

**Київський національний університет
імені Тараса Шевченка
фізичний факультет**

О.В. Макаренко

КОЛОРИМЕТРІЯ

Лабораторний практикум

Рекомендовано до друку Вченою Радою фізичного факультету
(протокол №__ від __ червня 2025 року)

Рецензенти

кандидат фіз.-мат. наук, доцент В.М.Кравченко
кандидат фіз.-мат. наук, доцент В.Г.Кудін

Макаренко О.В.

Колориметрія: Лабораторний практикум

В п'яти лабораторних роботах продемонстровано застосування візуальних та спектрофотометричних методів для визначення кольірних характеристик об'єктів. Розглядається представлення кольорів в різних координатних системах. Описується вимірювання індикатриси розсіювання стандартних білих зразків. Розглядається методика визначення корельованої кольірної температури джерела випромінювання.

Рекомендовано для студентів кафедри оптики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Вступ

Методичний посібник містить рекомендації до виконання лабораторних робіт з такого недостатньо висвітленого розділу оптики як колориметрія. Розглядаються питання змішування кольорів, визначення колірних координат з використанням як візуального, так і спектроскопічного методів, порівняння колірних параметрів джерел випромінювання, дослідження індикатрис розсіяння непрозорих об'єктів.

Дослідження в області кольору ускладнюються необхідністю враховувати фізіологію та психологію людського сприйняття. Відомо, що свого часу такі визначні фізики як Ньютон, Юнг, Гельмгольц, Максвел та Шредінгер приділяли колориметрії значну увагу. В останній час актуальність досліджень в галузі вимірювання кольору невинно зростає. Тому, освіта студента-оптика при відсутності ґрунтовних знань з колориметрії не може вважатися повною і завершеною.

Перед початком вимірів необхідно ознайомитись з описом установки, приладів, продумати послідовність виконання вимірів та форму запису одержаних результатів. Звіт по кожній лабораторній роботі повинен містити коротку теорію питання, оптичну схему, основні формули, експериментальні та розрахункові дані, короткі висновки.

Лабораторна робота №1

Адитивне змішування кольорів. Диск Максвелла.

Мета роботи: дослідити закономірності адитивного змішування кольорів.

Обладнання: лампочка розжарювання, диск Максвелла, колекторний двигун, ЛАТР, частотомір, набір кольорових дисків, транспортир.

Теоретична частина.

В повсякденному житті слово „колір”, як правило, описує певне відчуття. В колориметрії колір – чітко визначена величина, яка характеризує колірний стимул. Колірний стимул – потік випромінювання, що викликає відчуття певного кольору.

Колір – об'єктивна фізична величина. Значення трьох координат кольору можуть бути однозначно обчислені за відомим розподілом спектральної густини потужності в колірному стимулі з використанням функцій змішування стандартного колориметричного спостерігача МКО (про це детальніше на стор.15). За відповідними формулами колір може бути обчислений незалежно від будь-яких візуальних спостережень, отже, на отримані результати не будуть впливати індивідуальні особливості спостерігача.

Не викликає сумніву, що один і той самий колір може викликати в різних умовах цілком різні відчуття. Це не спростовує твердження про колір, як про об'єктивну фізичну величину, а лише підкреслює, що колір і відчуття кольору – різні поняття, які не варто плутати одне з одним.

Дія на органи зору випромінювань видимого діапазону веде до виникнення колірних відчуттів. Ці відчуття можуть відрізнятися як кількісно, так і якісно. Їх кількісна характеристика отримала назву світлота (яскравість), а якісна – колірність. При зміні потужності колірного стимула змінюється його світлота (яскравість), а при зміні спектрального складу – колірність.

Існують два типи сприйняття кольору, які відповідають кольорам випромінювань (джерел випромінювання) та кольорам предметів. При сприйнятті кольору першого типу суб'єктивне відчуття яскравості знаходиться в межах від темного до сліпуче яскравого. Другий тип характеризується відчуттям світлоти, яка змінюється в межах від чорного до білого.

Колірність об'єднує такі дві характеристики, як колірний тон та насиченість.

Колірний тон – характеристика колірного стимула, яка описується в термінах: червоний, зелений, синій і т.д. Існує однозначна відповідність між колірним тоном та довжиною хвилі монохроматичного колірного стимула.

<i>Діапазон, нм</i>	<i>Колірний тон</i>
380 – 470	фіолетовий та синій
470 – 500	синьо-зелений
500 – 560	зелений
560 – 590	жовтий та жовтогарячий
590 – 760	червоний

Вияток становлять так звані пурпурові колірні тони, які не являються спектральними, а отримуються шляхом змішування червоного та синього колірних стимулів.

Насиченість характеризує ступінь ”розбавлення” колірного тону білим колірним стимулом. Найбільша насиченість у монохроматичного колірного стимула, найменша – у ахроматичного стимула. Наприклад, суміш червоного та білого колірних стимулів дає рожевий стимул. Його колірний тон співпадатиме з колірним тоном червоного, але насиченість рожевого буде менша за насиченість червоного.

Ахроматичні колірні стимули – стимули, які не мають певного колірного тону. Їм відповідають так звані сірі кольори: від чорного до білого.

Таким чином суб'єктивне сприйняття кольору може розглядатись в межах наступної схеми:

Колір	–	світлота (яскравість)		
	–	колірність	–	колірний тон
			–	насиченість

З повсякденного досвіду відомо, що при змішуванні світлових пучків двох різних кольорів виникає пучок нового кольору. Суміш фарб, або кольорових рідин також матиме колір, який відрізняється від кольору кожної з компонент. Явище отримання нового кольору внаслідок змішування випромінювань або середовищ, наприклад фарб, отримало назву змішування кольорів.

Розрізняють два типи змішування:

1. Адитивне (лат. additio – додаю) – змішування випромінювань;
2. Субтрактивне (лат. subtrahere – віднімаю, вилучаю) – змішування середовищ.

Назви пов'язані з тим, що при змішуванні випромінювань їх потоки додаються, а при змішуванні середовищ кожна компонента суміші поглинає випромінювання певної ділянки довжин хвиль, тобто, вилучає це випромінювання з світлового потоку, який освітлює суміш. Обидва типи змішування знаходять найширше застосування, наприклад: адитивне – в телебаченні та світлотехніці; субтрактивне – в живописі та поліграфії.

Дані значної кількості експериментів по змішуванню колірних стимулів були зведені Грасманом в три закони [1]:

1. Око може реєструвати лише три типи незалежних варіацій кольору (наприклад: яскравість, колірний тон, насиченість).
2. Якщо в суміші трьох колірних стимулів один неперервно змінюється, в той час, як два інші залишаються незмінними, то колір суміші також змінюється неперервно.
3. Змішування довільного колірного стимула зі стимулами однакового кольору дає ідентичні по кольору результати незалежно від спектрального складу випромінювань, які породжують ці стимули.

Останній закон Грасмана лежить в основі всієї сучасної колориметрії, оскільки дозволяє при обчисленні кольору суміші оперувати лише з кольорами відповідних стимулів, не розглядаючи їхній спектральний склад.

Колірний простір.

На основі двох перших законів Грасмана колір можна представити точкою в тривимірному просторі. Кожному кольору такого колірного простору відповідає деяка точка, а кожній точці – певний колір.

Колірний простір – зручна форма геометричного представлення, яка дозволяє впорядкувати і систематизувати всю сукупність кольорів. Для впорядкування та для можливості виконання математичних операцій над кольорами в колірному просторі вводиться колірна координатна система.

В колірному просторі можна ввести безліч координатних систем. Початком координат у всіх цих системах зазвичай є точка, яка представляє чорний колір, якому відповідає відсутність світла. В цій точці розташовують початок координат. Колірна координатна система повністю визначена, якщо задані три координатні осі та масштаби на них. Цього можна досягти задавши три основні (опорні) кольори, які визначатимуть три орти координатних осей. Хоча їхнє взаємне розташування задається довільно, єдина вимога – щоб ці орти були некомпланарні. Це означатиме, що жоден з опорних стимулів не може бути отриманий як суміш двох інших.

Як правило, колірну систему не визначають основними кольорами. Найчастіше задають лише напрямки координатних осей в колірному просторі. Масштаби на осях

встановлюють опосередковано, задаючи четвертий колір, який ми будемо називати базисним. Цей колір отримується при змішуванні трьох основних кольорів з одиничними кількостями. Задання лише напрямку прямої з початку координат, на якій лежить базисний колір, встановлює лише відносні масштаби на осях. В багатьох випадках це виявляється достатнім.

Слід зауважити, що координати одного і того ж кольору в різних колірних системах координат будуть відрізнятись. Але, співвідношення між кольорами, які мають за свою основу закони змішування, при цьому не зміняться.

Назвемо координатами кольору три числа, які для реальних кольорів відповідають потужностям трьох опорних кольорів в суміші, яка візуально урівнює цей колір. Представити колір в колірному просторі можна як точкою, так і вектором, який проведений в цю точку з початку координат. При цьому координати кольору є координатами колірного вектора.

В подальшому позначатимемо колірний простір трьома великими літерами, які є початковими літерами назв трьох опорних кольорів. Наприклад, *СМУ*. Цими ж літерами позначатимемо координати кольору. Одиничні кількості опорних стимулів позначатимемо \vec{e}_i , де i – початкова літера опорного кольору.

$$\vec{e}_C (1,0,0) \Leftrightarrow C = 1; M = 0; Y = 0$$

$$\vec{e}_M (0,1,0) \Leftrightarrow C = 0; M = 1; Y = 0$$

$$\vec{e}_Y (0,0,1) \Leftrightarrow C = 0; M = 0; Y = 1$$

$$\vec{e}_{\text{баз}} (1,1,1) \Leftrightarrow C = 1; M = 1; Y = 1$$

В обраній системі координат будь-якому кольору відповідає вектор:

$$\vec{S} = C \cdot \vec{e}_C + M \cdot \vec{e}_M + Y \cdot \vec{e}_Y$$

де C , M , Y визначають кількості опорних стимулів в суміші і являються проекціями вектора \vec{S} на відповідні координатні вісі. Таким чином, суміш будь-якої кількості колірних стимулів може бути представлена у вигляді суми векторів, а результат додавання визначатиме колір суміші.

Розглянемо яку область простору займають точки реальних кольорів.

1. Поверхня, яка обмежує в колірному просторі область реальних кольорів має бути або опуклою, або плоскою. Інакше, при змішуванні реальних кольорів можна було б отримати нереальні, а це неможливо.
2. Будь-який колірний стимул з складним спектральним складом можна представити як суміш монохроматичних компонент. Монохроматичні компоненти є елементарними кольорами, які не можуть бути розкладені на більш елементарні. Отже, поверхня спектральних кольорів співпадає з частиною граничної поверхні області реальних кольорів.
3. Оскільки кольори, які відповідають краям видимого спектра неоднакові, то поверхня спектральних кольорів незамкнена. Ділянка граничної поверхні, якої не достає, утворюється площиною пурпурних кольорів.
4. Область реальних кольорів поступово сходиться в початок координат – точку чорного кольору.

Частина області реальних колірних стимулів, яка містить в собі точки кольорів несамосвітніх предметів отримала назву колірного тіла. Оскільки коефіцієнт відбивання несамосвітніх об'єктів не перевищує одиницю, то колірне тіло знаходиться всередині конуса реальних колірних стимулів і визначається джерелом освітлення.

Диск Максвелла.

Один із способів одержання суміші кольорів полягає в швидкому чергуванні колірних стимулів. Якщо зміна одного колірного стимулу іншим відбувається досить швидко, кольори окремих стимулів взагалі не сприймаються; не сприймається навіть мерехтіння,

що супроводжує таку зміну. Утворюється стійкий однорідний колір, що відрізняється від кольору кожного з обох використовуваних стимулів.

Проаналізуємо, що відбувається з групою колбочок сітківки, що сприймають таке змінне збудження. Кожній колбочці необхідна лише доля секунди, щоб відреагувати на будь-який стимул. Але якщо частота зміни стимулів досить велика, протягом цієї долі секунди колбочка приймає дію багатьох короточасних імпульсів потоку випромінювання, що відповідають різним стимулам. Вона буде не в змозі реагувати на подібний пульсуючий стимул інакше, чим на однорідний стимул з тим же самим середнім спектральним розподілом потоку випромінювання для кожної частини спектра. Тому співвідношення буде наступним: колір суміші по чергово змінюючих один одного двох стимулів дорівнює кольору їх середнього за часом, причому усереднення відбувається так, що внесок кожного із стимулів пропорційний часу його впливу. Око побачить колір, що відповідає однорідному в часі розподілу суми двох потоків випромінювання.

Отже ми можемо записати наступне правило змішування кольорів у часі. Якщо колірні координати першого стимулу C_1, M_1, Y_1 , а координати другого стимулу в тій же системі основних кольорів— C_2, M_2, Y_2 , то координати кольору C, M, Y , отриманого в результаті описаного змішування, будуть виражатися як

$$C = \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2$$

$$M = \alpha_1 M_1 + \alpha_2 M_2$$

$$Y = \alpha_1 Y_1 + \alpha_2 Y_2$$

де α_1 — частка повного часу впливу обох стимулів, протягом якого на сітківку впливає тільки перший стимул, а α_2 — частка цього ж проміжку, протягом якої впливає тільки другий стимул. Змішування при швидкій зміні стимулів називають змішуванням шляхом усереднення. Найпростіший спосіб зрівняти невідомий колір за допомогою усереднення кольорів у часі полягає у використанні обертового диска, розділеного на сектори різного кольору.

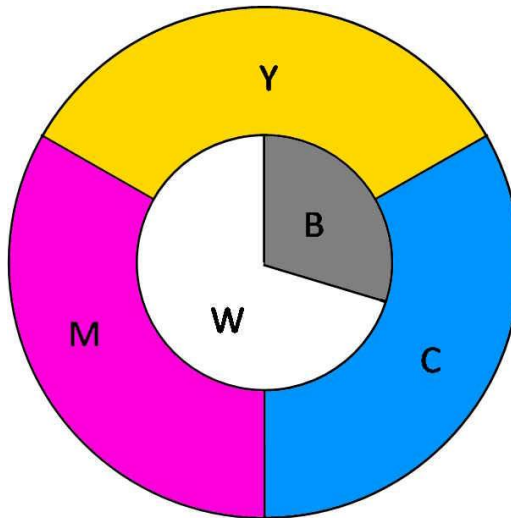


Рис.1.1. Схема диска Максвелла.

Такий диск (рис.1.1) відомий як диск Максвелла; він названий так на честь значного внеску, зробленого Максвелом при дослідженні проблем кольору з застосуванням цього диска. Кольорові круги виготовляються із аркушів звичайного кольорового паперу різних кольорів. Круги виготовляють двох різних діаметрів. Великі круги відіграють роль основних кольорів. Диск з досліджуваним кольором вирізають меншим і поміщають в центр, зверху великих кругів.

Побудова колірного простору.

Оберемо опорними деякі кольори C, M, Y (наприклад синій, пурпурний та жовтий) і побудуємо на їх основі тривимірний колірний простір. Для цього:

1. Оберемо за початок координат точку чорного кольору B .

