

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ОПТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

Навчальний посібник

Київ
НТУУ «КПІ»
2014

Оптичні вимірювання: Навчальний посібник / Уклад.: Л.А. Міхеєнко, М.С. Мамута. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 190с.

*Гриф надано Вченою радою НТУУ «КПІ»
(Протокол №11 від 01 грудня 2014 р.)*

Електронне навчальне видання

ОПТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

Навчальний посібник

Викладено питання оптичних вимірювань та метрології. Розглянуто характеристики і параметри вимірювальної апаратури. Викладені методи та засоби вимірювання геометричних параметрів об'єктів, а також методи та засоби вимірювання, засновані на використанні хвильових властивостей світла, зокрема інтерференційні, рефрактометричні, поляризаційні та дифракційні. Для практичного засвоєння матеріалу значну увагу приділено обробці вимірювальної інформації.

Для студентів за напрямками оптотехніки та оптико-електронного приладобудування.

Укладачі: Міхеєнко Леонід Андрійович
Мамута Марина Сергіївна

Відповідальний
Редактор Колобродов Валентин Георгійович

Рецензенти Тягур Володимир Михайлович
Русняк Ігор Миколайович

Вступ.....	6
1 Основи теорії вимірювань	8
1.1 Вихідні положення теорії вимірювань	8
1.1.1 Основні визначення та поняття.....	8
1.1.2 Види вимірювань	11
1.1.3 Види похибок вимірювань	12
1.1.4 Засоби вимірювань	14
1.1.5 Характеристики вимірювального приладу.....	15
1.2 Метрологічна обробка результатів вимірювань	19
1.2.1 Випадкові величини і способи їх описання	19
1.2.2 Оцінка точності вимірювання однієї величини	24
1.2.3 Оцінка точності визначення середнього арифметичного....	26
1.2.4 Оцінка точності непрямих вимірювань.....	30
1.3 Приклади оцінки точності вимірювань.....	33
1.3.1 Приклад оцінки точності вимірювання однієї величини	33
1.3.2 Приклад оцінки точності непрямих вимірювань	36
1.4 Контрольні запитання та завдання	40
2 Геометричні вимірювання	41
2.1 Візуальні геометричні вимірювання	42
2.1.1 Око як елемент вимірювального пристрою. Метрологічні характеристики зору.....	42
2.1.2 Мікроскопічні вимірювання	45
2.1.3 Кутові вимірювання	62
2.1.4 Лінійні вимірювання	80
2.1.5 Тіньові та проекційні методи вимірювань	88
2.2 Оптико-електронні геометричні вимірювання	92
2.2.1 Структурна схема вимірювального ОЕП	92
2.2.2 Амплітудні аналізатори зображення	94
2.2.3 Кодові аналізатори зображення	96

2.2.4 Амплітудний аналізатор-модулятор	100
2.2.5 Аналізатор зображення – багатоеlementний приймач випромінювання. Оптико-електронний автоколіматор	102
2.2.6 Час-імпульсний аналізатор зображення. Оптико- електронний мікроскоп	104
2.3 Контрольні запитання та завдання	110
3 Хвильові вимірювання	111
3.1 Інтерференційні вимірювання	111
3.1.1 Елементи теорії вимірювальних інтерферометрів.	111
3.1.2 Основні типи вимірювальних інтерферометрів	118
3.1.3 Методи інтерференційних вимірювань	135
3.2 Рефрактометричні вимірювання	156
3.2.1 Теоретичні основи рефрактомерії	157
3.2.2 Вимірювання абсолютних показників заломлення	159
3.2.3 Метод системи призм	161
3.2.4 Методи граничного кута	162
3.2.5 Імерсійні методи	167
3.3 Поляризаційні вимірювання	169
3.3.1 Методи отримання і властивості поляризованого випромінювання	169
3.3.2 Аналіз обертання площини поляризації. Вимірювання концентрації розчинів	173
3.3.3 Аналіз подвійного променезаломлення. Вимірювання внутрішніх напруг	175
3.3.4 Поляризаційна мікроскопія	177
3.4 Дифракційні вимірювання	179
3.4.1 Контроль увігнутих сферичних поверхонь по дифракційному зображенню точки	179

3.4.2 Дослідження якості оптичних систем дифракційними методами	180
3.5 Контрольні запитання та завдання	186
Література.....	187
Додаток	190

Вступ

Навчальний посібник з дисципліни «Оптичні вимірювання» призначений для студентів, що навчаються за напрямом підготовки: «Оптехніка», а також може використовуватись в інших дисциплінах, де розглядаються питання оптичної метрології, теорії і практики вимірювань, схемотехніки оптичних вимірювальних приладів.

Навчальний посібник «Оптичні вимірювання» для зручності використання, складається з трьох частин:

- I. Основи теорії вимірювань.
- II. Геометричні вимірювання.
- III. Хвильові вимірювання.

В частині I навчального посібника розглядаються питання метрології, оптичних вимірювань, характеристик і параметрів вимірювальної апаратури, отримання та обробки вимірювальної інформації. Крім теоретичного розділу частина I містить практичні приклади і довідковий матеріал щодо метрологічної обробки результатів вимірювання в лабораторних роботах і науково-дослідній роботі студентів.

Частина II навчального посібника охоплює розділи, що стосуються методів та засобів вимірювання геометричних параметрів об'єктів. Зокрема розглядаються візуальні мікроскопічні вимірювання, кутові вимірювання, тіньові та проекційні вимірювання, оптико-електронні геометричні вимірювання. Багато уваги приділяється метрологічним характеристикам зору, принципам побудови відлікових систем різних типів, типовим вимірювальним методикам.

Частина III навчального посібника охоплює розділи, що стосуються методів та засобів вимірювання, заснованих на використанні хвильових властивостей світла. Зокрема в цій частині посібника розглядаються

інтерференційні, рефрактометричні, поляризаційні та дифракційні вимірювання.

Навчальний посібник призначено для студентів за напрямками оптотехніки та оптико-електронного приладобудування. Посібник такою може використовуватись для самостійної роботи та дистанційного навчання.

