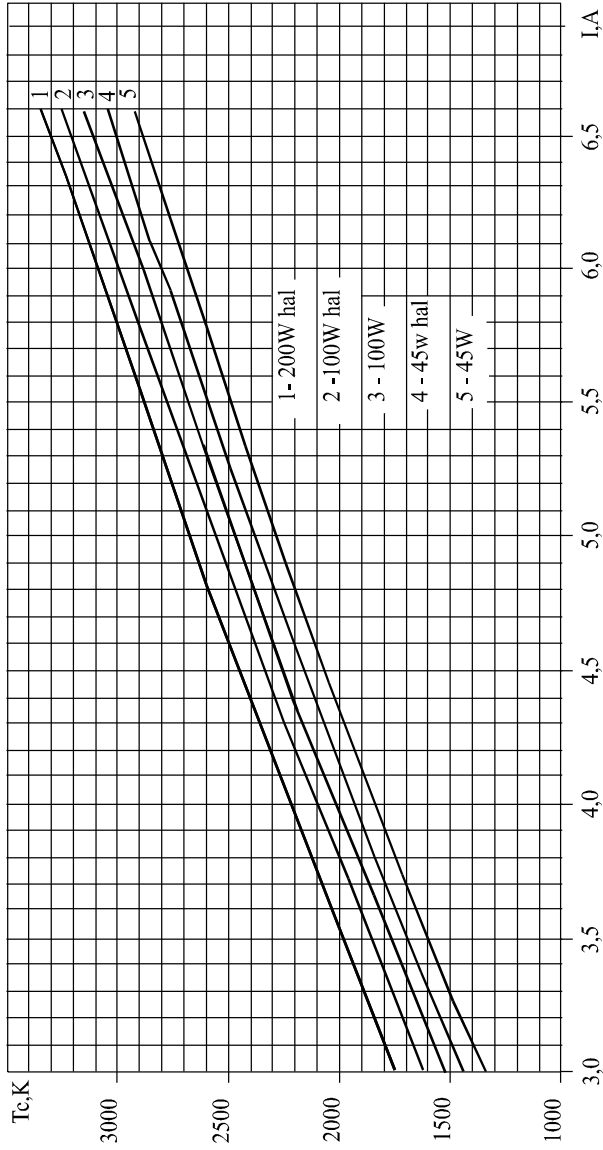
Додаток В**Відносний розподіл енергії у спектрі джерел типу А, В, С**

λ , нм	$P(\lambda)_A$	$P(\lambda)_B$	$P(\lambda)_C$	λ , нм	$P(\lambda)_A$	$P(\lambda)_B$	$P(\lambda)_C$
380	9,79	22,40	33,00	580	114,44	101,00	97,80
385	10,90	26,85	39,92	585	118,08	100,07	95,43
390	12,09	31,30	47,40	590	121,73	99,20	93,20
395	13,36	36,18	55,17	595	125,39	98,44	91,22
400	14,71	41,30	63,30	600	129,04	98,00	89,70
405	16,15	46,62	71,81	605	132,70	98,08	88,83
410	17,68	52,10	80,60	610	136,34	98,50	88,40
415	19,29	57,70	89,53	615	139,99	99,06	88,19
420	21,00	63,20	98,10	620	143,62	99,70	88,10
425	22,79	68,37	105,80	625	147,23	100,36	88,06
430	24,67	73,10	112,40	630	150,83	101,00	88,00
435	26,64	77,31	117,75	635	154,42	101,56	87,86
440	28,70	80,80	121,50	640	157,98	102,20	87,80
445	30,85	83,44	123,45	645	161,51	103,05	87,99
450	33,09	85,40	124,00	650	165,03	103,90	88,20
455	35,41	86,88	123,60	655	168,51	104,59	88,20
460	37,82	88,30	123,10	660	171,96	105,00	87,90
465	40,30	90,08	123,30	665	175,38	105,08	87,22
470	42,87	92,00	123,80	670	178,77	104,90	86,30
475	45,52	93,75	124,09	675	182,12	104,55	85,30
480	48,25	95,20	123,90	680	185,43	103,90	84,00
485	51,04	96,23	122,92	685	188,70	102,84	82,21
490	53,91	96,50	120,70	690	191,93	101,60	80,20
495	56,85	95,71	116,90	695	195,12	100,38	78,24
500	59,86	94,20	112,10	700	198,26	99,10	76,30
505	62,93	92,37	106,98	705	201,36	97,70	74,36
510	66,06	90,70	102,30	710	204,41	96,20	72,40
515	69,25	89,65	98,81	715	207,41	94,60	70,40
520	72,50	89,50	96,90	720	210,36	92,90	68,30
525	75,79	90,43	96,78	725	213,26	91,10	66,30
530	79,13	92,20	98,00	730	216,12	89,40	64,40
535	82,52	94,46	99,94	735	218,92	88,00	62,80
540	85,95	96,90	102,10	740	221,66	86,90	61,50
545	89,41	99,16	103,95	745	224,36	85,90	60,20
550	92,91	101,00	105,20	750	227,00	85,20	59,20
555	96,44	102,20	105,67	755	229,58	84,80	58,50
560	100,00	102,80	105,30	760	232,11	84,70	58,10
565	103,58	102,92	104,11	765	234,59	84,90	58,00
570	107,18	102,60	102,30	770	237,01	85,40	58,20
575	110,80	101,90	100,15	775	239,37	86,10	58,50
я580	114,44	101,00	97,80	780	241,67	87,00	59,10