- З точки В (рис.1.2.) проведемо некомпланарні вектори $\vec{e}_C(1,0,0)$, $\vec{e}_M(0,1,0)$, $\vec{e}_Y(0,0,1)$, що відповідають опорним кольорам С, М, Y.
- Знаходимо всередині трикутника СМУ ахроматичну точку А. Для цього проводимо допоміжний експеримент підбираючи такі розміри секторів α_C , α_M , α_Y , які відповідають опорним кольорам С, М, Y, щоб їх суміш давала ахроматичний колір. Під розміром сектора надалі будемо розуміти відношення його кутового розміру до кутового розміру 2π всього поля. Зрозуміло, що при наявності трьох опорних кольорів $\alpha_C + \alpha_M + \alpha_Y = 1$. Координати ахроматичного кольору \vec{A} будуть $C_A = \alpha_C$, $M_A = \alpha_M$, $Y_A = \alpha_Y$. Тобто, $\vec{A} = C_A \vec{e}_C + M_A \vec{e}_M + Y_A \vec{e}_Y$.
- Знаходимо координати точки білого кольору W. Для цього розташовуємо всередині диску чорний та білий сектори і підбираємо їх розміри так, щоб отримана суміш співпала з ахроматичним кольором А. Якщо розмір білого сектора β_W , а чорного β_B ($\beta_W + \beta_B = 1$), то координати білого кольору знаходимо з рівняння:

$$C_W = \frac{1}{\alpha_W} C_A$$

$$\alpha_W \vec{W} + \alpha_B \vec{B} = \vec{A}, \text{ звідки } M_W = \frac{1}{\alpha_W} M_A$$

$$\alpha_W \vec{W} + \alpha_B \vec{0} = \vec{A}$$

$$Y_W = \frac{1}{\alpha_W} Y_A$$

На цьому побудову колірного простору можна вважати завершеною. В результаті, будь-якому кольору \vec{S} можна однозначно поставити у відповідність трійку чисел S_C, S_M, S_Y , які визначатимуть його положення в колірному просторі

$$\vec{S} = S_C \vec{e}_C + S_M \vec{e}_M + S_Y \vec{e}_Y$$

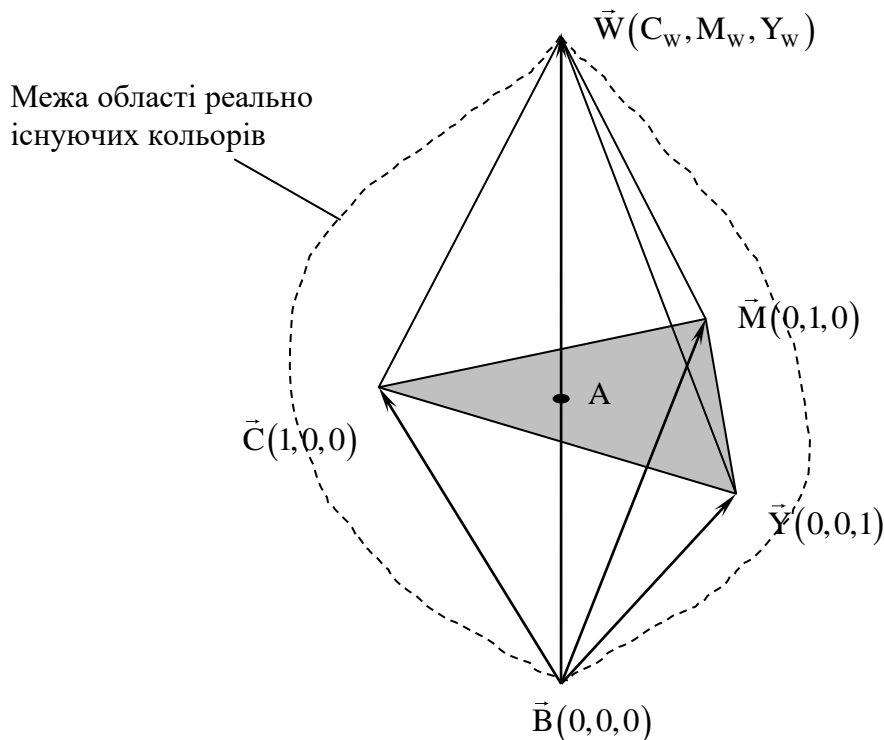


Рис. 1.2.

Визначення координат кольору.

Розташуємо три опорні кольори \vec{C} , \vec{M} , \vec{Y} на зовнішній частині диску, а досліджуваний колір \vec{S} у внутрішній частині. Обираючи розміри секторів опорних кольорів як $\alpha_C, \alpha_M, \alpha_Y$ ($\alpha_C + \alpha_M + \alpha_Y = 1$) ми можемо отримати лише кольори з координатами $\vec{S} = \alpha_C \vec{e}_C + \alpha_M \vec{e}_M + \alpha_Y \vec{e}_Y$, яким відповідають точки, що знаходяться всередині трикутника СМУ (Рис.1.2.).

Існує можливість збільшити кількість кольорів, які відтворюються шляхом змішування. Цього можна досягти доповнивши набір опорних кольорів ахроматичним кольором. Дійсно, нехай на зовнішній частині диску розташовуються кольори \vec{C} , \vec{M} , \vec{Y} та, наприклад чорний колір \vec{B} , які займають сектори $\alpha_C, \alpha_M, \alpha_Y$ та α_B відповідно. Враховуючи, що $\alpha_C + \alpha_M + \alpha_Y + \alpha_B = 1$, шляхом змішування ми можемо відтворити кольори, які лежать всередині області ВСМУ. Аналогічно, обравши четвертим кольором білий, ми здатні відтворити кольори з області WCMY.

Кольори, які лежать в області WCMYB визначають колірне охоплення системи СМУ. Область реально існуючих кольорів більша за колірне охоплення, тому певна частина кольорів *завжди* буде знаходитись за його межами. Приймаючи до уваги цей факт, встановимо процедуру визначення координат для довільного кольору.

Основна ідея визначення кольору полягатиме в тому, щоб створити таку суміш досліджуваного кольору та деякого ахроматичного, колір якої можна відтворити змішуючи три опорні кольори. Тобто, поставити у відповідність суміші досліджуваного та ахроматичного кольорів точку з трикутника СМУ.

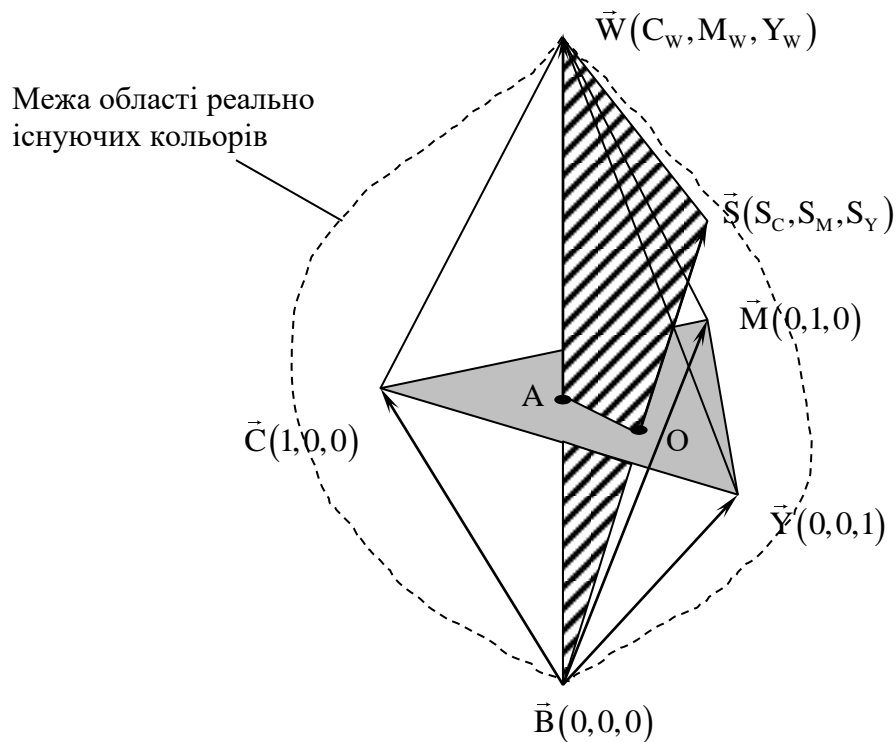


Рис. 1.3.

Нехай досліджуваний колір \vec{S} (Рис.1.3.) визначається координатами (S_C, S_M, S_Y) і займає в центральній частині диску сектор розміром β_S . Іншу частину диску займають

сектори білого та чорного кольорів розмірами β_w, β_B . Зрозуміло, що $\beta_s + \beta_w + \beta_B = 1$. Змінюючи співвідношення β_w, β_B та β_s ми можемо отримати колір суміші в межах трикутника WSB. Перетин трикутників СМУ та WSB – відрізок ОА. Кожній точці відрізка ОА відповідає колір, який можна отримати як змішуючи опорні кольори, так і кольори $\vec{S}, \vec{W}, \vec{B}$.

Таким чином задача по визначенню координат кольору \vec{S} може бути сформульована наступним чином: чому дорівнюють координати S_C, S_M, S_Y б якщо колір суміші кольорів $\vec{S}, \vec{W}, \vec{B}$ з секторами $\beta_s, \beta_B, \beta_w$ співпадає з кольором суміші опорних кольорів $\vec{C}, \vec{M}, \vec{Y}$ з секторами $\alpha_C, \alpha_M, \alpha_Y$?

Вказане співпадіння записується у вигляді рівняння:

$$\alpha_C \vec{e}_C + \alpha_M \vec{e}_M + \alpha_Y \vec{e}_Y = \beta_s \vec{S} + \beta_w \vec{W}$$

$$\alpha_C \vec{e}_C + \alpha_M \vec{e}_M + \alpha_Y \vec{e}_Y = \beta_s \vec{S} + \beta_w (C_w \vec{e}_C + M_w \vec{e}_M + Y_w \vec{e}_Y)$$

Звідки

$$S_C = \frac{1}{\beta_s} (\alpha_C - \beta_w C_w); \quad S_M = \frac{1}{\beta_s} (\alpha_M - \beta_w M_w); \quad S_Y = \frac{1}{\beta_s} (\alpha_Y - \beta_w Y_w)$$

Для кольорів з колірним охоплення всі координати будуть додатними. Кольори, які знаходяться поза колірним охопленням будуть мати принаймні одну від'ємну координату.

Експериментальна частина.

Установка для адитивного синтезу кольорів зображена на рис. 1.4., рис. 1.5. Основним елементом установки є металевий диск діаметром 30 см, який закріплений на осі колекторного двигуна. Напруга на електромотор подається через ЛАТР, що дає можливість легко змінювати частоту обертання диска. Для вимірювання цієї частоти на корпусі установки за диском знаходиться оптопара, блок живлення (БЖ+15-15) та формувач. Сигнал з формувача надходить безпосередньо на частотомір.

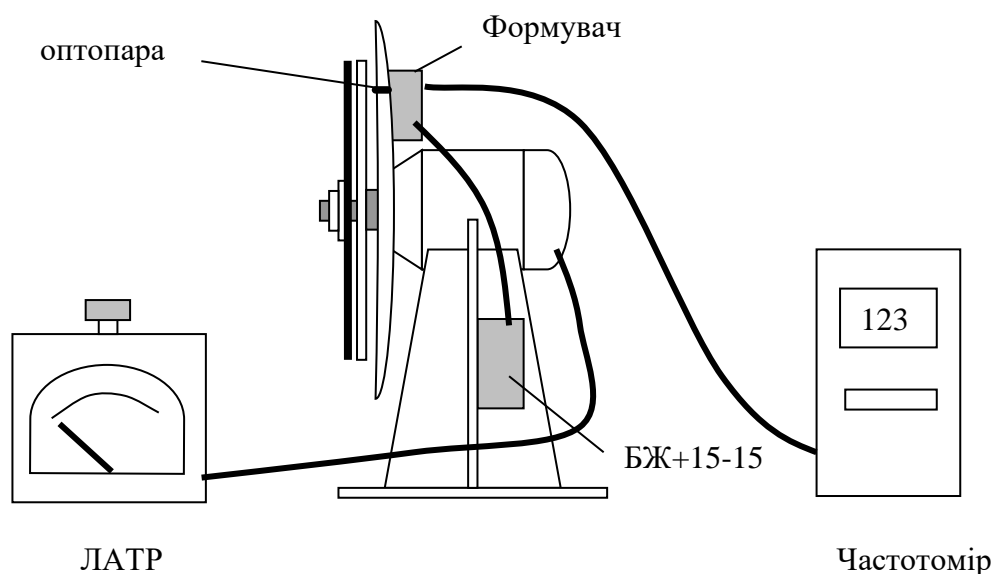


Рис.1.4.

Вісь електромотора проходить через центр диска і виступає над його поверхнею на декілька сантиметрів. На цю виступаючу частину осі надіваються паперові круги, які являються вимірювальними зразками. Круги притискаються до опорного диска за допомогою шайби і гайки.

Всі паперові круги мають в центрі отвір діаметром, що точно відповідає діаметру осі мотора, і крім того мають радіальний розріз від центра до самого краю. Завдяки цим розрізам круги вільно вставляються один в одний (рис.1.5). Насадивши ці круги на вісь мотора ми можемо вільно змінювати розмір кожного з секторів.

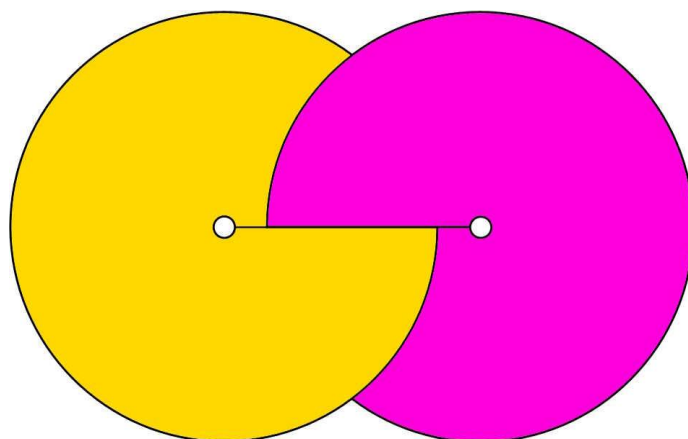


Рис.1.5 Схема поєднання паперових кругів.

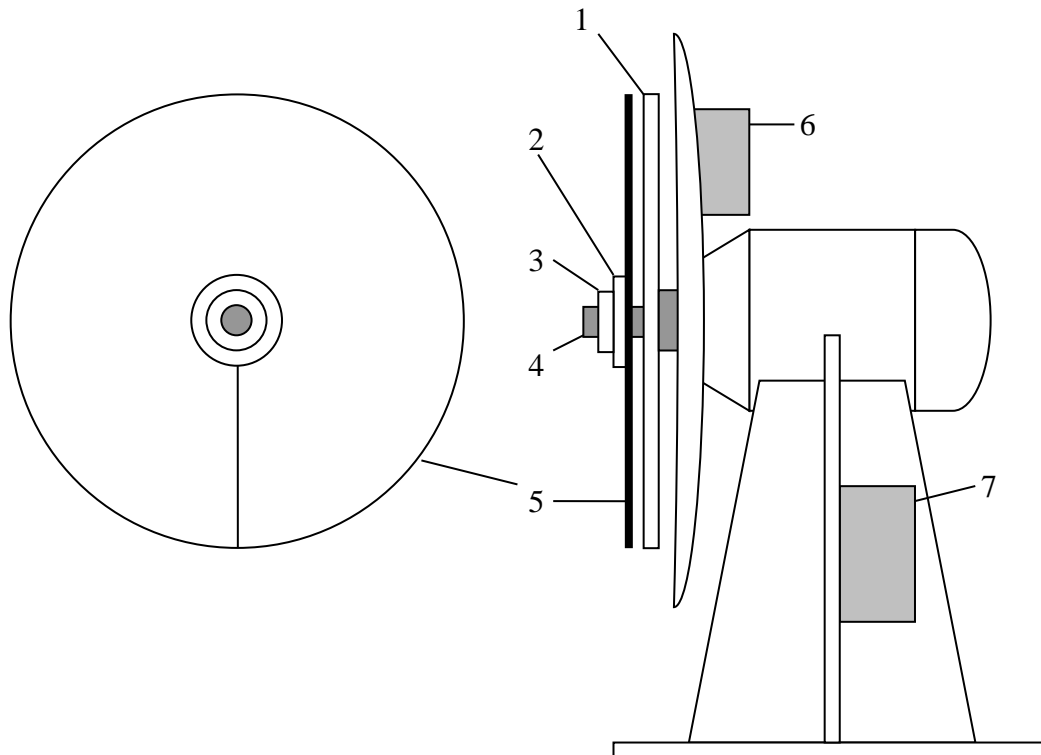


Рис.1.6 Схема установки: 1 – опорний диск; 2 – шайба; 3 – гайка; 4 – вісь електромотора; 5 – паперові круги; 6 – формувач; 7 – блок живлення.