1 Основи теорії вимірювань

1.1 Вихідні положення теорії вимірювань

1.1.1 Основні визначення та поняття

Вимірювання – це знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів [1]. Кожного разу, коли ведуть вимірювання, знаходять яку частину одиниці або ціле число одиниць складає вимірювана величина. Одиницею вимірювання є умовно прийнята м і р а, що увійшла до практики вимірювань.

Обов'язковими компонентами будь-якого вимірювання є метод вимірювання і засіб вимірювання [2].

Оптичні вимірювання – це такі вимірювання, коли вимірювальна інформація міститься в параметрах оптичного випромінювання. Методи і засоби оптичних вимірювань зручно класифікувати по тих оптичних явищах, які лежать в їх основі:

інтерференція – інтерференційні вимірювання – інтерферометри;

рефракція – рефрактометричні вимірювання – рефрактометри;

поляризація – поляризаційні вимірювання – поляриметри;

і т. п.

Якість вимірювань характеризується похибкою вимірювань (Δ), під якою розуміють відхилення результату вимірювання від дійсного значення вимірюваної величини [3].

За формою виразу розрізняють абсолютні (Δ) і відносні (δ) похибки [4].

Абсолютна похибка - похибка, виражена в одиницях вимірюваної величини:

$$\Delta = a - a_0,$$

де a_0 – дійсне значення вимірюваної величини, a – результат вимірювання.

Відносна похибка – похибка, виражена в долях дійсного значення вимірюваної величини:

$$\delta = \frac{a - a_0}{a_0}$$

Похибка характеризує недосконалість вимірювань; їх позитивною характеристикою є точність (T). Точність це якість вимірювань, що відображає близькість їх результатів до дійсного значення вимірюваної величини[3].

Вимірювання тим точніше, чим менша його похибка. Проте абсолютні похибки в загальному випадку залежать від значення вимірюваної величини, тому не підходять для кількісної характеристики точності. Отже, точність кількісно характеризується числом, рівним зворотному значенню відносної похибки[4]

$$T = \frac{1}{\delta}, \quad \delta = 1\% = \frac{1}{100}, \quad T = 100.$$

Хоча таким чином і можливо ввести кількісну характеристику точності, в метрології точність характеризується побічно, за допомогою похибки вимірювання.

Введення фізичних величин і встановлення їх одиниць є необхідною передумовою вимірювань. Проте всяке вимірювання завжди виконується стосовно конкретного об'єкта. І загальне визначення вимірюваної фізичної величини необхідно конкретизувати, враховуючи властивості даного об'єкта і мету вимірювання.

Реальні об'єкти замінюються моделями, параметри яких можна визначити. Наприклад, вимірювання діаметру диска. Ми вважаємо, що диск має форму круга. Круг і діаметр круга поняття математичні, тобто

абстрактні. Круг – це модель диска, а діаметр круга – вимірюваний параметр моделі.

Ідеалізація, необхідна для побудови моделі і обумовлює неминучу невідповідність між параметром моделі і реальною властивістю об'єкта. Ця невідповідність називається пороговою.

Похибка, обумовлена пороговою невідповідністю, повинна бути меншою від повної похибки вимірювання. Якщо ця складова похибки перевищує межу похибки вимірювання, що припускається, то вимірювання з необхідною точністю стає неможливим, що свідчить про непридатність моделі і необхідність її заміни.

Похибки вимірювання не можна знайти безпосередньо за її визначенням, оскільки дійсне значення вимірюваної величини невідоме. Завдання оцінювання похибки полягає в тому, щоб охарактеризувати невизначеність отриманого при вимірюванні результату. Невизначеність результату вимірювання найчастіше характеризується вказівкою меж похибки результату вимірювань[4]. Якщо ці межі знаходять так, що вони відповідають деякій вірогідності, то їх називають довірчими межами похибки результату вимірювань або довірчою похибкою. Якщо ж межі похибки оцінюють так, що є підстави стверджувати, що похибки, які виходить за ці межі, зустріти не можна, то їх називають граничними похибками вимірювання. Природно, що під граничною похибкою розуміють максимальну похибку, яку не можуть перевищити похибки даного вимірювання.

Точність вимірювання повинна відповідати меті вимірювання. Недостатня точність може привести до ухвалення помилкових рішень, а зайва точність веде до невиправданої витрати засобів.

1.1.2 Види вимірювань

За способом знаходження числового значення шуканої фізичної величини розрізняють прямі, непрямі, сукупні і сумісні вимірювання[1, 4].

При прямих вимірюваннях шукане значення величини знаходять безпосередньо з дослідних даних – прямимпорівнянням вимірюваної величини із мірами або за допомогою вимірювального приладу, проградуйованого в одиницях вимірювання (ваги з шкалою, термометр, амперметр).

При непрямих вимірюваннях шукане значення величини знаходять за допомогою обчислень на підставі відомої залежності між цією величиною і величинами, що піддаються прямим вимірюванням (наприклад, знаходження об'єму по довжині, ширині, висоті).

Сукупні вимірювання – це вимірювання, при яких значення декількох однорідних величин знаходять на основі вимірювань різних комбінацій цих величин і вирішення відповідних систем рівнянь.

Сумісні вимірювання – це одночасні вимірювання двох і більше різнорідних величин для знаходження параметрів залежності між ними (наприклад, вимірювання швидкості).

Прямі вимірювання можуть бути здійснені декількома методами[3].

Методом безпосередньої оцінки (наприклад, по стрілочному приладу).

Диференціальним методом (безпосередньо знаходиться різниця між шуканою величиною і відомою).

Нульовим або компенсаційним методом (вимірювана величина врівноважується відомою величиною).

Методом збігів (різниця між вимірюваною величиною і відомою, відтворною мірою, вимірюють використовуючи збіг відміток шкал – ноніусна шкала).

Вимірювання ділять на статичні та динамічні[4, 5].

Під статичним режимом засобу вимірювань розуміють режим, при якому вихідний сигнал можна вважати незмінним.