Додаток Г

Відносні спектральні світлові ефективності випромінювання $V(\lambda)$,
та $V'(\lambda)$

λ , нм	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$	λ , нм	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$
380	0,0000	0,000589	590	0,757	0,0685
390	0,0001	0,002209	600	0,631	0,03315
400	0,0004	0,00929	610	0,503	0,0159,3
410	0,0012	0,03489	620	0,381	0,00737
420	0,0040	0,0966	630	0,265	0,003335
430	0,0116	0,1998	640	0,175	0,001497
440	0,023	0,3281	650	0,107	0,000677
4450	0,038	0,455	660	0,061	0,0003129
460	0,060	0,567	670	0,032	0,0001480
470	0,091	0,676	680	0,017	0,0000715
480	0,139	0,793	690	0,0082	0,00003533
490	0,208	0,904	700	0,0041	0,00001780
500	0,323	0,982	710	0,0021	0,00000914
510	0,503	0,997	720	0,00105	0,00000478
520	0,710	0,935	730	0,00052	0,000002546
530	0,862	0,811	740	0,00025	0,000001379
540	0,954	0,650	750	0,00012	0,0000000760
550	0,995	0,481	760	0,00006	0,000000428
560	0,995	0,3288	770	0,00003	0,000000241
570	0,952	0,2076	780	0,000015	0,000000139
580	0,870	0,1212			



Додаток Є

Десятковий показник поглинання $k(\lambda)$ градувальних світлофільтрів товщиною 1 мм .

Довжина хвилі λ , нм	Марки скла		Довжина хвилі λ , нм	Марки скла	
	ЗС7	ПС7		ЗС7	ПС7
240	3	3	660	1,021	0,002
260	3	3	680	0,214	0,025
280	3	1,002	700	0,022	0,004
300	0,652	0,345	720	0,015	0,009
320	0,347	0,140	740	0,016	0,340
340	0,180	0,052	750	0,020	0,260
350	0,142	0,254	760	0,025	0,090
360	0,105	0,230	780	0,059	0,044
380	0,058	0,004	800	0,104	0,295
400	0,040	0,005	840	0,175	0,009
420	0,170	0,005	880	0,235	0,133
440	0,268	0,014	920	0,193	0,007
450	0,239	0,013	960	0,061	0,002
460	0,253	0,026	1000	0,204	0,002
480	0,595	0,037	1100	1,090	0,002
500	0,282	0,025	1200	0,273	0,003
520	0,026	0,075	1300	0,052	0,003
540	0,404	0,042	1400	0,312	0,007
550	0,296	0,009	1500	0,486	0,013
560	0,032	0,012	1800	0,074	0,007
580	0,061	0,473	2100	0,300	0,005
600	0,0264	0,166	2400	0,252	0,057
620	0,0734	0,006	2700	0,351	0,036
640	0,834	0,003	3000	1,485	0,208
650	0,811	0,002			