Завдання:

1. Ввімкнути джерело освітлення. Поєднати та закріпити на осі електромотора паперові круги синього, пурпурного та жовтого опорних кольорів діаметрами 30см. Прослідкувати, щоб накладання проводилось в напрямку обертання дисків з метою уникнення їх деформації та розриву під час роботи. Кутові розміри всіх трьох секторів обрати приблизно однаковими. За допомогою шайби та гайки притиснути всі диски до металевої основи. Поступово змінюючи напругу живлення електромотору досягти моменту зникнення мерехтіння та виникнення однотонного забарвлення по всьому полю. Відмітити частоту обертання при якій це відбулося. Повторити дослід 3-5 разів. За отриманими результатами оцінити інерційність людського ока. Підібравши α_C , α_M , α_Y , визначити координати ахроматичної точки А.
2. Закріпити на осі диск досліджуваного кольору діаметром 15см. Підібрати такі кутові розміри опорних кольорів таким чином, щоб забарвлення внутрішньої та зовнішньої частин співпадали. Кутові розміри секторів визначати за допомогою транспортира. При значній відмінності кольорів у внутрішній та зовнішній областях за світлотою досягти урівнювання додатковим введенням у центральну область білого, або чорного секторів. Для якісного прогнозування очікуваного кольору суміші використовувати діаграму колірності МКО. Всі результати вимірів заносити в таблицю.

№	Кутові розміри секторів в опорному полі			Кутові розміри секторів в полі зразка			Візуальні відмінності між полем зразка та опорним за:		Наступні дії
	синій	пурпурний	жовтий	зразок	чорний	білий	світлотою	тоном	
1									
...									

3. Повторити урівнювання для двох інших зразків кольору. За отриманими результатами визначити координати кольору досліджуваних зразків в системі опорних кольорів.

Контрольні питання.

1. Які існують закони змішування кольорів?
2. Що називають колірним охопленням?
3. Які особливості в системі СМУ(К)?
4. В чому полягає принцип дії візуальних колориметрів?

Література:

1. Deane B. Judd, Günter Wyszecki. Color in Business, Science, and Industry. – Wiley, 1975.
2. Noboru Ohta, Alan R. Robertson. Colorimetry: Fundamentals and Applications – Wiley, 2005.
3. R. W. G. Hunt, M. R. Pointer. Measuring Colour – Wiley, 2011.

Лабораторна робота №2

Визначення кольору за результатами спектрофотометричних досліджень.

Мета роботи: виміряти спектральні коефіцієнти пропускання та відбивання зразків; за отриманими результатами розрахувати колірні координати об'єктів; порівняти отримані результати з даними візуального урівнювання.

Обладнання: спектрофотометр СФ-14, еталонні білі зразки, прозорі та непрозорі кольорові об'єкти.

Теоретична частина.

Як відомо, колірний стимул однозначно характеризується спектральним розподілом його енергії в діапазоні хвиль видимого випромінювання. Задася питанням як визначити координати кольору по відомому розподілу енергії в спектрі колірного стимула.

Проведемо допоміжний експеримент, який полягає в колірному зрівнюванні монохроматичних колірних стимулів однакових енергетичних яскравостей сумішшю опорних колірних стимулів \bar{C} , \bar{Z} , \bar{C} . Як вже відзначалось, одиничні кількості опорних стимулів $\bar{e}_r, \bar{e}_g, \bar{e}_b$ обираються так, щоб їхня суміш мала ахроматичний колір. В нашому експерименті оберемо за ахроматичний – колір рівноенергетичного стимула.

Рівноенергетичний стимул – адитивна суміш всіх монохроматичних стимулів видимого діапазону, в якій кожен стимул має одну і ту ж енергетичну яскравість.

За монохроматичний колірний стимул оберемо потік випромінювання в дуже вузькому інтервалі довжин хвиль $\Delta\lambda$ видимого діапазона. Центр інтервалу (центральну довжину хвилі) позначимо просто λ . Типові значення $\Delta\lambda$ становлять 1нм, 5нм та 10нм. Вважатимемо, що енергетична яскравість кожного монохроматичного стимулу дорівнює одиниці. Тоді, урівнюючи монохроматичний тест-стимул сумішшю опорних колірних стимулів, ми отримаємо координати кольору кожного з цих тест-стимулів. Для кожного тест-стимула на довжині хвилі λ_i позначимо ці координати через $\bar{r}(\lambda_i)$, $\bar{g}(\lambda_i)$, $\bar{b}(\lambda_i)$. Ці координати називають питомими. Як правило, вони задаються у вигляді таблиць, або графічно у вигляді трьох кривих, які вказують відповідну залежність від довжини хвилі. Ці залежності носять назву функцій змішування або кривих змішування даної колірної системи. Згідно з міжнародною номенклатурою функції змішування позначаються у вигляді маленьких літер з рисками зверху: $\bar{r}(\lambda_i)$, $\bar{g}(\lambda_i)$, $\bar{b}(\lambda_i)$, де літери відповідають позначенням опорних стимулів.

Таким чином, колір монохроматичного тест-стимула може бути записаний у вигляді:

$$\vec{S}_0(\lambda_i) = \bar{r}(\lambda_i) \cdot \bar{e}_r + \bar{g}(\lambda_i) \cdot \bar{e}_g + \bar{b}(\lambda_i) \cdot \bar{e}_b$$

Колірний стимул з довільним спектральним розподілом енергії може бути представлений як суміш відповідних монохроматичних стимулів $B_\lambda(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda$. Тоді, колір кожного з цих монохроматичних стимулів запишеться як: $\vec{S}(\lambda_i) = B_\lambda(\lambda_i) \cdot \vec{S}_0(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda$, а колір суміші всіх монохроматичних стимулів:

$$\vec{S} = \sum_i \vec{S}(\lambda_i) = \sum_i B_\lambda(\lambda_i) \cdot \vec{S}_0(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda = \left(\sum_i B_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{r}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \right) \cdot \bar{e}_r + \left(\sum_i B_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{g}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \right) \cdot \bar{e}_g + \left(\sum_i B_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{b}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \right) \cdot \bar{e}_b$$

Отже, координати кольору цього стимулу можуть бути записані у вигляді:

$$\begin{aligned}
Y &= \sum_i B_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \\
Z &= \sum_i B_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \\
C &= \sum_i B_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{c}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda
\end{aligned}$$

Зменшуючи інтервал $\Delta\lambda$, перейдемо від сум до інтегралів:

$$\begin{aligned}
Y &= \int_{\lambda} B_\lambda(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \\
Z &= \int_{\lambda} B_\lambda(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \\
C &= \int_{\lambda} B_\lambda(\lambda) \cdot \bar{c}(\lambda) \cdot d\lambda
\end{aligned}$$

Внаслідок незначних індивідуальних відмінностей в сприйнятті кольору, результати колірного урівнювання, виконані особами з нормальним колірним зором будуть відрізнятися між собою. Таким чином, функції змішування, отримані цими особами також будуть відрізнятися. В той же час, для обраної колірної системи доцільно ввести один єдиний набір функцій змішування. Ці функції можна ввести, усереднивши результати, які були отримані різними спостерігачами. Усереднені значення будуть визначати деякого стандартного спостерігача.

Введення функцій змішування для стандартного спостерігача надає можливість вважати координати кольору (колір) фізичними величинами. Прецедентом для такого рішення є процедура введення світлових величин, які вважаються фізичними. Зв'язок між світловими та енергетичними фотометричними величинами задається через функцію видності – результат усереднення даних спостереження, які були отримані різними спостерігачами.

Для визначення координат кольору об'єкта нам необхідно знати спектральні характеристики колірного стимулу, який був породжений ним та відповідні функції змішування.

Колірний стимул об'єктів, які світять власним світлом визначається розподілом енергії в спектрі його випромінювання. Для об'єктів, які не світяться самі, колірний стимул визначається розподілом енергії в спектрі джерела, яке освітлює об'єкт та деякою функцією що визначає кількість відбитого або пропущеного об'єктом світла для кожної з довжин хвиль видимого діапазону. Відповідно до цього, основні колориметричні стандарти відносяться до:

1. Джерел випромінювання.
2. Методики вимірювання спектральних коефіцієнтів пропускання (відбивання) об'єктів.
3. Функцій змішування, які відповідають спостерігачам з нормальним колірним зором.

Основні стандарти встановлювались Міжнародною комісією по освітленню на протязі 40 років. Ці стандарти становлять основу так званого метода класифікації кольору МКО, який отримав міжнародне визнання як в науці, так і в промисловості.

Раніше було відзначено, що для створення тріади опорних колірних стимулів необхідно і достатньо, щоб жоден із них не міг бути отриманий як суміш двох інших. Серед усіх тріад, які задовольняють цій основній вимозі доцільно обрати ту, колірне охоплення якої більше. Зрозуміло, що це дозволить спростити як установку, так і саму процедуру по колірному урівнюванню. Масштаби ортів, які відповідають опорним колірним стимулам можуть бути обрані довільно. З тих самих міркувань зручності, вибір було зупинено на ахроматичному базисному стимулі, якому відповідає рівноенергетичний колірний стимул. Тобто, при змішуванні опорних колірних стимулів в одиничних кількостях колірний тон суміші має співпадати з колірним тоном базисного стимулу. Відмітимо, що при вказаному виборі одиничних кількостей опорних стимулів однозначної відповідності між цими

кількостями та абсолютними фотометричними величинами, які їм відповідають не існує. Більш детально це буде розглянуто при обговоренні особливостей системи XYZ.

Система RGB.

В 1931 році МКО прийняла рішення обрати опорними колірними стимулами червоний (R), зелений (G) та синій (B) монохроматичні колірні стимули [1], яким відповідають довжини хвиль $\lambda_R = 700,0\text{nm}$; $\lambda_G = 546,1\text{nm}$; $\lambda_B = 435,8\text{nm}$. Вибір λ_i зумовлений тим, що λ_R легко виділяється за допомогою "крутого" червоного фільтру із спектру звичайної лампи розжарювання; λ_G – лінія *e* в спектрі ртуті; λ_B – лінія *g* в тому ж спектрі ртуті. Обравши за базисний рівноенергетичний колірний стимул, було отримано співвідношення між яскравостями опорних колірних стимулів: $B_R:B_G:B_B=1:4,5907:0,0601$, або між їхніми енергетичними яскравостями: $72,0962:1,3791:1$.

Основою для введення функцій змішування стали результати отримані Гілдом та Райтом при колірному урівнюванні полів в 2° . В роботі Гілда представлені результати колірного урівнювання сімома спостерігачами. Опорні колірні стимули – монохроматичні випромінювання з довжинами хвиль 650, 530 та 460nm. В роботі Райта кількість спостерігачів дорівнювала десяти, а опорні колірні стимули отримувались шляхом вирізання трьох спектральних ділянок із суцільного спектра випромінювання за допомогою відповідних світлофільтрів. Результати Гілда і Райта були приведені до системи з опорними колірними стимулами R, G і B. Відповідні функції змішування $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ (Рис. 2.1). Три опорні стимули R, G і B визначають так звану колориметричну систему RGB, яка відповідає стандартному колориметричному спостерігачу МКО 1931р. (функції змішування $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ для полів зору в 2°).

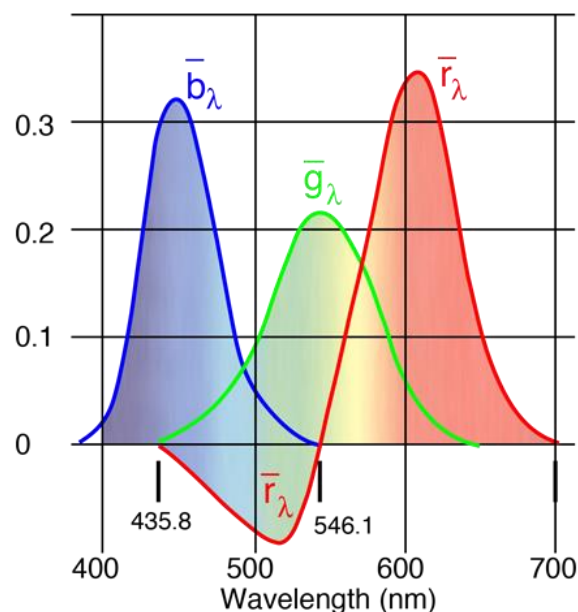


Рис.2.1. Функції змішування системи RGB CIE 1931

З моменту введення стандартного колориметричного спостерігача МКО 1931р. Було зафіксовано лише декілька випадків розходження результатів очікуваних на основі цих даних з результатами фактичного спостереження. Причиною цього вважали занижені значення функцій змішування $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ в діапазоні 380-460nm внаслідок використання при їх розрахунку функції видності $V(\lambda)$ МКО 1924р. В 50-х роках функції видності були визначені заново без притягнення функції $V(\lambda)$, вимірюючи відносні потоки випромінювання спектральних стимулів при куті зору 10° . Відповідні експерименти були виконані Стайлсом і Берчем, а також Сперанською. Отримані результати визначили

систему $R_{10}G_{10}B_{10}$. Опорними являються монохроматичні колірні стимули з довжинами хвиль 645,2, 526,3 та 444,4нм; базисним – рівноенергетичний стимул.

Незважаючи на свою наочність система RGB рідко використовується в колориметрії. В межах колірного охоплення знаходиться трохи більше, ніж 30% всіх існуючих колірностей. Це веде до появи від'ємних координат кольору, які суттєво ускладнюють деякі колориметричні розрахунки. Для усунення цього недоліку МКО запропонувала колориметричну систему XYZ.

Система XYZ.

Неможливість побудови колірної системи з трьома реальними опорними колірними стимулами можна пояснити простою закономірністю: при змішуванні кольорів насиченість суміші, як правило, менша за насиченість кольорів, які цю суміш створюють. Навіть обравши опорними спектрально чисті колірні стимули ми не зможемо відтворити всі кольори.

Вихід полягає у виборі опорних стимулів більш насиченими, ніж спектральні. Переваги такого вибору полягають в охопленні всієї області реальних кольорів і як наслідок – у можливості задати будь-який реальний колір за допомогою додатних координат кольору і колірності. Основний недолік – це неможливість відтворення опорних колірних стимулів на практиці, а отже і побудови на їхній основі візуального колориметра.

Задовольнити вимогу охоплення всієї області реальних кольорів шляхом вибору трьох опорних колірних стимулів можна безліччю способами. Виникає питання: який набір трьох опорних стимулів обрати? Зрозуміло, що свободу вибору необхідно доцільно використати, керуючись міркуваннями зручності нової системи при використанні. Розглянемо ці додаткові умови більш детально.

Першою вимогою стало збереження незмінним базисного стимулу, який обирався як ахроматичний рівно енергетичний колірний стимул. Колір цього стимулу відтворюється сумішшю трьох опорних колірних стимулів в рівних кількостях.

Друга вимога полягає в узгодженні яскравісних коефіцієнтів опорних стимулів. В системі RGB ці коефіцієнти суттєво відрізнялись. В новій системі можна було б покласти всі ці коефіцієнти рівними, однак було прийняте інше рішення. Запропонували, щоб вся яскравість колірного стимулу визначалась яскравістю одного з трьох опорних стимулів, в той час як яскравість двох інших була рівна нулю. Опорні стимули нової системи отримали назви X, Y та Z, для цих опорних стимулів

$$L_x : L_y : L_z = 0 : 1 : 0$$

Яскравість колірного стимулу в новій системі повністю визначається координатою Y.

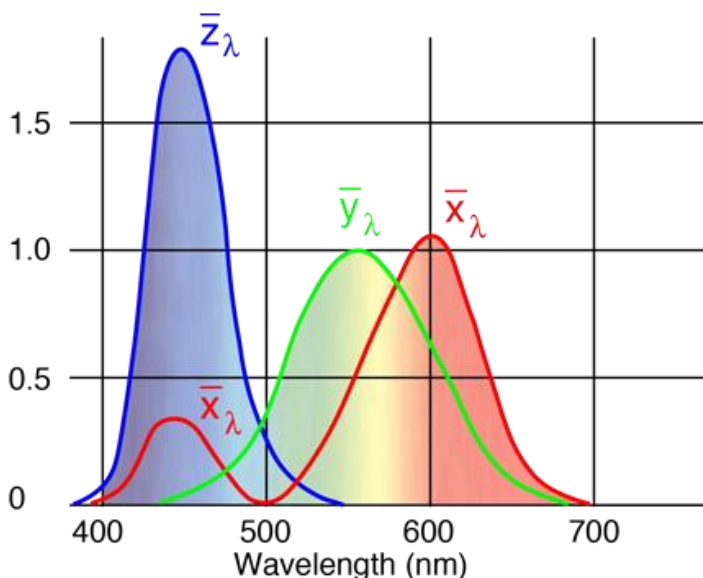


Рис.2.2. Функції змішування системи XYZ CIE 1931

Обчислення координат кольору в системі XYZ.