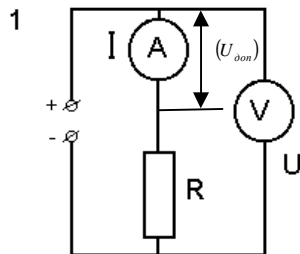
Під динамічним режимом розуміють режим, при якому вихідний сигнал змінюється в часі так, що цю зміну необхідно враховувати.

1.1.3 Види похибок вимірювань

По внеску в загальну похибку вимірювання (Δ_ϵ) розрізняють [2-4]:

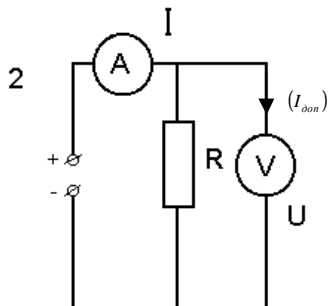
Методичні похибки (Δ_M), які виникають внаслідок недостатньої розробленості теорії явищ, покладених в основу вимірювання, зокрема через порогову невідповідність.

Наприклад, вимірювання опору резистора по формулі $R = \frac{U}{I}$ супроводжується методичними похибками (рис. 1.1):



Вольтметр показує додаткове падіння напруги ($U_{\text{доп}}$) на амперметрі.

$$R_A > 0$$
$$\Delta R \approx (U_{\text{доп}})$$



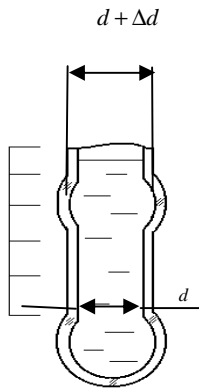
Показання амперметра завищені на величину струму ($I_{\text{доп}}$), що проходить через вольтметр.

$$R_V < \infty$$
$$\Delta R \approx (I_{\text{доп}})$$

Інструментальні похибки (Δ_i) – виникають через недосконалість засобів вимірювання.

Наприклад, похибки термометра через нерівномірність діаметра трубки (Δd).

Особисті похибки (Δ_o) – помилки



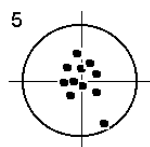
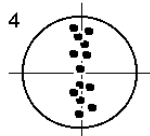
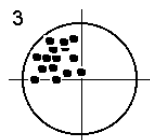
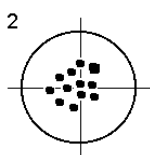
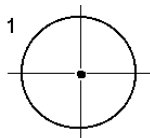
Сумарна похибка рівна сумі окремих складових:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_M + \Delta_i + \Delta_o$$

По причинах виникнення розрізняють систематичні, випадкові та грубі похибки (промахи)[2].

Систематична похибка – складова похибки, яка залишається постійною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Виявлена і оцінена систематична похибка виключається з результату вимірювання шляхом поправки.

Випадкова похибка обумовлена розсіюванням результатів і для окремих вимірювань індивідуально непередбачувана. Будь-які закономірності, характерні для даних похибок, виявляються лише на значному числі результатів.



Груба похибка – похибка, що істотно перевищує похибку, виправдану умовами вимірювання, методом, кваліфікацією оператора. Грубі похибки виявляються статистичними методами і виключаються[4].

Приклад – стрілянина по мішені:

- 1 – похибки відсутні
- 2 – Присутні тільки випадкові похибки
- 3 – Присутні випадкова і постійна систематична похибки
- 4 – Присутні випадкова і змінна систематична похибки
- 5 – Присутні й випадкова і груба похибки.

По наявності або відсутності функціонального зв'язку

між похибкою вимірювання і значенням вимірюваної величини розрізняють адитивну і мультиплікативну похибки[3].

Адитивна похибка не залежить від значення вимірюваної величини.

Мультиплікативна похибка (виходить шляхом множення) залежить від значення вимірюваної величини.

Властивості випадкових похибок.

Спостереженнями були встановлені наступні властивості випадкових похибок[6]:

1. Випадкові похибки не можуть перевершувати по абсолютній величині певної межі.
2. Позитивні і негативні випадкові похибки однаково часто зустрічаються у ряді вимірювань.
3. Чим більше абсолютна величина випадкової похибки, тим рідше вона зустрічається у ряді вимірювань.
4. Середнє арифметичне з випадкових похибок вимірювання однієї величини за однакових умов наближається до нуля при необмеженому збільшенні числа вимірювань.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} (\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n) = 0 \quad (1.1)$$

1.1.4 Засоби вимірювань

Засоби вимірювань ділять на міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні прилади, вимірювальні установки, і вимірювальні системи[1, 4, 5].

Міра – засіб вимірювання, відтворюючий фізичну величину відомого (заданого) розміру.

Вимірювальний перетворювач – засіб вимірювання, призначений

для перетворення сигналів вимірювальної інформації у формудоцільну для передачі, обробки, зберігання. Вимірювальна інформація на виході перетворювача, як правило, недоступна для безпосереднього сприйняття оператором (термопара).

Вимірювальний прилад– засіб вимірювання, призначений для перетворення сигналів вимірювальної інформації у форму, доступну для безпосереднього сприйняття оператором. Загальною для всіх вимірювальних приладів є наявність відлікових шкал і пристроїв.

Вимірювальна установка– сукупність функціонально і конструктивно об'єднаних засобів вимірювань і допоміжних пристроїв, призначена для раціональної організації вимірювання. Вимірювальна установка дозволяє передбачити певний метод вимірювання і заздалегідь оцінити похибку вимірювання (оптична лава і тому подібне).

1.1.5 Характеристики вимірювального приладу

Будь-який вимірювальний прилад (засіб вимірювання) можна розглядати як перетворювач вхідного сигналу x_u вихідний сигнал y . Вимірювана приладом величина (переміщення об'єкта, потужність випромінювання і т. д.) служить вхідним сигналом. Вихідний сигнал матиме різний вигляд залежно від способу видачі інформації (переміщення стрілки гальванометра, зміна напруги і т. д.).