Питомі координати кольору в системі X,Y,Z

λ , нм	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	λ , нм	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
380	0,0014	0,0000	0,0065	580	0,9163	0,8700	0,0017
385	0,0022	0,0001	0,0105	585	0,9786	0,8163	0,0014
390	0,0042	0,0001	0,0201	590	1,0263	0,7570	0,0011
395	0,0076	0,0002	0,0362	595	1,0567	0,6949	0,0010
400	0,0143	0,0004	0,0679	600	1,0622	0,6310	0,0008
405	0,0232	0,0006	0,1102	605	1,0456	0,5668	0,0006
410	0,0435	0,0012	0,2074	610	1,0026	0,5030	0,0003
415	0,0776	0,0022	0,3713	615	0,9384	0,4412	0,0002
420	0,1344	0,0040	0,6456	620	0,8544	0,3810	0,0002
425	0,2148	0,0073	1,0391	625	0,7514	0,3210	0,0001
430	0,2839	0,0116	1,3856	630	0,6424	0,2650	0,0000
435	0,3285	0,0168	1,6230	635	0,5419	0,2170	0,0000
440	0,3483	0,0230	1,7471	640	0,4479	0,1750	0,0000
445	0,3481	0,0298	1,7826	645	0,3608	0,1382	0,0000
450	0,3362	0,0380	1,7721	650	0,2835	0,1070	0,0000
455	0,3187	0,0480	1,74441	655	0,2187	0,0816	0,0000
460	0,2908	0,0600	1,6692	660	0,1649	0,0610	0,0000
465	0,2511	0,0739	1,5281	665	0,1212	0,0446	0,0000
470	0,1954	0,0910	1,2876	670	0,0874	0,0320	0,0000
475	0,1421	0,1126	1,0419	675	0,0636	0,0232	0,0000
480	0,0956	0,1390	0,8130	680	0,0468	0,0170	0,0000
485	0,0580	0,1693	0,6162	685	0,0329	0,0119	0,0000
490	0,0320	0,2080	0,4652	690	0,0227	0,0082	0,0000
495	0,0147	0,2586	0,3533	695	0,0158	0,0057	0,0000
500	0,0049	0,3230	0,2720	700	0,0114	0,0041	0,0000
505	0,0024	0,4073	0,2123	705	0,0081	0,0029	0,0000
510	0,0093	0,5030	0,1582	710	0,0058	0,0021	0,0000
515	0,0291	0,6082	0,1117	715	0,0041	0,0015	0,0000
520	0,0633	0,7100	0,0782	720	0,0029	0,0010	0,0000
525	0,1096	0,7932	0,0573	725	0,0020	0,0007	0,0000
530	0,1655	0,8620	0,0422	730	0,0014	0,0005	0,0000
535	0,2257	0,9149	0,0298	735	0,0010	0,0004	0,0000
540	0,2904	0,9540	0,0203	740	0,0007	0,0003	0,0000
545	0,3597	0,9803	0,0134	745	0,0005	0,0002	0,0000
550	0,4334	0,9950	0,0087	750	0,0003	0,0001	0,0000
555	0,5121	1,0002	0,0057	755	0,0002	0,0001	0,0000
560	0,5945	0,9950	0,0039	760	0,0002	0,0001	0,0000
565	0,6784	0,9786	0,0027	765	0,0001	0,0000	0,0000
570	0,7621	0,9520	0,0021	770	0,0001	0,0000	0,0000
575	0,8425	0,9154	0,0018	775	0,0000	0,0000	0,0000
580	0,9163	0,8700	0,0017	780	0,0000	0,0000	0,0000

Додаток Ж (продовження)