Приймаючи до уваги, що визначення кольору, як правило, відбувається в умовах при яких виконується закон постійності колірного урівнювання, абсолютні значення яскравості не становлять інтересу. Так, при визначенні кольору несамоосвітнених об'єктів яскравість в більшості випадків не відіграє ніякої ролі і може бути замінена коефіцієнтом дифузного відбивання $\rho(\lambda)$.

Відповідно до цього в системі XYZ замість абсолютної яскравості вводиться деяка відносна величина. Так як в системі XYZ вся яскравість визначається координатою Y, нормування проводиться таким чином, щоб у випадку ідеального розсіювача ($\rho(\lambda) \equiv 1$) значення координати Y було тотожно рівне 100. Тоді формули для обчислення координат кольору в системі XYZ запишуться як:

$$X = k \int E(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int E(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int E(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

де $E(\lambda)$ – спектральна потужність випромінювання одного із стандартних джерел білого світла; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – функції змішування; $\rho(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт відбивання зразка.

Нормуючий множник: $k = 100 / \int E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$. Нормування робить неважливим в яких одиницях виражається спектральна потужність випромінювання: абсолютних чи відносних.

Аналогічно визначаються координати кольору для об'єктів, що пропускають світло. Всі формули зберігають свій вигляд після формальної заміни $\rho(\lambda)$ на $\tau(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання.

Експериментальна частина.

Конструкція та принцип дії спектрофотометра СФ-14

Спектрофотометр складається з освітлювача, подвійного призмового монохроматора, фотометра поляризаційного типу, приймально-підсилювальної частини і записуючого механізму.

Принцип дії приладу заснований на нульовому методі і полягає в наступному. Монохроматичний пучок світла поділяється призмою Рошона на два плоскополяризованих пучки. Один пучок діафрагмується, інший проходить через призму Воластона і знову поділяється на два пучки, поляризованих у взаємо-перпендикулярних площинах. Через те що на призму Воластона падає плоскополяризований пучок світла, інтенсивність пучків світла за призмою Воластона визначається кутовим положенням відносно неї призми Рошона. Далі пучки перекриваються барабаном переривача, що обертається таким чином, світловий потік у кожному пучку змінюється за формою трапеції і початку відкриття одного пучка відповідає початок закриття іншого. Конструкція барабана переривача і швидкість його обертання обрані таким чином, що світловий потік мінюється з частотою 50 Гц.

Світло, що пройшло через зразок порівняння і вимірюваний зразок, потрапляє в сферу і після багаторазового відбивання від стінок кулі освітлює фотоеlement, розташований за вікном кулі; вікно закрито молочним склом.

Освітленість фотоелемента в кожен момент часу визначається сумою потоків, що пройшли через зразок порівняння і вимірюваний зразок. Якщо світлові потоки рівні, освітленість фотоелемента буде постійна в будь-який момент часу і змінний сигнал на вході підсилювальної системи буде відсутній. При наявності поглинання зразком сумарний світловий потік на фотоелементі буде змінюватися з частотою 50 Гц і на вході підсилювача з'явиться сигнал такої ж частоти. Напруга сигналу підсилюється і подається на обмотку якоря електродвигуна, що за допомогою фотометричного кулачка повертає призму Рошона доти, поки не зникне сигнал на вході підсилювача, тобто поки не зникне різниця світлових потоків. Одночасно з поворотом призми відбувається переміщення пера, що фіксує на бланку пропускання зразка. Зміна довжини хвилі світла, що виходить з монохроматора, виконується шляхом переміщення вздовж спектра середньої щілини приладу. Переміщення щілини здійснюється від електродвигуна одночасно з поворотом барабана записуючого механізму. Таким чином, на бланку, закріпленому на барабані записуючого механізму, записується крива залежності коефіцієнта пропускання зразка від довжини хвилі.

Для виключення дзеркальної складової відбивання є кишені, які можна встановити в бічні отвори сфери замість верхніх заглушок. Всередині сфери мають два екрани, призначені для запобігання потрапляння світла від зразка безпосередньо на фотоелемент при вимірі абсолютних значенні коефіцієнтів дифузного відбивання і пропускання (по методу Тейлора). Верхній екран запобігає потраплянню світла на фотоелемент при вимірі коефіцієнтів пропускання світлорозсіюючих зразків, нижньому екрану запобігає потрапляння світла при вимірюванні коефіцієнтів відбивання від зразка.

Вимірювання абсолютних значень коефіцієнтів дифузного відбивання чи пропускання зводиться до наступного. Спочатку записується лінія стовідсоткового пропускання при нейтральному положенні екранів щодо світлових пучків. Потім на місце нижньої заглушки ставиться зразок. Екран ставлять у положення, при якому пряме світло від зразка не потрапляє на фотоелемент. Запис дає значення абсолютного коефіцієнта дифузного відбивання зразка по спектру.

При вимірюванні абсолютних значень коефіцієнтів дифузного пропускання зразок ставиться в праве по ходу променів вхідне вікно сфери, установлюється верхній екран, нижній екран при цьому повинний займати нейтральне положення щодо світлових пучків.

Перед вимірюванням коефіцієнтів пропускання і відбивання великих зразків необхідно повністю розкрити ірисову діафрагму. Ірисова діафрагма призначена для обмеження світлового пучка при вимірах коефіцієнтів дифузного відбивання зразків малих розмірів. Вона міститься в зиніці приладу, оптична система, що знаходиться за нею, переносить її зображення на зразок. Величина розкриття діафрагми визначається розмірами вимірюваного зразка і підбирається таким чином, щоб розміри світлового пучка, що падає на зразок, не виходили за межі зразка. За цим зручно спостерігати через бічні верхні вікна сфери. Розкриття діафрагми здійснюється від руки. Діафрагма дозволяє вимірювати коефіцієнти дифузного відбивання зразків розміром не менше 4 x 10 мм.

Оптична схема

Оптична система приладу складається з двох частин - спектральної (подвійного монохроматора) і фотометричної.

Нитка лампи 1 (Рис.2.3) зображується конденсором 2 через вхідну щілину 3 у площині об'єктива 4 коліматора. Вхідна щілина розташована у фокальній площині об'єктива. Паралельний пучок світла, що виходить з нього, проходить диспергуючу призму 5 і розкладається в спектр. Об'єктив 6 першого монохроматора дає спектральне зображення вхідної щілини в площині середньої щілини по лінії А - А. Середня щілина подвійного монохроматора, утворена дзеркалом 7 і ножом 8, вирізує ділянку спектра, що проходить у другий монохроматор і проектується в площину вихідної щілини 9.

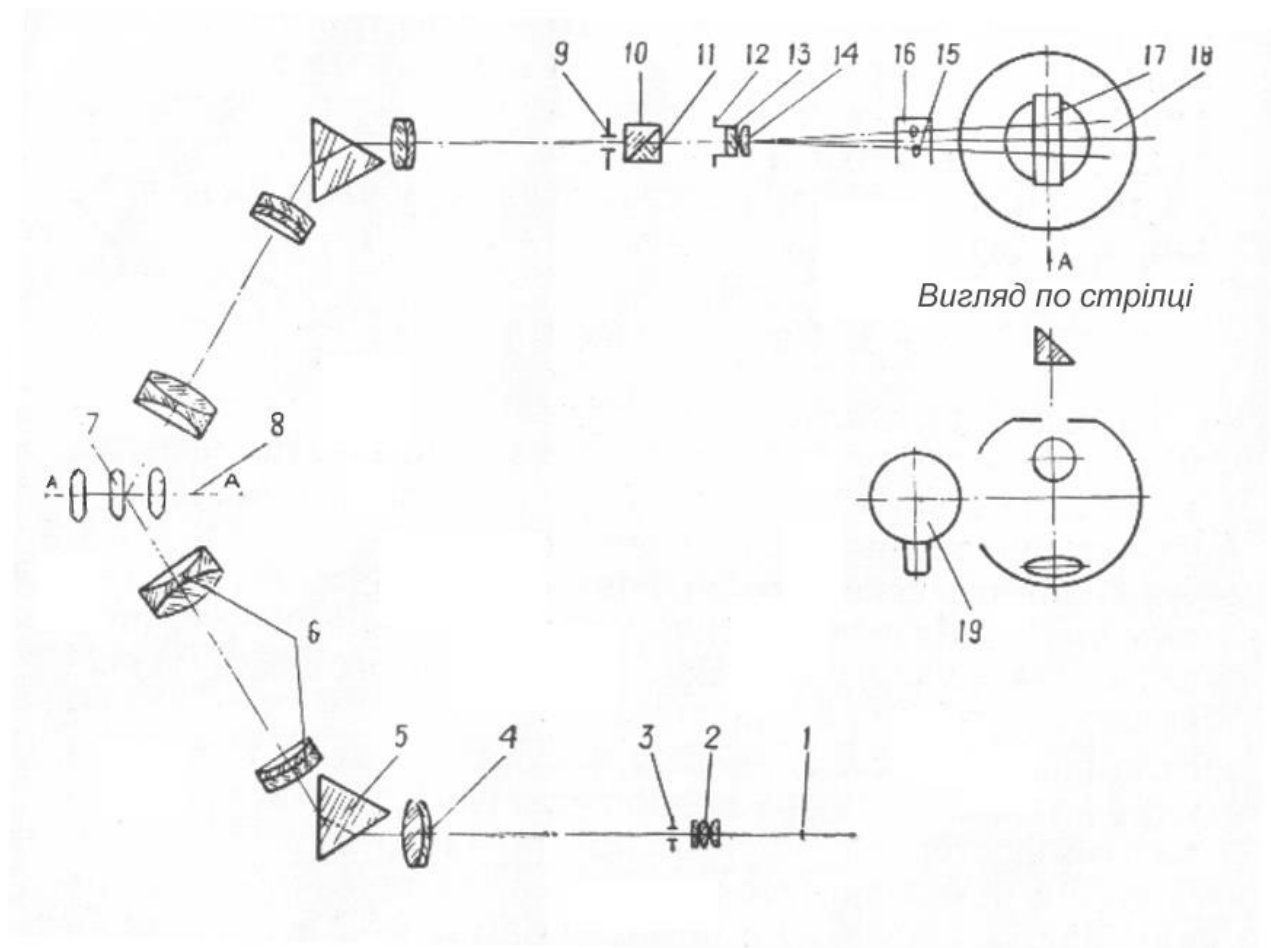


Рис.2.3. Оптична схема спектрофотометра СФ-14

По виходу з монохроматора пучок світла потрапляє у фотометричну частину приладу. Спочатку пучок проходить через лінзу 10 і подвійнозаломлюючу призму Рошона 11. Лінза 10 дає зображення об'єктива вихідного коліматора поблизу діафрагми 12, призма 11 розділяє це зображення на два, поляризованих у взаємо-перпендикулярних площинах: одне, розташоване симетрично щодо осі, проходить через призму Воластона 13 і лінзу 14, інше, зміщене, зрізується діафрагмою 12. Лінза 14 дає зображення вхідної щілини в площині напівлінз 15. Внаслідок подвійної променезаломлюваності призми Воластона в площині напівлінз виходять два зображення вхідної щілини. Пройшовши напівлінзи 15, встановлені всередині барабана переривачі 16, обидва пучки відхиляються на 90° призмою 17 і проходять кулю 18. Освітленість пластини з молочного скла, розташованої у вихідному вікні кулі, вимірюється фотоелементом 19.

Завдання:

1. Виміряти спектральні коефіцієнти пропускання світлофільтрів ПС-7 та ПС-14. За отриманими залежностями розрахувати їхні координати кольору XYZ для джерел білого світла A та D₆₅ (додаток 1). Визначити координати колірності x, y цих світлофільтрів. Нанести отримані точки на діаграму колірності МКО. Чи можна вважати кольори цих світлофільтрів метамерними?
2. Виміряти спектральні коефіцієнти відбивання всіх паперових кругів, які використовувались в лабораторній роботі №1. Розрахувати їхні координати кольору в системі XYZ.

Контрольні питання.

1. Який фізичний зміст від'ємник координат кольору?
2. В чому полягає фізичний зміст функцій змішування?
3. Які причини введення системи XYZ?
4. Що таке „дзеркальна пастка”?

Література:

1. Deane B. Judd, Günter Wyszecki. Color in Business, Science, and Industry. – Wiley, 1975.
2. Mark D. Fairchild. Color Appearance Models – Wiley, 2005.
3. Erik Reinhard, Erum Arif Khan, Ahmet Oguz Akyuz, Garrett Johnson. Color Imaging. Fundamentals and Applications – CRC Press, 2008

Лабораторна робота №3

Оцінка точності візуального урівнювання кольорів.

Мета роботи: оцінити точність візуального урівнювання кольорів.

Обладнання: дані візуального урівнювання з ЛРН№1, обчислені за результатами спектрофотометричних вимірювань ЛРН№2 координати кольору X, Y, Z кольорових зразків.

Теоретична частина.

Рівноконтрасний колірний простір CIE Lab

Недоліком колірної системи XYZ є так звана нерівноконтрасність. Це означає, що довжина відрізка, який сполучає дві точки цього простору не пропорційна візуальному відчуттю відмінності між відповідними кольорами. Щоб подолати цю невідповідність був запропонований цілий ряд колірних просторів, які є проєктивними перетвореннями простору XYZ. Відповідні простори отримали назву рівноконтрасних. Найбільш відомий з них – CIE Lab. Нові координати обчислюються за формулами (X_n, Y_n, Z_n – координати точки білого кольору в системі XYZ):

$$L = \begin{cases} 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 & \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \\ 903.3 \left(\frac{Y}{Y_n} \right) & \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \end{cases}$$
$$a = 500 \left[f \left(\frac{X}{X_n} \right) - f \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \right]$$
$$b = 200 \left[f \left(\frac{Y}{Y_n} \right) - f \left(\frac{Z}{Z_n} \right) \right]$$
$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \\ 7.787t + 0.138 & \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \end{cases}$$

Відмінність між кольорами 1 та 2 обчислюється за формулою колірних відмін:

$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}$$

Обчислення розмірів секторів на диску Максвела при урівнюванні кольорів за відомими координатами кольорів в просторі XYZ.

Постановка задачі:

Існують три кольори, які ми умовно будемо називати опорними:

$$\vec{e}_C(X_C, Y_C, Z_C), \vec{e}_M(X_M, Y_M, Z_M), \vec{e}_Y(X_Y, Y_Y, Z_Y)$$

Чорний колір $\vec{B}(X_B, Y_B, Z_B)$, білий колір $\vec{W}(X_W, Y_W, Z_W)$

та деякий колір $\vec{S}(X_S, Y_S, Z_S)$

Необхідно підібрати такі кутові розміри секторів відповідних кольорів на зовнішній (α_i) та внутрішній (β_i) частинах диску Максвелла, щоб при обертанні диску ці частини мали однакові кольори.

При зрівнюванні повинні виконуватись умови:

1. На зовнішній частині можуть знаходитись лише опорні кольори (від одного до трьох)
2. Сума всіх секторів на зовнішній (внутрішній) частині дорівнює 360°
3. Чорний та білий кольори не можуть одночасно бути присутні у внутрішній частині
4. Якщо опорний колір відсутній у зовнішній частині, то він може бути присутнім у внутрішній
5. Розміри секторів – невід'ємні числа

Відповідні умови можна записати у вигляді рівнянь.