Розрізняють динамічний і статичний режими вимірювань[5]. У першому випадку вхідний і вихідний сигнали змінюються з часом, в другому – зберігають постійні значення.

Закони перетворення сигналів при динамічному і статичному режимах виражаються відповідно через динамічні і статичні характеристики[4].

Динамічна характеристика виражається аналітично у вигляді диференціального рівняння, що зв'язує вхідну величину x і вихідну y і їх похідні

$$f_1[x^{(n)}, x^{(n-1)} \dots x] = f_2[y^{(n)}, y^{(n-1)}, \dots, y]$$

Відношення зображень вихідного і вхідного сигналів за нульових початкових умов називається передавальною функцією приладу.

Статичною характеристикою називають залежність між сталими значеннями вихідного і вхідного сигналів (рис. 1.1):

$$y = f(x) \quad (1.2)$$

Статичну характеристику можна отримати з динамічної при рівності нулю всіх похідних. Для вимірювальних приладів, забезпечених відліковою шкалою, залежність (1.2) є також рівнянням шкали. Статичну характеристику називають також функцією перетворення сигналу (ФПС) або градуовальною характеристикою.

Залежно від завдань вимірювання, ФПС може бути лінійною, нелінійною, такою, що проходить і не проходить через початок координат.

Найменші значення сигналів x і y називаються нижніми межами вимірювання приладу по входу і виходу, а найбільші – відповідно верхніми межами.

Діапазон вимірювання (R) рівний різниці між верхніми і нижніми межами вимірювань[4].

$$\text{По входу} \quad R_x = x_B - x_H$$

$$\text{По виходу} \quad R_y = y_B - y_H$$

Похідна вихідного сигналу по вхідному називається чутливістю вимірювального приладу (S) або статичним передавальним коефіцієнтом (т. А)

$$S = \frac{dy}{dx}$$

Середня чутливість (\bar{S}) рівна відношенню діапазонів вимірювання по виходу і входу

$$\bar{S} = \frac{R_y}{R_x}$$

По графіку ФПС часто оцінюють похибки вимірювального приладу, для чого на графік теоретичної характеристики наносять графік вихідного сигналу реального приладу. Абсолютна похибка ($\Delta x, \Delta y$) – різниця ординат кривих $f_m(x)$ і $f_p(x)$ по виходу (Δy) і входу (Δx) (т. В).

Відносна похибка (δ_x, δ_y) – відношення абсолютної похибки до поточного значення вимірюваного параметра [4]

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x}; \quad \delta_y = \frac{\Delta y}{y}$$

Відношення абсолютної похибки до діапазону вимірювань називається приведеною відносною похибкою (γ_x, γ_y).

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{R_x}; \quad \gamma_y = \frac{\Delta y}{R_y}$$

Найбільш допустиме значення приведеної відносної похибки (γ_{\max}), виражене у відсотках, називається класом точності вимірювального приладу (А).

$$A = \gamma_{\max} \cdot 100$$

По класу точності, який вказується на шкалі приладу, і по діапазону вимірювання можна визначити максимальну похибку:

$$f_1(x^{(n)}, x^{(n+1)}, \dots, x)$$

$$f_2(y^{(n)}, y, \dots, y)$$

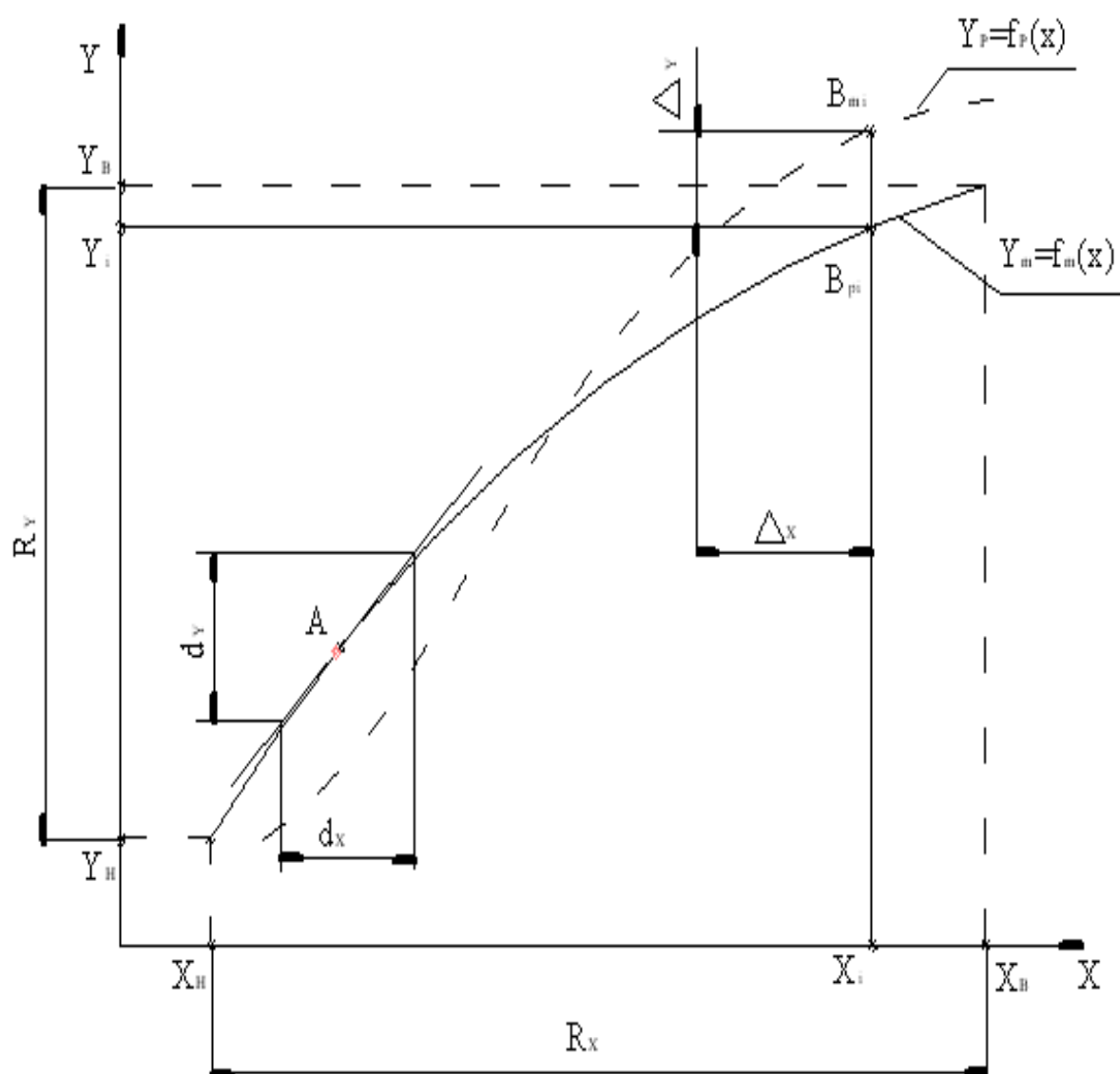
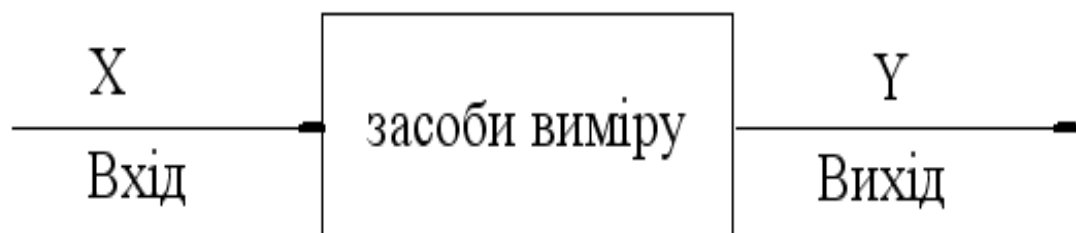