Скорочені таблиці для розрахунку коліру від джерел типів

λ нм	А			В			С		
	$P(\lambda)_A X$	$P(\lambda)_A Y$	$P(\lambda)_A Z$	$P(\lambda)_B X$	$P(\lambda)_B Y$	$P(\lambda)_B Z$	$P(\lambda)_C X$	$P(\lambda)_C Y$	$P(\lambda)_C Z$
380	0,0010	0,0000	0,0048	0,0025	0,0000	0,0113	0,0036	0,0000	0,0164
390	0,0046	0,0001	0,0219	0,0123	0,0003	0,0585	0,0183	0,0004	0,0870
400	0,0193	0,0005	0,0916	0,0558	0,0014	0,2650	0,0841	0,0021	0,3992
410	0,0688	0,0019	0,3281	0,2091	0,0057	0,997	0,3180	0,0087	1,5159
420	0,2666	0,0080	1,2811	0,8274	0,0248	3,9750	1,2623	0,0378	6,0646
430	0,6479	0,0265	3,1626	1,9793	0,0810	9,6617	2,9913	0,1225	14,6019
440	0,9263	0,0609	4,6469	2,6889	0,1768	13,4883	3,9741	0,2613	19,9357
450	1,0320	0,1167	5,4391	2,7460	0,3105	14,4728	3,9191	0,4432	20,6551
460	1,0207	0,2098	5,8584	2,4571	0,5050	14,1020	3,3668	0,6920	19,3235
470	0,7817	0,3624	5,1445	1,7297	0,8018	11,3825	2,2878	1,0605	15,0550
480	0,4242	0,6198	3,6207	0,8629	1,2609	7,3655	1,1038	1,6129	9,4220
490	0,1604	1,0398	2,3266	0,2960	1,9198	4,2939	0,3639	2,3591	5,2789
500	0,0269	1,7956	1,5132	0,0437	2,9133	2,4552	0,0511	3,4077	2,8717
510	0,0572	3,0849	0,9674	0,0810	4,3669	1,3694	0,0898	4,8412	1,5181
520	0,4247	4,7614	0,5271	0,5405	6,0602	0,6709	0,5752	6,4491	0,7140
530	1,2116	6,3230	0,3084	1,4555	7,5959	0,3705	1,5206	7,9357	0,3871
540	2,3142	7,5985	0,1625	2,6899	8,8322	0,1889	2,7858	9,1470	0,1956
550	3,7328	8,5707	0,0749	4,1838	9,6060	0,0840	4,2833	9,8343	0,0860
560	5,5086	9,2201	0,0357	5,8385	9,7722	0,0378	5,8782	9,8387	0,0381
570	7,5710	9,4574	0,0209	7,4723	9,3341	0,0206	7,3230	9,1476	0,0202
580	9,7157	9,2257	0,0170	8,8406	8,3947	0,0154	8,4141	7,9897	0,0147
590	11,5841	8,5430	0,0130	9,7329	7,1777	0,0109	8,9878	6,6283	0,0101
600	12,7103	7,5460	0,0096	9,9523	5,9086	0,0075	8,9536	5,3157	0,0067
610	12,6768	6,3599	0,0044	9,4425	4,7373	0,0033	8,3294	4,1788	0,0029
620	11,3577	5,0649	0,0020	8,1290	3,6251	0,0014	7,0604	3,1485	0,0012
630	8,9999	3,7122	0,0000	6,2135	2,5629	0,0000	5,3212	2,1948	0,0000
640	6,5487	2,5587	0,0000	4,3678	1,7066	0,0000	3,6882	1,4411	0,0000
650	4,3447	1,6389	0,0000	2,8202	1,0638	0,0000	2,3531	0,8876	0,0000
660	2,6234	0,9706	0,0000	1,6515	0,6110	0,0000	1,3589	0,5028	0,0000
670	1,4539	0,5327	0,0000	0,8796	0,3223	0,0000	0,7113	0,2606	0,0000
680	0,7966	0,2896	0,0000	0,4602	0,1673	0,0000	0,3657	0,1329	0,0000
690	0,4065	0,1467	0,0000	0,2218	0,0801	0,0000	0,1721	0,0621	0,0000
700	0,2067	0,0744	0,0000	0,1065	0,0384	0,0000	0,0806	0,0290	0,0000
710	0,1108	0,0398	0,0000	0,0538	0,0193	0,0000	0,0398	0,0143	0,0000
720	0,0556	0,0195	0,0000	0,0253	0,0089	0,0000	0,0183	0,0064	0,0000
730	0,0280	0,0100	0,0000	0,0120	0,0043	0,0000	0,0085	0,0030	0,0000
740	0,0144	0,0062	0,0000	0,0058	0,0025	0,0000	0,0040	0,0017	0,0000
750	0,0063	0,0021	0,0000	0,0024	0,0008	0,0000	0,0017	0,0006	0,0000
760	0,0032	0,0011	0,0000	0,0012	0,0004	0,0000	0,0008	0,0003	0,0000
770	0,0011	0,0000	0,0000	0,0004	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000	0,0000
Σ	109,8450	100,0000	35,5824	99,0915	100,0000	85,3094	98,0699	100,0000	118,2216

Графік кольоровості x, y