Нехай $\alpha_C, \alpha_M, \alpha_Y$ - кутові розміри секторів опорних кольорів на зовнішній частині

$\beta_C, \beta_M, \beta_Y$ - кутові розміри секторів опорних кольорів на внутрішній частині

β_B, β_W - кутові розміри секторів чорного та білого кольорів на внутрішній частині

β_S - кутовий розмір сектора кольору \vec{S} на внутрішній частині

Тоді, зрівнювання запишеться у вигляді:

$$\alpha_C \vec{e}_C + \alpha_M \vec{e}_M + \alpha_Y \vec{e}_Y = \beta_C \vec{e}_C + \beta_M \vec{e}_M + \beta_Y \vec{e}_Y + \beta_W \vec{W} + \beta_B \vec{B} + \beta_S \vec{S}$$

(Дев'ять невідомих і три рівняння)

При додаткових умовах:

$$\alpha_C + \alpha_M + \alpha_Y = 360$$

$$\beta_C + \beta_M + \beta_Y + \beta_B + \beta_W + \beta_S = 360$$

$$\alpha_C \beta_C = 0$$

Умови $\alpha_M \beta_M = 0$ та $\exists \alpha_i \neq 0$ запишуться у вигляді

$$\alpha_Y \beta_Y = 0$$

$$\left| A \quad \hat{A} \right| \begin{matrix} \alpha_C \\ \alpha_M \\ \alpha_Y \\ \beta_C \\ \beta_M \\ \beta_Y \end{matrix} = \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix}, \text{ де } \hat{A}_{ij} = \delta_{ij} - A_{ij}$$

A - Матриця 3×3 , яка відповідає семи можливим варіантам розташування опорних кольорів:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{- опорні кольори на внутрішній частині диску відсутні}$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{- на зовнішній частині диску відсутній опорний колір } \vec{e}_C$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad - \text{ на зовнішній частині диску відсутній опорний колір } \vec{e}_M$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad - \text{ на зовнішній частині диску відсутній опорний колір } \vec{e}_Y$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad - \text{ на зовнішній частині диску присутній лише опорний колір } \vec{e}_C$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad - \text{ на зовнішній частині диску присутній лише опорний колір } \vec{e}_M$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad - \text{ на зовнішній частині диску присутній лише опорний колір } \vec{e}_Y$$

Умова $\beta_B \beta_W = 0$ запишеться у вигляді:

$$\begin{vmatrix} B & \widehat{B} \\ \beta_B & \beta_W \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \text{ де } \widehat{B} = 1 - B, \text{ а сама змінна } B \text{ може приймати значення}$$

$B = 0$ - на внутрішній частині диску відсутній чорний колір

$B = 1$ - на внутрішній частині диску відсутній білий колір

Остаточно матимемо 14 матричних рівнянь для всіх можливих матриць A та чисел B :

$$\begin{vmatrix} X_C & X_M & X_Y & -X_C & -X_M & -X_Y & -X_B & -X_W & -X_S & \alpha_C & 0 \\ Y_C & Y_M & Y_Y & -Y_C & -Y_M & -Y_Y & -Y_B & -Y_W & -Y_S & \alpha_M & 0 \\ Z_C & Z_M & Z_Y & -Z_C & -Z_M & -Z_Y & -Z_B & -Z_W & -Z_S & \alpha_Y & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_C & 360 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \beta_M & 360 \\ A_{11} & 0 & 0 & \widehat{A}_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_Y & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 & \widehat{A}_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_B & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 & \widehat{A}_{33} & 0 & 0 & 0 & \beta_W & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B & \widehat{B} & 0 & \beta_S & 0 \end{vmatrix} = 360$$

Розв'язок, який задовольняє умові $0 \leq \alpha_i, \beta_i \leq 360$ надає інформацію як про розташування кольорів на зовнішній та внутрішній частинах диска, так і про кутові розміри цих кольорів.

Завдання:

1. За координатами кольору зразків XYZ розрахувати розміри секторів (в градусах) необхідні для урівнювання за кольором зовнішньої та внутрішньої частин кола. Розглянути три випадки з ЛРН№1: ахроматичний колір, колір1 та колір2. Отримані результати та результати ЛРН№1 звести в порівняльну таблицю.

2. За координатами кольору зразків XYZ та відомими з ЛР№1 розмірами секторів обчислити координати XYZ зовнішньої та внутрішньої частин кола. Розглянути три випадки з ЛР№1: ахроматичний колір, колір1 та колір2. Отримані результати звести в таблицю.
3. За результатами таблиці п.2 обчислити величини ΔE_{Lab} між зовнішньою та внутрішньою частинами кола. Оцінити отримані значення.

Контрольні питання.

1. Які Ви знаєте рівноконтрасні колірні системи?
2. Що описує формула Ньюхола?
3. Як пов'язані між собою величина колірного порогу та ΔE_{Lab} ?
4. Що таке колірний допуск?

Література:

1. Deane B. Judd, Günter Wyszecki. Color in Business, Science, and Industry. – Wiley, 1975.
2. D.L. MacAdam. Color Measurement: Theme and Variations – Springer, 2014
3. Daniel Malacara. Color Vision and Colorimetry : Theory and Applications – Spie, 2011

Лабораторна робота №4

Вимірювання індикатриси розсіювання.

Мета роботи: виміряти індикатриси розсіювання стандартних білих зразків; перевірити виконання закону Ламберта.

Обладнання: гоніометр Г-5, фотодіод, синхронний детектор, лазер, набір білих зразків.

Теоретична частина.

Коефіцієнти пропускання та розсіювання є найголовнішими оптичними характеристиками, які використовуються в фотометрії та колориметрії.

Спектральний коефіцієнт $\tau(\lambda)$ пропускання визначається як відношення променевого потоку $\Phi_{\lambda}d\lambda$, який був пропущений до потоку $\Phi_{0\lambda}d\lambda$, що падав на зразок:

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda}d\lambda}{\Phi_{0\lambda}d\lambda}$$

Вимірювання проводяться у вузькому спектральному інтервалі $d\lambda$, де λ – центральна довжина хвилі інтервалу $d\lambda$.

В результаті взаємодії випромінювання з об'єктом може відбутись не тільки зміна спектрального складу потоку, але й його перерозподіл в просторі. В залежності від властивостей поверхні та внутрішньої структури об'єкта просторові розподіли потоків випромінювання, які пройшли та відбилися можуть дуже сильно відрізнятись від розподілів тих потоків, що падають. Це веде до необхідності враховувати залежність відбиваючих властивостей непрозорих об'єктів від умов освітлення та спостереження.

Спектральний апертурний коефіцієнт відбивання (САКВ) $\beta(\lambda)$ являє собою відношення спектрального потоку випромінювання відбитого досліджуванним зразком (Рис.4.2) до спектрального потоку, який був відбитий при тих самих умовах освітлення та спостереження еталоном (Рис.3.1).

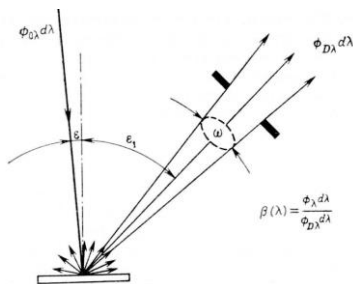


Рис.4.1

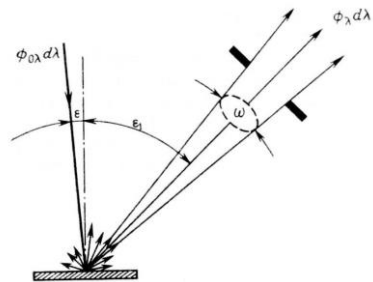


Рис.4.2

$$\beta(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda}d\lambda}{\Phi_{E\lambda}d\lambda}$$

$\Phi_{E\lambda}d\lambda$ – потік, який розсіяний еталоном

$\Phi_{\lambda}d\lambda$ – потік, який розсіяний зразком

ω – апертурний кут

φ, χ – кути падіння та розсіювання

В залежності від величини кута ω САКВ може приймати два граничні значення:

1. $\omega \rightarrow 0$. Відповідний САКВ носить назву спектрального коефіцієнта яскравості.

2. $\omega \rightarrow 2\pi$. В цьому випадку говорять про спектральний коефіцієнт відбивання, який позначають $\rho(\lambda)$.

При вимірюванні САКВ за еталон обирають ідеальний розсіювач, який розсіює все світло, яке на нього падає і має сталий спектральний коефіцієнт яскравості, який не залежить від умов освітлення та спостереження. Ідеальний розсіювач іноді називають ламбертівським, так як розсіяння світла відбувається за законом Ламберта.

Внаслідок того, що розсіяння світла жодним з існуючих на сьогоднішній день об'єктів не підкоряється закону Ламберта, обидві характеристики виявляються залежними від умов освітлення та спостереження розсіяного світла. Величезне різноманіття цих умов спонукало Міжнародну комісію по освітленню ввести з метою стандартизації чотири схеми (геометрії МКО) за якими має проводитись визначення вказаних коефіцієнтів. Таким чином, оптичні характеристики об'єкта описуються чотирма різними коефіцієнтами, значення яких, в загальному випадку, не співпадають між собою, а визначення вказаних коефіцієнтів для довільних умов освітлення та спостереження взагалі стає неможливим.

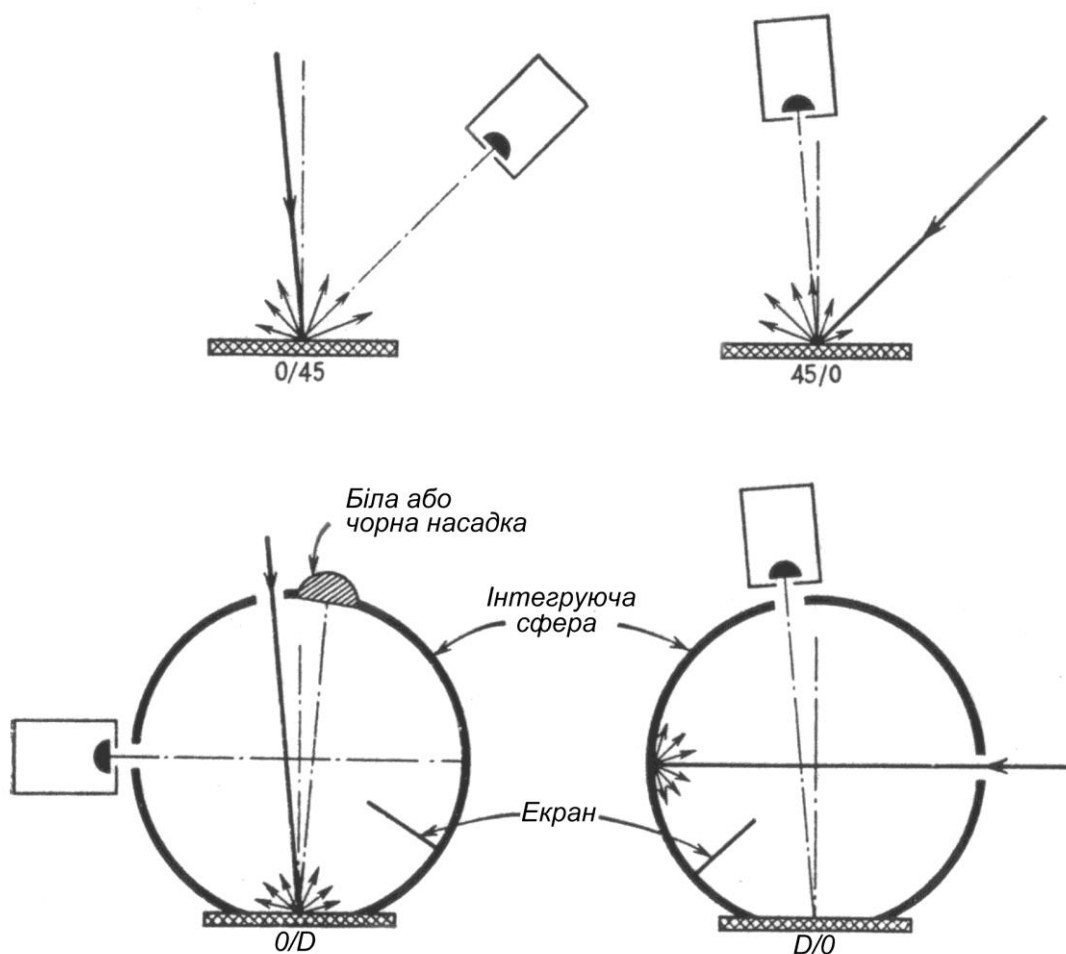


Рис.4.3 Стандартні геометрії МКО

1. 45/0 $\varphi = 45^\circ \pm 5^\circ$ $\chi \leq 10^\circ$ $\omega \leq 10^\circ$
2. 0/45 $\varphi \leq 10^\circ$ $\chi = 45^\circ \pm 5^\circ$ $\omega \leq 10^\circ$
3. d/0 Зразок освітлюється дифузно за допомогою інтегруючої сфери. Сумарна площа отворів в сфері не повинна перевищувати 10% площі її поверхні. $\chi \leq 10^\circ$.
4. 0/d $\varphi \leq 10^\circ$

При вимірюванні спектрального коефіцієнта пропускання напрямки освітлення та спостереження співпадають і утворюють перпендикуляр до поверхні зразка.

В практиці спектрофотометричних лабораторних досліджень (особливо при вимірах спектрів дифузного відбивання) як еталонна міра абсолютно білої поверхні найчастіше використовуються оксид магнію, сульфат барію, молочне (матоване) скло типу МС-14, МС-20 і т.п., а також емалі на основі алюмосилікату магнію або АК-573. Останнім часом досить продуктивно застосовується ще більш універсальний білий дифузно розсіювальний стандарт – політетрафторетилен (ПТФЕ). Порівняльні оптичні та технологічні параметри цих еталонів дифузного відбивання зведені до табл.4.1.

Таблиця 4.1. Порівняльні оптичні та технологічні параметри зразкових засобів дифузного відбивання

	Свіжена-пилений MgO	Емаль на основі BaSO ₄	Молочне скло типу МС-14, МС-20	Емаль на основі алюмосилікату магнію	Емаль АК-573	Порошок ПТФЕ
Спектр. область, нм	300÷1200	400÷2000	400÷1900	400÷1600	400÷2000	250÷2500
Коеф. дифуз. відбив.	0,95÷0,98	0,87÷0,94	0,80÷0,93	0,80÷0,95	0,86÷0,93	0,97÷0,99

Виходячи з наведених вище характеристик, для того чи іншого конкретного оптичного експерименту обирають необхідний еталон за принципом доцільності.

Найпростіша і відпрацьована технологія отримання оксиду магнію. Методика нанесення полягає у осадженні (накопиченні) білої сажі MgO при згоранні у кисні тонких стружок магнію до товщини не менше 1 ÷ 1,5 мм. Така товщина шару є "нескінченно товстою" для кванта світла з довжиною хвилі 300 ÷ 1200 нм, тобто, за таких умов промені вже не досягають ("не просочуються") поверхні підкладки. Стабільність коефіцієнта дифузного відбивання MgO у вказаному спектральному інтервалі пояснюється тим, що він являє собою діелектрик з межею власного поглинання на довжині хвилі $\lambda = 175$ нм (рис.3.4). Тому, якщо домішкові смуги поглинання відсутні, то коефіцієнт відбивання вказаного шару MgO не відхиляється помітно від наведеного у табл. 4.1.

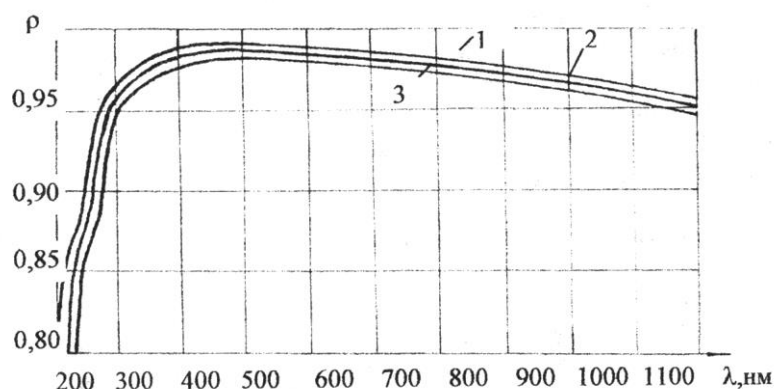


Рис. 4.4. Залежність відбивальної здатності MgO від температури і довжини хвилі: 1 - свіженацилений шар при T=77 К; 2 - те ж при T=292 К; 3 - те ж при T=343 К

Слід відзначити, що значення САКВ можуть перевищувати одиницю. Це може відбутися завдяки як просторовому, так і спектральному перерозподілу енергії випромінювання, яке освітлює зразок.

1. Просторовий перерозподіл: для зразків з гладенькими поверхнями у відбитому потоці буде спостерігатись потужна дзеркальна компонента. Зрозуміло, що в цьому випадку спектральний коефіцієнт яскравості буде значно більший за одиницю.
2. Спектральний перерозподіл: зразки, які містять люмінесцуючі домішки мають ту особливість, що поглинаючи енергію електромагнітного випромінювання в ультрафіолетовому діапазоні, вони перевипромінюють її частину у видимій області. Це може привести до того, що спектральна густина відбитого потоку буде більшою за відповідну величину для потоку, який падає. Як правило, це спостерігається в короткохвильовій області спектру при застосуванні так званих оптичних відбілювачів. В описаному випадку значення САКВ також буде перевищувати одиницю.