Рис.1.1 Функція перетворення сигналу засобів вимірювання

$$\left. \begin{array}{l} A = 2 \\ R_x = 100 \text{ мА} \end{array} \right\} \begin{array}{l} g_{\max} = \frac{A}{100} = \frac{2}{100} = 0,02 \\ \Delta X_{\max} = g_{\max} R_x = 0,02 \cdot 100 = 2 \text{ мА} \end{array}$$

Для приладів, що працюють в нульовому (що стежить) режимі часто використовують термін "порогова чутливість" [1], під яким розуміють найменший приріст вхідного сигналу (Δx_n), що забезпечує виявлення вихідного сигналу (y_n). Іншими словами, якщо вхідний сигнал X знаходиться в межах $\pm\Delta x_n$, то він не може бути виявлений даним приладом.

1.2 Метрологічна обробка результатів вимірювань

1.2.1 Випадкові величини і способи їх описання

Випадковою називають таку величину, яка залежно від випадку приймає те або інше чисельне значення. Оскільки закономірності в появі цих значень немає, аналіз таких величин може проводитися тільки методами теорії вірогідності.

Для характеристики випадкової величини необхідно знати сукупність можливих значень цієї величини, а також вірогідність, з якою ці значення можуть з'являтися.

Повністю властивості випадкової величини описуються функцією розподілу $F(x)$ [3, 4], яка визначає вірогідність того, що випадкова величина X_p буде менша, ніж x_ϕ

$$F(x) = P(X_p < x_\phi)$$

де X_p – певна випадкова величина (реалізація), x_ϕ – фіксоване значення випадкової величини.

Функція розподілу (рис. 1.2) визначена таким чином, що $F(-\infty)=0$, а $F(+\infty)=1$ [3].

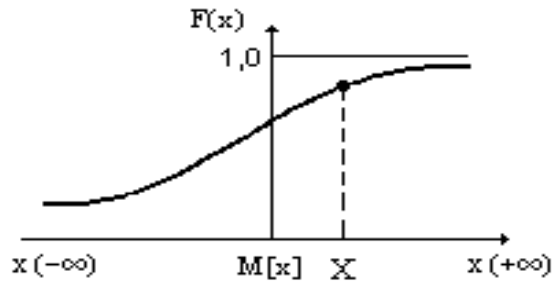


Рис. 1.2 Функція розподілу

Разом з функцією $F(x)$, званою інтегральною, широко застосовується диференціальна функція, яку зазвичай називають щільністю розподілу $f(x)$ [3]

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$

Щільність розподілу – функція розмірна

$$\dim(x) = \dim \frac{1}{x}$$

Щільність розподілу (рис. 1.3) вказує як часто з'являється випадкова величина X_p у деякій околиці точки x_ϕ – при повторному досліді [4]

$$P(x_1 < x_p < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = F(x_2) - F(x_1)$$

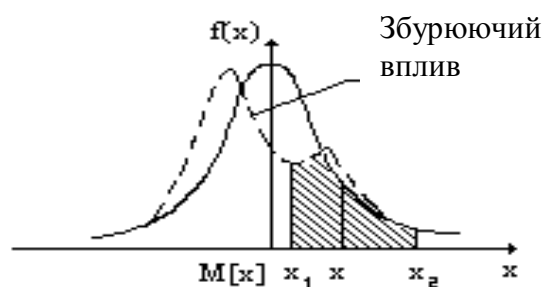


Рис. 1.3 Щільність розподілу

Площа під кривою $f(x)$ рівна ймовірності появи будь-якого з можливих значень x тобто рівна 1.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

Для практичних цілей замість повного статистичного опису властивостей сукупності випадкових величин x часто обмежуються тільки вказівкою деяких особливих характеристик цієї сукупності – моментів розподілу – початкових (M) і центральних (η) [3].

Початковим моментом k -го порядку випадкової величини x називають математичне очікування k -го степеня [4]

$$m_k(x) = M[x]^k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k f(x) dx$$

Серед початкових моментів найбільш важливим є перший

$$m_1(x) = M[x] = m_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx$$

Перший початковий момент характеризує положення центру розподілу – точки, до якої тяжіє сукупність значень випадкової величини (значення x - координати центру тяжіння фігури, підкреслений віссю абсцис і кривою розподілу цієї випадкової величини).

Центральним моментом k -го порядку випадкової величини x називають математичне очікування k -го степеня її відхилення від середнього значення [4]

$$\eta_k(x) = M[x - M[x]]^k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M[x])^k f(x) dx$$

Перший центральний момент завжди рівний 0

$$\eta_1(x) = M[x - M[x]] = M[x] - M[x] = 0$$

Другий центральний момент $\eta_2(x)$ характеризує розсіювання випадкової величини x , розкид її значень відносно центру групування і називається дисперсією $D[x]$

$$\eta_2(x) = M[x - M[x]]^2 = D[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M[x])^2 f(x) dx$$

Розмірність дисперсії відмінна від розмірності випадкової величини x , тому замість дисперсії часто застосовують додатній корінь з неї, який називають середнім квадратичним відхиленням (С.К.В) [4].

$$\text{СКВ} = \sigma[x] = \sigma_x = + \sqrt{D[x]}$$

Способи статистичного опису властивостей випадкових величин відносяться до їх нескінченної сукупності. Оскільки на практиці число спостережень n значень величини x обмежене, за даними такої випадкової вибірки $x_1, x_2 \dots x_n$ визначити дійсні значення невідомих параметрів розподілу m_x і σ_x неможливо. Замість їх визначаються тільки їх статистичні оцінки, які будучи функціями членів вибірки, відхиляються від дійсних значень відповідних параметрів.

Оцінкою дійсного значення математичного очікування випадкової величини x є середнє арифметичне вибірки [3, 4]

$$M[x] \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3)$$

При великому числі n значень випадкової величини x у вибірці, оцінки їх С.К.В. можна обчислювати за формулою [4]

$$\sigma_x \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}}$$

Для малих n застосовують формулу Бесселя, в яку вводиться поправочний множник для зменшення зсуву [4]

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}}$$

У практиці точних вимірювань найчастіше мають справу з нормальним розподілом результатів вимірювання (рис. 1.4) [4, 7].

Для цього розподілу функція щільності розподілу і інтегральна функція визначається виразами:

$$f_H(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}$$

$$F_H(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx$$

де σ_x і m_x - с.к.в. і мат. очікування випадкової величини x

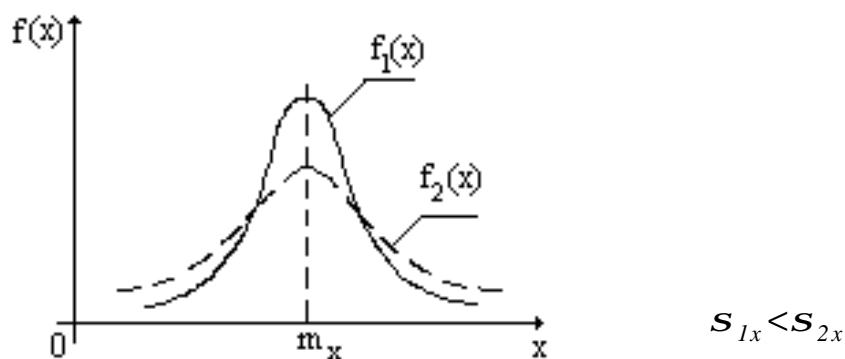


Рис. 1.4Щільність розподілу нормального закону

Особливості нормального розподілу[7]

1. Крива щільності розподілу симетрична щодо ординати, що проходить через точку m_x .
2. Крива має один максимум при $x=m_x$

$$f_H(x)_{\max} = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}}$$

3. При $|x| \rightarrow \infty$ гілки кривої асимптотично наближаються до осі абсцис.

$$4. \int_{-\sigma_x}^{+\sigma_x} f_H(x) dx = 0,683 \quad \int_{-3\sigma_x}^{+3\sigma_x} f_H(x) dx = 0,997$$

$$\int_{-2\sigma_x}^{+2\sigma_x} f_H(x) dx = 0,954 \int_{-\infty}^{+\infty} f_H(x) dx = 1$$

1.2.2 Оцінка точності вимірювання однієї величини

Нехай дійсне значення деякої величини, яке потрібно виміряти рівне a_0 . Для підвищення точності вимірювання a_0 проводять декілька (n) незалежних вимірювань. Внаслідок наявності неминучих похибок вимірювання, в кожному вимірі величинанабуває значення a , відмінного від a_0 . на величину похибки Δ_i

$$a_1 = a_0 + \Delta_1$$

$$a_2 = a_0 + \Delta_2$$

...

$$a_n = a_0 + \Delta_n$$

Вважатимемо, що похибки вимірювань обумовлені дією тільки випадкових чинників і є випадковими. З властивості випадкових похибок відомо, що середнє арифметичне випадкових похибок рівно нулю при достатньо великому числі вимірювань (1.1):

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0,$$

тому використовувати його для оцінки точності вимірювань не можна.

Найкращим критерієм є середня квадратична похибка, квадрат якої рівний середньому арифметичному квадратів окремих випадкових похибок

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2; \quad \Delta_i = a_i - a_0$$

Оскільки на практиці в більшості випадків значення a_0 невідомо (за винятком вимірювань в порівнянні з еталоном), середньоквадратична похибка визначається по формулі Бесселя [4, 8]

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}, \quad (1.4)$$

де як оцінка дійсного значення вимірюваної величини a_0 приймається її середньоарифметичне значення \bar{a} , тобто вважають $a_0 = \bar{a}$. Ця рівність тим точніше, чим більше n .

Важливою властивістю середньоквадратичної похибки є її надійність при обмеженому числі вимірювань.