Експериментальна частина.

Для вимірювання двонаправленого коефіцієнта відбивання на основі гоніометра Г5 використовується експериментальна установка, яка зображена на рис.4.5. При реєстрації розсіяного випромінювання застосовується метод синхронного детектування.

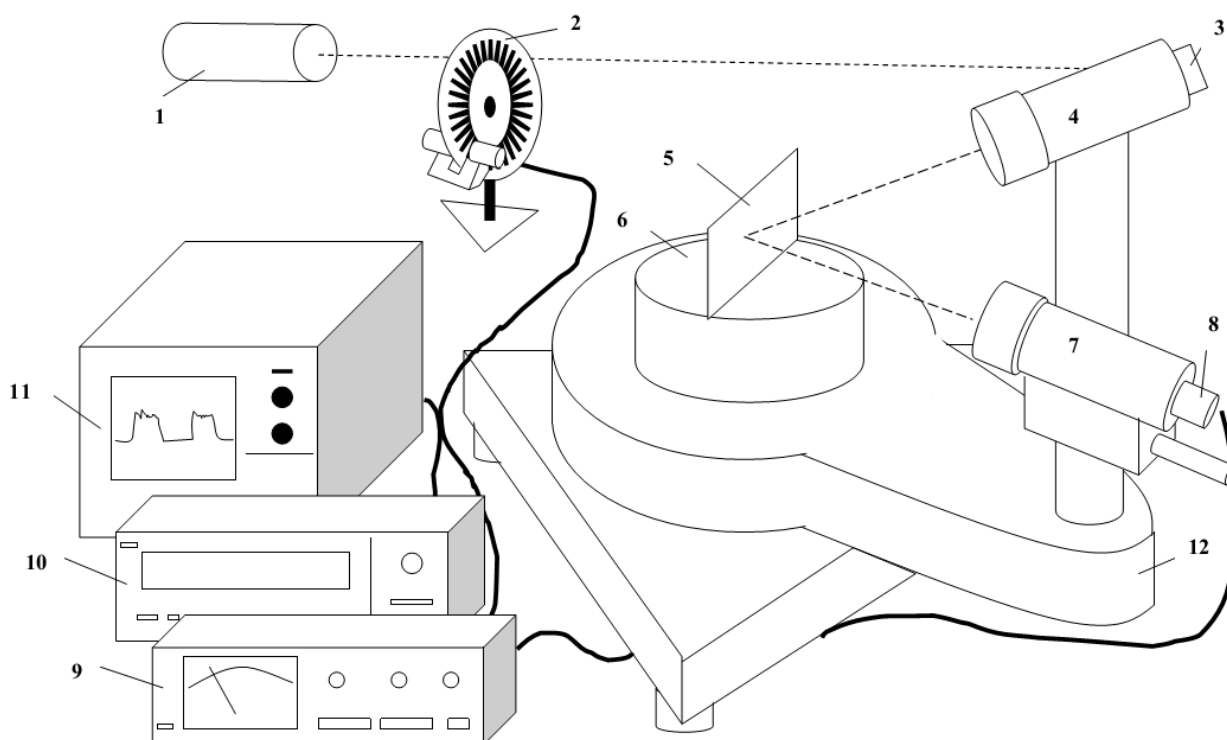


Рис.4.5. Сема експериментальної установки.

1 – He-Ne лазер; 2 – обтюратор; 3 – поворотна призма; 4 – коліматор; 5 – зразок; 6 – столик; 7 – об’єктив; 8 – фотодіод; 9 – синхронний детектор; 10 – вольтметр; 11 – осцилограф; 12 – алідада

Джерелом світла 1 виступає He-Ne лазер ($\lambda = 630$ нм). Світловий потік, проходячи через обтюратор 2, моделюється на частоті 455 Гц, після чого, крізь поворотну призму 3 та коліматор 4 освітлює зразок 5. Зразок встановлювався на горизонтально розташованому столику 6 так, щоб нормалі до поверхні зразка та поверхні столика були перпендикулярні. Розсіяне світло, через об’єктив 7 фокусується на поверхні фотодіода ФД-18К 8, який виступає в ролі приймача випромінювання. З фотодіода сигнал поступає на синхронний детектор 9. Для представлення результатів в цифровому вигляді, сигнал з виходу

синхронного детектора подається на вольтметр В7-21 10. Крім того, за допомогою осцилографа С1-68 11 проводиться контроль за сигналом на виході попереднього підсилювача.

Реєстрація розсіяного світла відбувається в площині падіння. Таким чином азимутальний кут ψ може приймати лише два значення: 0° – при розсіянні вперед і 180° – при розсіянні назад. Кут падіння ϕ встановлювався шляхом обертання столика 6 відносно коліматора 4, а кут розсіювання χ – обертанням відносно столика об'єктива 7, який розташований на рухомій алідаді 12.

Необхідно відзначити, що на описаній вище установці вимірювався *відносний* кутовий розподіл розсіяного світла.

Завдання:

1. Від'юстувати гоніометр Г-5. Опис та процедура юстування наведені в додатку 2. Встановити замість автоколімаційного окуляра блок фотоприймача.
2. Закріпити зразок 1 за допомогою затискачів. Провести вимірювання кутового розподілу яскравості при кутах падіння 0° , 45° , 60° . Повторити процедуру для зразків 2 і 3.
3. Побудувати кутові залежності для яскравості розсіяного випромінювання. Порівняти отримані результати з індикатрисою ламбертівського розсіювача.

Контрольні питання.

1. Як формулюється закон Ламберта?
2. Що описує рівняння переносу?
3. Як калібруються білі еталони?
4. В чому полягає принцип синхронного детектування?

Література:

1. Deane B. Judd, Günter Wyszecki. Color in Business, Science, and Industry. – Wiley, 1975.
2. D.L. MacAdam. Color Measurement: Theme and Variations – Springer, 2014
3. Akira Ishimaru. Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering – Wiley, 2017.

Лабораторна робота №5

Визначення корельованої колірної температури джерел білого світла.

Мета роботи: виміряти спектр випромінювання джерел білого світла; визначити корельовані колірні температури цих джерел.

Обладнання: монохроматор УМ-2, еталонна лампа розжарювання, галогенна лампа, лампа денного світла, синхронний детектор, приймач випромінювання.

Теоретична частина.

Говорячи про випромінювання та джерела світла нас буде цікавити спектральний розподіл густини потоку випромінювання, який припадає на одиницю поверхні об'єкта. Іншими словами, спектральна освітленість, яка створюється випромінюванням або джерелом світла.

Для того, щоб зробити можливим безпосереднє порівняння між собою результатів різних колірних вимірювань, МКО рекомендувала використовувати при вимірюваннях так звані стандартні випромінювання. Ці випромінювання мають кольори близькі до ахроматичних, а їхні колірні характеристики зазвичай порівнюють з характеристиками випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ). Відносний спектральний розподіл густини потоку випромінювання АЧТ, а отже і його колірність однозначно визначаються температурою АЧТ і можуть бути розраховані за формулою Планка для спектральної густини енергетичної світності АЧТ:

$$M_{\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1}$$

де $C_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16}$ Вт·м⁻³; $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ м·К

В табл. 5.1 наведені координати колірності (x, y) колірних стимулів у системі МКО 1931р., створюваних ідеальними (повними або планківськими) випромінювачами, підтримуваними при різних температурах по абсолютній температурній шкалі. Спектральний розподіл променистого потоку був розрахований за формулою Планка і поширений на випадок більш високих температур випромінювань, що можуть бути реально досягнуті.

Табл.5.1. Координати колірності x, y в системі МКО 1931 р.
випромінювача Планка при різних температурах T (К).

Температура T (К)	x	y	Температура T (К)	x	y
1000	0.6528	0.3444	4000	0.3805	0.3768
1200	0.6251	0.3674	4100	0.3761	0.3740
1400	0.5985	0.3858	4200	0.3720	0.3714
1500	0.5857	0.3931	4300	0.3681	0.3687
1600	0.5732	0.3993	4400	0.3644	0.3661
1700	0.5611	0.4043	4500	0.3608	0.3636
1800	0.5493	0.4082	4600	0.3574	0.3611
1900	0.5378	0.4112	4700	0.3541	0.3586
2000	0.5267	0.4133	4800	0.3510	0.3562
2100	0.5160	0.4146	4900	0.3480	0.3539
2200	0.5056	0.4152	5000	0.3451	0.3516

2300	0.4957	0.4152	5200	0.3397	0.3472
2400	0.4862	0.4147	5400	0.3348	0.3431
2500	0.4770	0.4137	5600	0.3302	0.3391
2600	0.4682	0.4123	5800	0.3260	0.3354
2700	0.4599	0.4106	6000	0.3221	0.3318
2800	0.4519	0.4086	6500	0.3135	0.3237
2900	0.4442	0.4065	7000	0.3064	0.3166
3000	0.4369	0.4041	7500	0.3004	0.3103
3100	0.4300	0.4016	8000	0.2952	0.3048
3200	0.4234	0.3990	8500	0.2908	0.3000
3300	0.4171	0.3963	9000	0.2869	0.2956
3400	0.4110	0.3935	10000	0.2807	0.2884
3500	0.4053	0.3907	15000	0.2637	0.2674
3600	0.3999	0.3879	30000	0.2501	0.2489
3700	0.3947	0.3851			
3800	0.3897	0.3823	2045	0.5218	0.4140
3900	0.3850	0.3795	2856	0.4475	0.4074

Колірності АЧТ становлять інтерес, оскільки вони дуже схожі на колірності випромінювань ламп розжарювання і, як це буде показано нижче, наближаються також до колірностей різних фаз денного світла. На рис.5.1 показаний графік із точками колірностей випромінювачів Планка при різних температурах. Крива, що проходить через ці точки, називається лінією чорного тіла. Люмінесцентні лампи, лампи штучного денного світла для контролю кольору і електронно-променеві трубки для телевізійних приймачів часто градууються за кольором відносно лінії чорного тіла. Наприклад, якщо випромінювання лампи штучного денного світла має колірність, що збігається з колірністю повного випромінювача з температурою $T = 6000\text{ K}$, то говорять, що ця лампа має колірну температуру 6000 K.

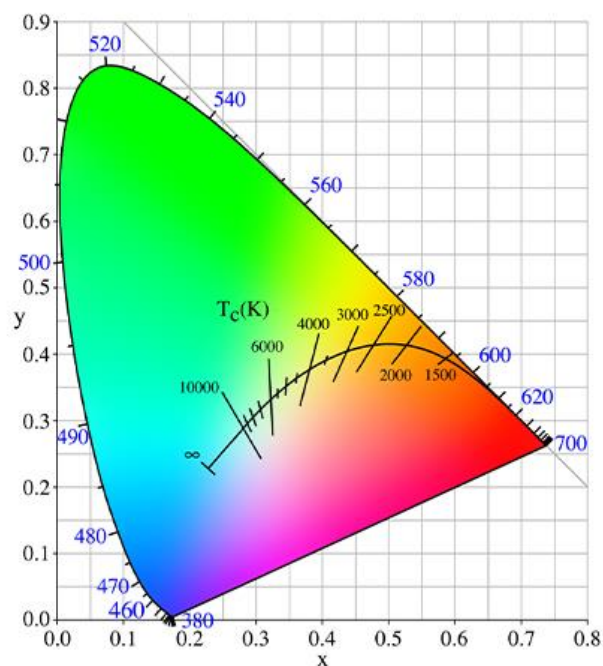


Рис.5.1 Колірний графік x, y МКО 1931 р. з лінією абсолютно чорного тіла.

Якщо колірність лампи штучного денного світла не збігається з жодною точкою лінії чорного тіла, обирається найближча точка лінії і по ній визначається корельована колірна температура даної лампи. Найближчою вважається та точка лінії, яка візуально сприймається найближчою по колірності до лампи денного світла. Щоб визначити координати найближчої точки, необхідний колірний графік, більш рівноконтрасний, ніж графік x, y . Такий графік існує; він називається рівноконтрасним колірним графіком МКО 1960 р.

На рівноконтрасному колірному графіку проводяться прямі лінії, що перетинають лінію чорного тіла під прямим кутом. Усі колірності, що лежать на будь-якій такій прямій, мають спільну найближчу точку з лінією чорного тіла - точку її перетину з прямою. Температура відповідає точці перетину і являє собою корельовану колірну температуру всіх тих стимулів, колірності яких лежать на прямій лінії. Сама пряма іноді називається *ізотемпературною лінією*.

Ізотемпературні лінії, знайдені з рівноконтрасного графіку МКО 1960 р., можуть бути трансформовані в ізотемпературні лінії на колірному графіку x, y МКО 1931 р.; сімейство таких ліній показано на мал. 5.2. Через нерівноконтрасність колірного графіка x, y ізотемпературні лінії перетинають лінію чорного тіла не під прямим кутом; проте досить близьке розташування сусідніх ліній дозволяє використовувати цей графік для визначення корельованих колірних температур звичайних джерел світла, для яких обраховані їхні координати колірності x, y .

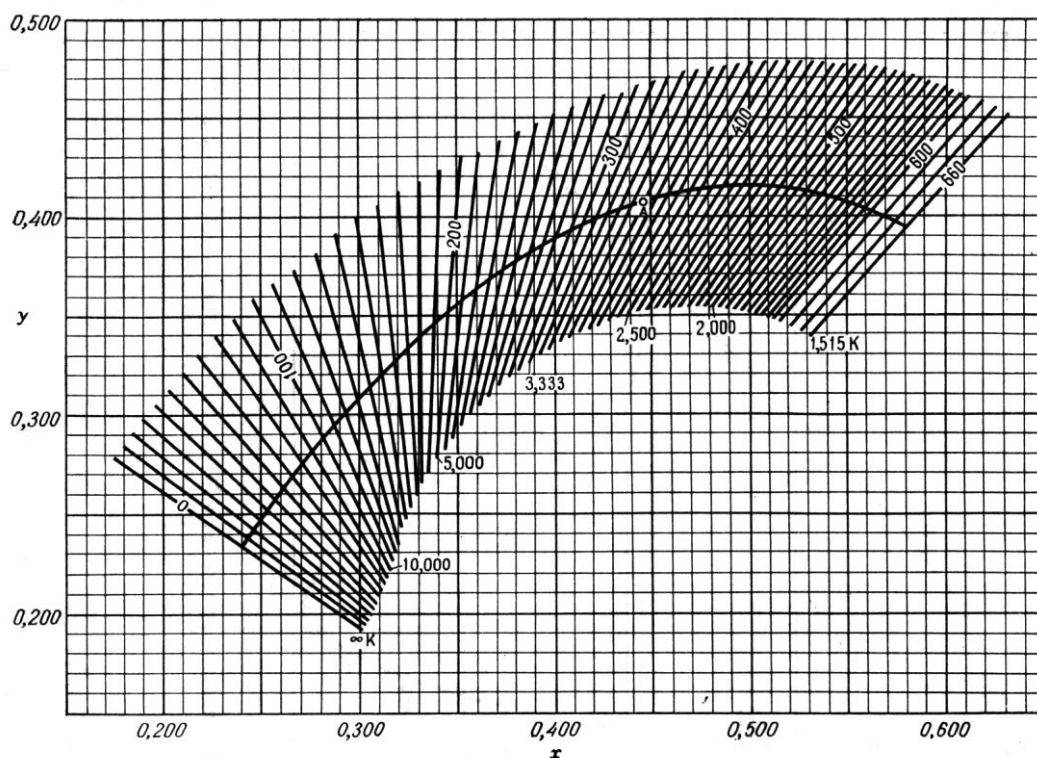


Рис.5.2. Частина колірного графіка x, y МКО 1931р. з лінією чорного тіла і сімейством ізотемпературних ліній.

Існує надзвичайно велика кількість випромінювань, які можуть освітлювати об'єкт під час спостереження. Найважливіше з них – денне світло. Денне світло має різні фази: світло ясного неба, пряме сонячне світло, світло ясного неба разом з сонячним світлом, світло хмарного неба. Всі ці фази описуються різними спектральними розподілами густини потоку випромінювання або так званим спектральним розподілом енергії. Спектральні потоки різного складу випромінюють також і штучні джерела – лампи розжарення та люмінесцентні лампи.