Похибки вимірювань зазвичай підкоряються нормальному закону розподілу з параметрами (рис. 2.4)

$m_{\Delta} = 0$ – математичне очікування

σ_{Δ} – середньоквадратичне відхилення

$$f_{\text{H}}(\Delta) = \frac{1}{\sigma_{\Delta} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta - m_{\Delta})^2}{2\sigma_{\Delta}^2}} = \frac{1}{\sigma_{\Delta} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma_{\Delta}^2}}$$

Результат вимірювання також є в цьому випадку нормально розподіленою величиною ($a_i = a_0 + \Delta_i$) з параметрами

$$m_a = a_0 \approx \bar{a}$$

$$\sigma_a = \sigma_{\Delta}$$

$$f_{\text{H}}(a) = \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(a - m_a)^2}{2\sigma_a^2}} \approx \frac{1}{\sigma_{\Delta} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(a - \bar{a})^2}{2\sigma_{\Delta}^2}}$$

Як впливає з нормального закону розподілу, похибка вимірювання Δ величини a в окремих вимірюваннях з вірогідністю 0,997 не переверщує $\pm 3\sigma_a$ [7]. Це значення похибки приймається як максимальне

$$\Delta_{a \max} = \pm 3\sigma_a = \pm 3\sigma_{\Delta}$$

Практично всі результати окремих вимірювань величини a (99,7%) знаходяться в межах

$$(\bar{a} - 3\sigma_a) < a_i < (\bar{a} + 3\sigma_a) \quad (1.5)$$

Ті виміри a_i , похибка яких по абсолютному значенню перевершує $3\sigma_a$ відкидаються як явні викиди (рис. 1.5).

Таким чином як дійсне значення вимірюваної величини a_0 ми приймаємо середнє арифметичне значення, а оцінку точності проводимо за значенням S_a або $\Delta_{a \max}$.

1.2.3 Оцінка точності визначення середнього арифметичного

Оскільки число вимірів n зазвичай обмежене, то рівність $\bar{a} = a_0$ не виконується точно, а середнє арифметичне \bar{a} випадковою величиною з характеристиками [9]:

$$m_{\bar{a}} = a_0 \quad \text{мат. очікування}$$

$$\sigma_{\bar{a}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_a \quad \text{середньоквадратичне відхилення}$$

З виразу $\sigma_{\bar{a}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_a$ витікає, що при одній і тій же точності окремих вимірювань σ_a значення $\sigma_{\bar{a}}$, зменшується із збільшенням числа вимірів пропорційно корню квадратному з n .

У межі

$$n \rightarrow \infty$$

$$\sigma_{\bar{a}} \rightarrow 0$$

$$\bar{a} \rightarrow a_0$$

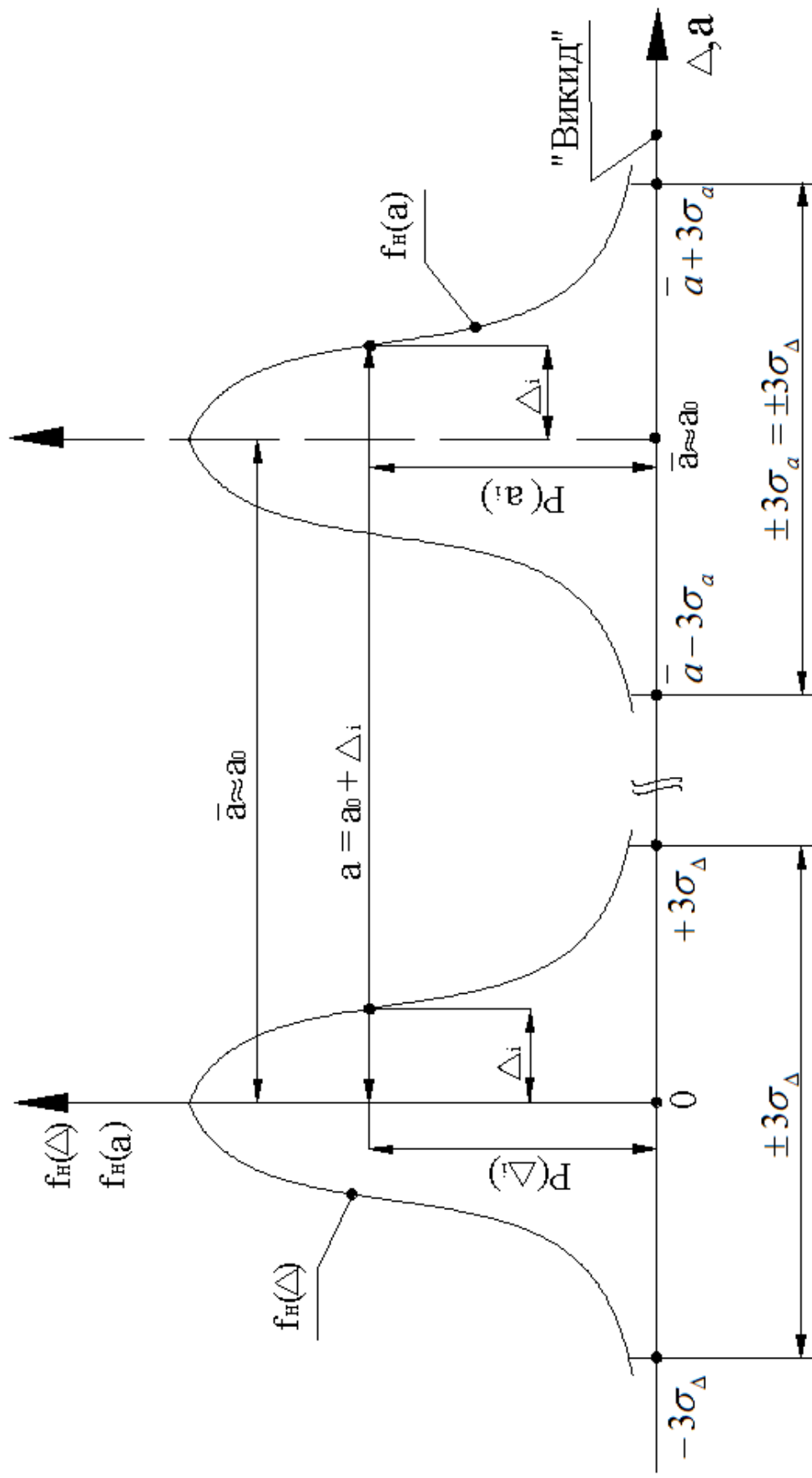


Рис. 1.5 Розподіл результату вимірювання однієї величини

Для оцінки абсолютної похибки $\Delta_a = |\bar{a} - a_0|$ користуються поняттям довірчого інтервалу I_β і довірчої вірогідності β [3, 4].