Проводити колірні вимірювання з усіма цими джерелами неможливо. На щастя в цьому немає потреби. Як правило, достатньо провести вимірювання лише з одним джерелом. Наприклад, координати кольору оздоблювальної плитки, які визначені при освітленні хмарним небом слабо відрізнятимуться від значень, що отримуються для будь-якої іншої фази денного світла. Однак, якщо ця плитка буде використана для оздоблення підземної станції метрополітену, то визначення кольору слід проводити при освітленні відповідним штучним джерелом.

Слід відзначити, що МКО розрізняє випромінювання та джерела. Поняття „випромінювання” відповідає певному спектральному розподілу густини потоку випромінювання, тоді як „джерело” фізично реалізує це випромінювання.

Стандартні випромінювання МКО:

Випромінювання А.

Випромінювання А являє собою випромінювання АЧТ при температурі 2856К, яке має на меті відтворення штучного освітлення лампами розжарення.

Випромінювання В і С.

Випромінювання В має відтворювати пряме сонячне випромінювання з корельованою колірною температурою 4870К, а випромінювання С – фазу так званого середнього сонячного світла з корельованою колірною температурою 6770К.

Випромінювання В і С мають занижені значення потужності ультрафіолетового випромінювання в порівнянні з відповідними фазами денного світла, тому вони непридатні при визначенні кольору зразків, здатних люмінескувати під дією ультрафіолетового випромінювання. Це привело до того, що на сьогоднішній день ці випромінювання майже не використовуються. Їх замінило випромінювання D₆₅.

Випромінювання D₆₅.

Випромінювання D₆₅ являє собою фазу денного світла з корельованою колірною температурою 6500К. Дані по випромінюванню D₆₅ отримані на основі численних спектрорадіометричних вимірювань денного світла, виконаних в різних районах США, Великобританії та Канади. Виявилось, що відносний спектральний розподіл енергії сумарного випромінювання сонця і неба майже не залежить від висоти сонця за період між 2 годинами після сходу і за 2 години до заходу, а також від хмарності неба. Фази сумарного денного світла знаходяться в діапазоні корельованих колірних температур від 6000 до 7000К, причому 6500К становить непогане наближення до середнього значення.

Випромінювання Е.

Випромінювання Е використовується в розрахункових цілях і відповідає описаному раніше рівно енергетичному стимулу.

Спектральні розподіли енергії стандартних випромінювань нормуються так, щоб при $\lambda=560\text{nm}$ їхні значення точно дорівнювали 100.

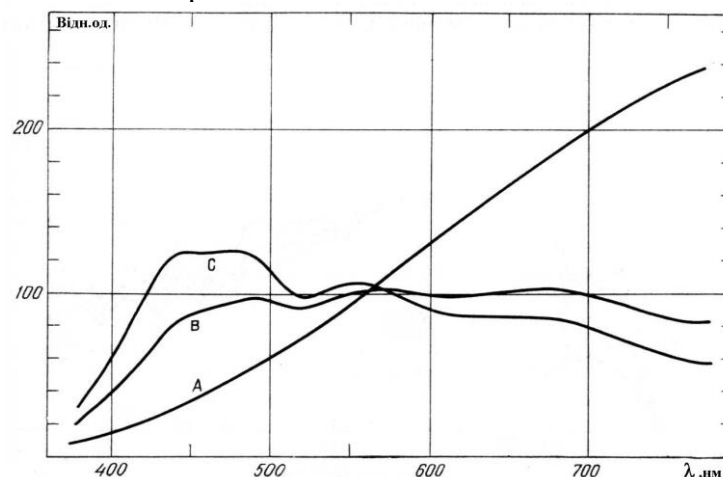


Рис.5.3 Відносний спектральний розподіл стандартних джерел білого світла А, В, С

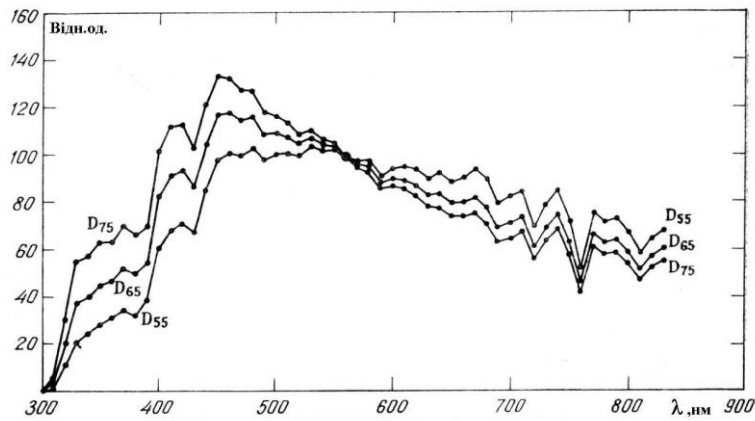


Рис.5.4 Відносний спектральний розподіл стандартних джерел білого світла D55, D65, D75

В таблиці 5.2 наведені координати колірності x , y в системі МКО 1931р. та корельовані колірні температури стандартних випромінювань.

Табл.5.2 Координати колірності і корельована колірна температура стандартних випромінювань МКО

Випромінювання	x	y	T, K
A	0,443	0,407	2856
B	0,348	0,352	4874
C	0,310	0,316	6774
D ₆₅	0,313	0,329	6504
E	0,333	0,333	5460

За експериментальними даними можна побудувати лінію денного світла з використанням для її побудови координат колірності x , y . Ця лінія показана на мал. 5.5 разом з лінією АЧТ. Лінія денного світла зміщена вгору щодо лінії чорного тіла. За допомогою цього малюнка можна графічно визначити значення корельованих колірних температур різних фаз денного світла.

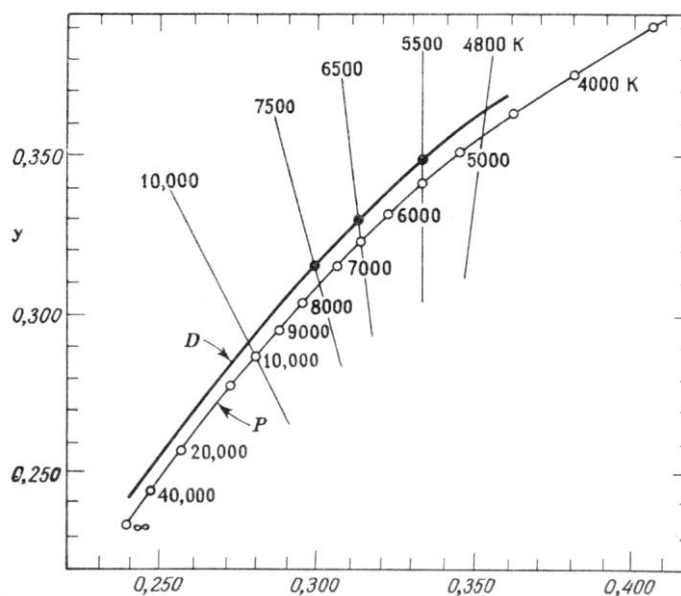


Рис. 5.5. Частина кольорового графіка x , y МКО 1931 р. з лініями денного світла (D) і чорного тіла (P), а також декількома ізотемпературними лініями.

Оскільки корельована колірна температура визначає лише колірність випромінювання, існує безліч спектральних розподілів енергії, що відповідають одній і тій же температурі; будь-яка пара з яких утворить метамерну пару. Корельована колірна температуру випромінювання є тому неповною і ненадійною його характеристикою з погляду передачі кольорів об'єктів (у тому числі і при фотографуванні), освітлених даним випромінюванням. Наприклад, люмінесцентні лампи типу Warm-White (≈ 3500 K) і Photoflood (≈ 3400 K) мають майже однакові значення корельованої колірної температури, однак не можна сказати, що вони однаково передають кольори освітлюваних об'єктів. Щоб зробити корельовану колірну температуру більш прийнятною основою для порівняння двох випромінювань, необхідно спочатку встановити подібність їхніх спектральних складів. Так, лампи накаливання в практично безбарвних колбах можна успішно порівняти за допомогою корельованої колірної температури без усяких застережень; аналогічно з таким же успіхом можна порівнювати дві люмінесцентні лампи за умови, що в них подібні люмінофори. Однак порівняння за допомогою корельованої колірної температури лампи розжарювання і люмінесцентної лампи рідко буває успішним з погляду передачі кольору освітлюваних ними об'єктів; колірна температура визначає лише місце самого випромінювання в жовто-синьому діапазоні кольорів.

Експериментальна частина.

Блок-схема установки для визначення спектру випромінювання (рис.5.6) містить у собі еталонне 1 та досліджуване 2 джерело випромінювання, конденсор 3, що формує його потік, монохроматор 4, приймач випромінювання (ПВ) 5. Перетворювач сигналу 6 ПВ дає можливість представити його реакцію у формі, зручної для фіксації за допомогою аналогового або цифрового вимірювального приладу 7. До складу установки входять також джерела живлення, що забезпечують роботу всіх її вузлів.

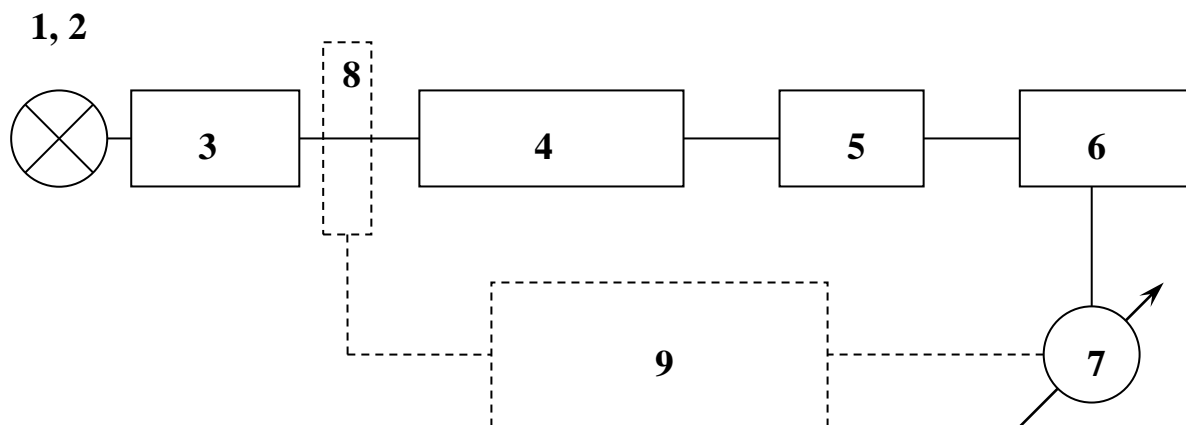


Рис. 5.6. Блок-схема установки

У залежності від типу ПВ (фотоелектронний помножувач, фотодіод, фоторезистор і т.д.), а також обраного методу виміру чутливості окремі блоки установки можуть або бути відсутні, або відрізнятися конструкцією і можливостями.

Наприклад, для фотоелектронного помножувача блок 6 являє собою електрометричний вимірювач струму (перетворювач струм-напруга) з діапазоном чутливості від 10^{10} до 10^{-3} А. При цьому джерело живлення ФЕП - це високовольтне (500...2500 В) стабілізоване ($K_{\text{ст}} > 200$) джерело напруги.

У випадку фоторезистора блок 6 - підсилювач змінної напруги із синхронним детектуванням, для нормальної роботи якого в оптичну систему має бути введений

модулятор випромінювання 8 з відповідними датчиками опорного сигналу. Чутливість синхронного детектора 9 повинна змінюватися в діапазоні від мікрвольт до декількох вольтів. Джерело живлення ПВ також повинно бути стабілізовано і розраховано на вихідні напруги від одиниць до десятків вольтів.

Фотодіод, який використовується у багатьох режимах, може не вимагати ні модулятора, ні джерела живлення (вентильний режим). У фотодіодному режимі буде потрібно джерело зсуву. Перетворювачем 6 можуть бути як перетворювач струм-напруга (фотодіодний режим, вентильний режим короткого замикання), так і підсилювач напруги з досить високим вхідним імпедансом (вентильний режим ходостого ходу).

Завдання:

1. Встановити еталонне джерело світла. Виміряти спектральну залежність реакції ПВ. Для зміни довжини хвилі за допомогою монохроматора УМ-2 використовувати градувальну таблицю наведену в додатку 3.
2. Замінити еталонне джерело на перше досліджуване джерело. Виміряти спектральну залежність реакції ПВ. Повторити виміри для другого досліджуваного джерела.
3. Використовуючи відомий спектр еталонного джерела розрахувати спектральний розподіл енергії для досліджуваних джерел.
4. Обрахувати координати колірності всіх трьох джерел в системі МКО 1931р. Використовуючи графік, який наведений на рис.4.2 визначити корельовані колірні температури джерел білого світла

Контрольні питання.

1. Що називають абсолютно чорним тілом і який його спектр випромінювання?
2. В чому відмінність між колірною та корельованою колірною температурами?
3. Який простір називають рівноконтрасним?
4. В чому полягає відмінність між випромінюванням та джерелом?

Література:

1. Deane B. Judd, Günter Wyszecki. Color in Business, Science, and Industry. – Wiley, 1975.
2. Noboru Ohta, Alan R. Robertson. Colorimetry: Fundamentals and Applications – Wiley, 2005.
3. R. W. G. Hunt, M. R. Pointer. Measuring Colour – Wiley, 2011.

Додаток 1

Розподіл енергії в спектрі стандартних джерел білого світла А, D₆₅ та функції змішування $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ МКО 1931р.

Довжина хвилі, нм	Джерело А	Джерело D ₆₅	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
380	9,7951	49,9755	0,00137	0,00004	0,00645
385	10,8996	52,3118	0,00223	0,00006	0,01055
390	12,0853	54,6482	0,00424	0,00012	0,02005
395	13,3543	68,7015	0,00765	0,00022	0,03621
400	14,7080	82,7549	0,01431	0,00040	0,06785
405	16,1480	87,1204	0,02319	0,00064	0,11020
410	17,6753	91,4860	0,04351	0,00121	0,20740
415	19,2907	92,4589	0,07763	0,00218	0,37130
420	20,9950	93,4318	0,13438	0,00400	0,64560
425	22,7883	90,0570	0,21477	0,00730	1,03905
430	24,6709	86,6823	0,28390	0,01160	1,38560
435	26,6425	95,7736	0,32850	0,01684	1,62296
440	28,7027	104,865	0,34828	0,02300	1,74706
445	30,8508	110,936	0,34806	0,02980	1,78260
450	33,0859	117,008	0,33620	0,03800	1,77211
455	35,4068	117,410	0,31870	0,04800	1,74410
460	37,8121	117,812	0,29080	0,06000	1,66920
465	40,3002	116,336	0,25110	0,07390	1,52810
470	42,8693	114,861	0,19536	0,09098	1,28764
475	45,5174	115,392	0,14210	0,11260	1,04190
480	48,2423	115,923	0,09564	0,13902	0,81295
485	51,0418	112,367	0,05795	0,16930	0,61620
490	53,9132	108,811	0,03201	0,20802	0,46518
495	56,8539	109,082	0,01470	0,25860	0,35330
500	59,8611	109,354	0,00490	0,32300	0,27200
505	62,9320	108,578	0,00240	0,40730	0,21230
510	66,0635	107,802	0,00930	0,50300	0,15820
515	69,2525	106,296	0,02910	0,60820	0,11170
520	72,4959	104,790	0,06327	0,71000	0,07825
525	75,7903	106,239	0,10960	0,79320	0,05725
530	79,1326	107,689	0,16550	0,86200	0,04216
535	82,5193	106,047	0,22575	0,91485	0,02984
540	85,9470	104,405	0,29040	0,95400	0,02030
545	89,4124	104,225	0,35970	0,98030	0,01340
550	92,9120	104,046	0,43345	0,99495	0,00875
555	96,4423	102,023	0,51205	1	0,00575
560	100	100	0,59450	0,99500	0,00390
565	103,582	98,1671	0,67840	0,97860	0,00275
570	107,184	96,3342	0,76210	0,95200	0,00210
575	110,803	96,0611	0,84250	0,91540	0,00180
580	114,436	95,7880	0,91630	0,87000	0,00165
585	118,080	92,2368	0,97860	0,81630	0,00140
590	121,731	88,6856	1,02630	0,75700	0,00110

Довжина хвилі, нм	Джерело А	Джерело D ₆₅	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
595	125,386	89,3459	1,05670	0,69490	0,00100
600	129,043	90,0062	1,06220	0,63100	0,00080
605	132,697	89,8026	1,04560	0,56680	0,00060
610	136,346	89,5991	1,00260	0,50300	0,00034
615	139,988	88,6489	0,93840	0,44120	0,00024
620	143,618	87,6987	0,85445	0,38100	0,00019
625	147,235	85,4936	0,75140	0,32100	0,00010
630	150,836	83,2886	0,64240	0,26500	0,00005
635	154,418	83,4939	0,54190	0,21700	0,00003
640	157,979	83,6992	0,44790	0,17500	0,00002
645	161,516	81,8630	0,36080	0,13820	0,00001
650	165,028	80,0268	0,28350	0,10700	0
655	168,510	80,1207	0,21870	0,08160	0
660	171,963	80,2146	0,16490	0,06100	0
665	175,383	81,2462	0,12120	0,04458	0
670	178,769	82,2778	0,08740	0,03200	0
675	182,118	80,2810	0,06360	0,02320	0
680	185,429	78,2842	0,04677	0,01700	0
685	188,701	74,0027	0,03290	0,01192	0
690	191,931	69,7213	0,02270	0,00821	0
695	195,118	70,6652	0,01584	0,00572	0
700	198,261	71,6091	0,01136	0,00410	0
705	201,359	72,9790	0,00811	0,00293	0
710	204,409	74,3490	0,00579	0,00209	0
715	207,411	67,9765	0,00411	0,00148	0
720	210,365	61,6040	0,00290	0,00105	0
725	213,268	65,7448	0,00205	0,00074	0
730	216,120	69,8856	0,00144	0,00052	0
735	218,92	72,4863	0,00099	0,00036	0
740	221,667	75,0870	0,00069	0,00025	0
745	224,361	69,3398	0,00048	0,00017	0
750	227,000	63,5927	0,00033	0,00012	0
755	229,585	55,0054	0,00024	0,00009	0
760	232,115	46,4182	0,00017	0,00006	0
765	234,589	56,6118	0,00012	0,00004	0
770	237,008	66,8054	0,00008	0,00003	0
775	239,370	65,0941	0,00006	0,00002	0
780	241,675	63,3828	0,00004	0,00001	0

ДОДАТОК 2

Гоніометр Г-5

Гоніометр Г-5 - це точний оптичний прилад, призначений для вимірювання кутів. Похибка вимірювання становить 5", Зовнішній вигляд приладу приведено на рис. 1. На основі /18/ нерухомо закріплено стояк /1/, на якому розміщено коліматор /4/. До переднього кінця коліматора прикріплена насадка з щілиною /2/, ширину якої можна регулювати. Посередині основи знаходиться алідада /17/, яка обертається навколо вертикальної осі. На алідаді розміщені зорова труба /9/ та предметний столик /24/, який можна нахилити у двох взаємно перпендикулярних напрямках гвинтами /7/ і /26/.

Об'єктиви коліматора і зорової труби ідентичні. Фокусування здійснюється гвинтами /5/ і /22/, відповідно. За допомогою гвинтів /6/ і /23/ коліматор і зорову трубу можна відхилити вгору або вниз на невеликі кути.

Конструкція приладу дозволяє повертати столик, лімб /скляне кільце з кутовими поділками/ і алідаду як незалежно одне від одного /в різних комбінаціях/, так і разом. Для того, щоб повернути столик незалежно від лімба і алідади, відпускають фіксуючий гвинт /10/ столика. Для точного встановлення кутового положення столика гвинт /10/ затискають і обертають мікрометричний гвинт /11/. Нижче від столика знаходиться оправа з фіксуючим і мікрометричним гвинтами /28/, механічно з'єднана лімбом.

Поворот столика разом з лімбом здійснюється при зафіксованому гвинті /10/ і відпущеному відповідному гвинті, що знаходиться нижче. Точне положення столика з лімбом встановлюється за допомогою мікрометричного гвинта /28/.

Поворот і встановлення точного кутового положення алідади здійснюється за допомогою фіксуєчого гвинта /29/ і мікрометричного гвинта /31/.

У даній роботі використовується режим роздільного обертання алідади і лімба. Для цього необхідно натиснути на верхню кнопку, розміщену на алідаді.

Автоколімаційний окуляр-куб

Окуляр /рис. 2/ складається з власне окуляра /4/, лампи /1/, захисного скла /2/, автоколімаційної сітки /3/ /зображення її подано на рис. 2, ліворуч/, світлоподільного кубика /6, 7/, сітки /5/ /див. рис. 2, праворуч/. Світло лампи освітлює сітку /3/. Після відбивання від напівпрозорої діагональної грані кубика світло проходить через об'єктив труби і падає на плоску поверхню досліджуваного предмета /призма, пластинка, дифракційна ґратка/. Відбившись від нього, світловий пучок проходить знову через об'єктив, який дав зображення сітки /3/ /при правильному фокусуванні/ в площині сітки /5/. Зображення обох сіток спостерігаємо в окуляр.

Юстування гоніометра

Наближене юстування приладу здійснюють за допомогою рівня, точне – автоколімаційним методом.

1. Встановлюють прилад у вертикальному положенні за рівнем /27/, вмонтованим в алідаду, за допомогою установочних гвинтів /30/.

2. Встановлюють горизонтально зорову трубу. Для цього розміщують рівень на корпусі труби вздовж її осі і повертають гвинт /23/ у потрібному напрямку до встановлення бульбашки посередині рівня.

3. Встановлюють горизонтально предметний столик. Рівень кладуть на столик вздовж осі одного з гвинтів /7/ або /26/ і, обертаючи, встановлюють вісь горизонтально. Після цього рівень повертають на 90° відносно його початкового положення і вирівнюють столик, Діючи другим гвинтом. Описані операції слід повторювати до тих пір, поки бульбашка рівня перестане зміщуватися.

4. Фокусують зорову трубу на нескінченність. Повертаючи оправу окуляра труби,

добиваються різкого зображення сітки /5/. Після цього прикладають плоскопаралельну скляну пластинку до оправу об'єктива труби /1/; обертаючи барабан /22/, добиваються різкого зображення автоколімаційної сітки /3/.

5. Завершують юстування, використовуючи автоколімаційний метод. Для цього встановлюють плоскопаралельну пластинку полірованою гранню на столик перпендикулярно до осі труби і знаходять зображення автоколімаційної сітки /3/. При наявності відхилення між зображеннями /3/ і /5/ його виправляють, діючи гвинтами /7/ або /26/ столика і гвинтом /23/ труби. Кожний гвинт повинен виправляти приблизно половину відхилення. Повернувши алідаду на 180° , перевіряють збіжність зображень сіток і при необхідності проводять юстування, як описано вище. Перевірку проводять до тих пір, поки не буде досягнуто точної збіжності. Після цього повертають трубу і пластинку на 90° відносно столика і перевіряють збіжність зображень сіток, регулюючи, при необхідності, нахил столика гвинтом /26/ або /7/.

6. Для юстування коліматора освітлюють його цілину і домагаються її чіткого зображення за допомогою гвинта /5/.

Вимірювання кутів на гоніометрі

Оптична система для відліку кутів розміщена на алідаді. Лімб розділення на 1080 поділок, ціна кожної з них становить $20'$. Оцифровані поділки розміщені через 1° . Для відрахування кутових значень, менших за $10'$ застосовується оптичний мікрометр, кожна поділка якого становить $1'$.

Мікроскоп для відліку кутів розміщений нижче від окуляра зорової труби. Поле його зору приведені на рис.3. За лівою шкалою відраховують градуси і десятки минут. Права шкала /шкала оптичного мікрометра/ служить для відрахування одиниць минут і секунд. На лівій шкалі видно пряме зображення деякої ділянки лімба, а також обернене зображення протилежної ділянки лімба. Крім того, видно вертикальний індекс /репер/, відносно якого здійснюється відрахунок. Щоб зробити відлік, необхідно повертати маховичок /19/ оптичного мікрометра в той чи інший бік до точного суміщення верхніх і нижніх зображень кутових поділок. Тоді число градусів визначає цифра /у верхньому зображенні/, яка розміщена найближче ліворуч од репера. Число десятків минут дорівнює числу інтервалів, які розмішені між знайденою цифрою на верхній половині і першою праворуч од репера цифрою на нижній половині зображення. Обидві цифри повинні відрізнятись між собою на 180° .

Число одиниць минут відраховується по шкалі оптичного мікрометра по лівому ряду чисел, а число секунд – по правому ряду чисел у тому ж вікні. Положення, приведені на рис. 3, відповідав відліку $0^\circ 15' 57''$.

Для визначення кута призми слід сумістити автоколімаційне зображення /3/ вертикального штриха з вертикальним штрихом сітки /5/, діючи на кінцевому стані мікрометричним гвинтом /28/ алідади. Узявши відлік /А/, повертають алідаду, одержують автоколімаційне зображення при відбиванні світла від другої грані призми і роблять відлік /В/.

Кожний з відліків /А/ і /В/ слід провести декілька разів, кожного разу збиваючи автоколімаційне наведення. Для визначення кута призми беруть середні значення відліків /А/ і /В/.

При вимірюванні дисперсії призми або ґратки суміщають зображення вхідної щілини коліматора з вертикальною рискою сітки /3/ окуляра.

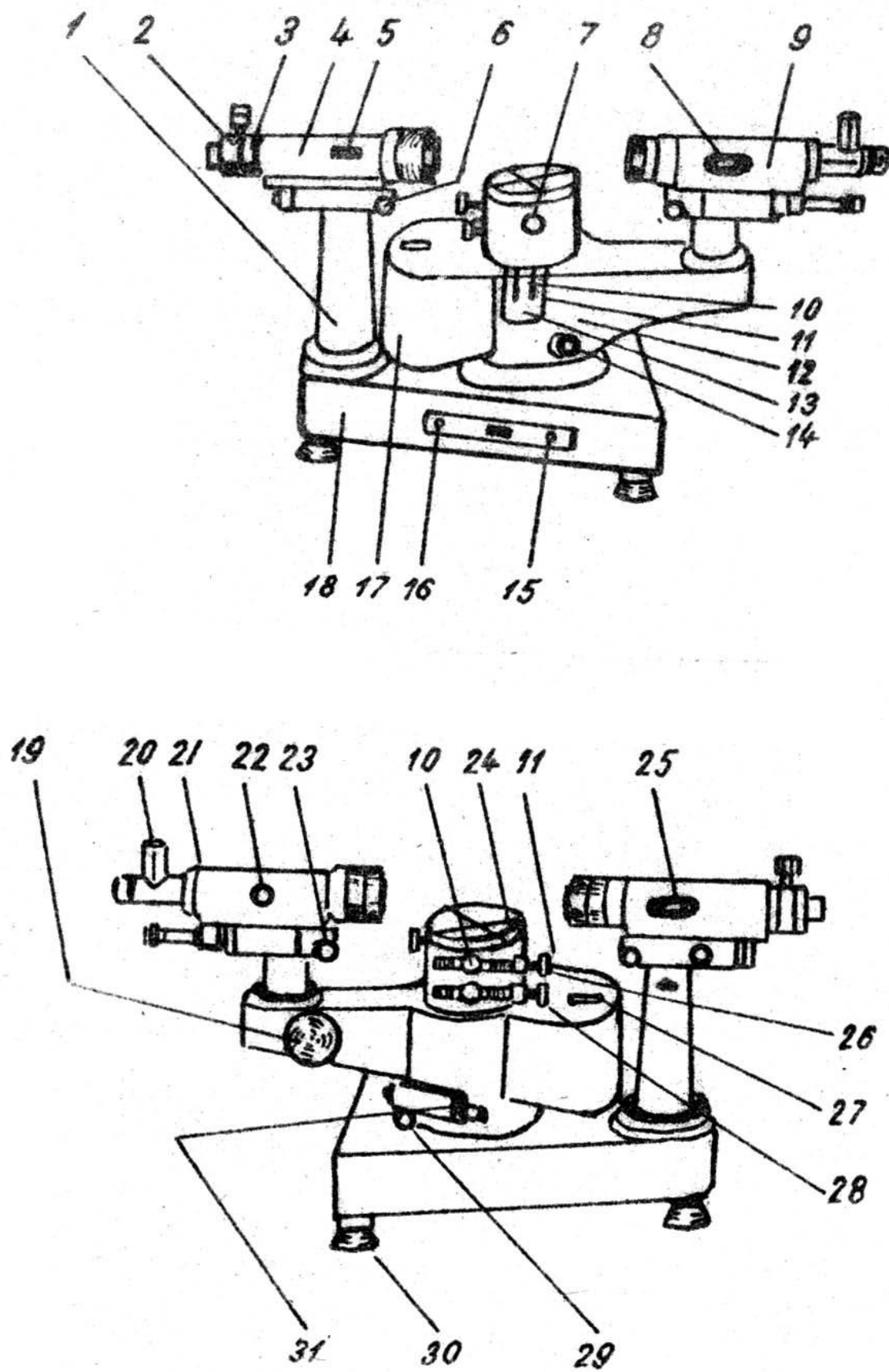


Рис.1

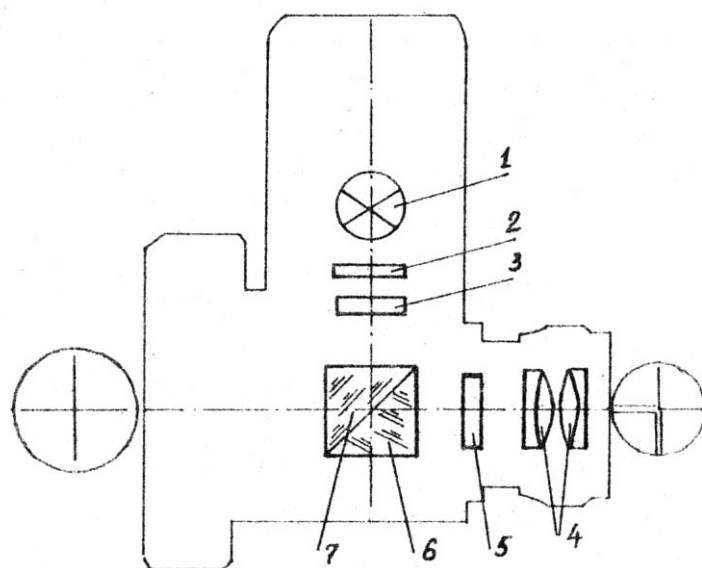


Рис.2

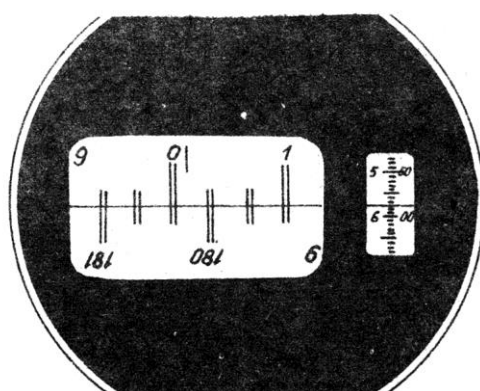


Рис.3

Додаток 3

Градувальна таблиця для монохроматора УМ-2.

Довжина хвилі, нм	Поділки на УМ-2
400	259
410	468
420	656
430	825
440	978
450	1118
460	1245
470	1362
480	1469
490	1568
500	1660
510	1745
520	1824
530	1898
540	1967
550	2032
560	2092
570	2149
580	2203
590	2254
600	2302
610	2348
620	2391
630	2431
640	2470
650	2507
660	2543
670	2576
680	2608
690	2639
700	2668
710	2696
720	2723
730	2749
740	2773
750	2797
760	2820
770	2841
780	2862
790	2882
800	2902

Довжина хвилі, нм	Поділки на УМ-2
810	2920
820	2938
830	2956
840	2972
850	2988
860	3004
870	3019
880	3033
890	3047
900	3060
910	3073
920	3086
930	3098
940	3110
950	3121
960	3132
970	3142
980	3153
990	3162
1000	3172
1010	3181
1020	3190
1030	3199
1040	3207
1050	3216
1060	3224
1070	3231
1080	3239
1090	3246
1100	3253
1110	3260
1120	3266
1130	3273
1140	3279
1150	3285
1160	3291
1170	3296
1180	3302
1190	3307
1200	3312