Довірчим інтервалом $I_\beta(a)$, відповідним довірчій вірогідності β називається інтервал завдовжки $2\Delta_\beta$, центром якого є обчислене значення середнього арифметичного \bar{a} і всередині якого з вірогідністю β знаходиться дійсне значення вимірюваної величини a_0 (рис. 1.6).

$$I_\beta(a) = 2\Delta_\beta$$

$$(\bar{a} - \Delta_\beta) < a_0 < (\bar{a} + \Delta_\beta) \quad (1.6)$$

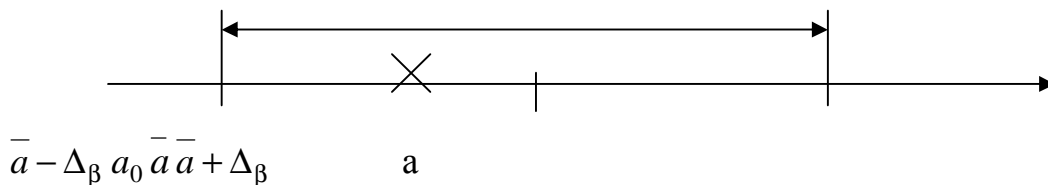


Рис. 1.6 Довірчий інтервал

Іншими словами, вірогідність P того, що абсолютна похибка $|\bar{a} - a_0| = \Delta_a$, не перевершить Δ_β , рівна довірчій вірогідності β

$$P(|\bar{a} - a_0| = \Delta_a \leq \Delta_\beta) = \beta.$$

Довірчий інтервал характеризує абсолютну похибку Δ_β визначення a_0 за значенням \bar{a} , а довірна вірогідність – відповідну точності гарантійну надійність. По даній довірчій вірогідності β можна визначити довірчий інтервал і навпаки. Залежно від важливості вимірювань, що проводяться, довірна вірогідність β приймається рівною 0,5; 0,6; ... 0,9; 0,99.

Абсолютну похибку Δ_β зазвичай виражають через відносну довжину довірчого інтервалу t_β [3]

$$\Delta_{\beta} = t_{\beta} \sigma_{\bar{a}} = t_{\beta} \frac{\sigma_a}{\sqrt{n}}$$

Для обмеженого числа вимірювань ($n < 10$) для визначення значення t_{β} і заданій вірогідності β , користуються законом розподілу Стюдента [5]

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{\beta} &= t_{\beta} \frac{\sigma_a}{\sqrt{n}} \\ \Delta_{\beta} &= |\bar{a} - a_0| \end{aligned} \right\}, \quad |\bar{a} - a_0| = t_{\beta} \frac{\sigma_a}{\sqrt{n}}, \quad t_{\beta} = \frac{|\bar{a} - a_0|}{\sigma_a} \sqrt{n}. \quad (1.7)$$

Для цього закону розраховані таблиці вірогідності з двома входами – β і $n - 1$, за допомогою яких по заданій довірчій вірогідності β і числу вимірювань n визначається відносний довірчий інтервал t_{β} (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Закон розподілу Стюдента

$\beta \backslash n-1$	0,1	0,2	0,3
1	0,158	0,325	0,510
2	0,142	0,289	0,445
3	0,137	0,277	0,224

... (Повністю таблиця 1.1 приводиться в додатку)

При достатньо великому числі вимірювань n користуються нормальним законом розподілу.

В інженерній практиці найчастіше для вказівки точності вимірювання величини a замість довірчого інтервалу застосовують запис вигляду

$$a_0 = \bar{a} \pm 3\sigma_{\bar{a}}, \quad (1.8)$$

який справедливий з ймовірністю 0,997.

1.2.4 Оцінка точності непрямих вимірювань

При непрямих вимірюваннях, величини a, b, \dots, r є даними для визначення за допомогою обчислень деякої величини R , яка є відомою функцією a, b, \dots, r [8]

$$R = f(a, b, \dots, r)$$

В цьому випадку виникає необхідність у визначенні похибки ΔR , обумовленої похибками вимірювання величин $a, b, \dots, r - \Delta a, \Delta b, \dots, \Delta r$.

Вимірні значення величин a, b, \dots, r можна представити у вигляді:

$$a = a_0 + \Delta a$$

$$b = b_0 + \Delta b$$

$$r = r_0 + \Delta r$$

Тоді:

$$R = f[(a_0 + \Delta a), (b_0 + \Delta b), \dots, (r_0 + \Delta r)]$$

Розкладаючи функцію R в ряд Тейлора по ступенях $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta r$, отримуємо:

$$R = f(a_0, b_0, \dots, r_0) + \left(\frac{df}{da} \Delta a + \frac{df}{db} \Delta b + \dots + \frac{df}{dr} \Delta r \right) + (\text{члени вищих порядків})$$

У розкладі, зважаючи на малу величину похибок $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta r$, можна знехтувати членами другого і вищих порядків малих величин.

Тоді, якщо R_0 – дійсне значення величини R , то:

$$R_0 = f(a_0, b_0, \dots, r_0),$$

а похибка ΔR буде рівна:

$$\Delta R = R - R_0 = \frac{df}{da} \Delta a + \frac{df}{db} \Delta b + \dots + \frac{df}{dr} \Delta r$$

Власні похідні $\frac{df}{da}, \frac{df}{db}, \dots, \frac{df}{dr}$ називають коефіцієнтами впливу

похибок вимірювання (первинних похибок) $\Delta a, b, r$ [4]. Власні похідні

функції R повинні обчислюватися для дійсних значень параметрів a_0, b_0, \dots, r_0 , від яких вони залежать:

$$\frac{df}{da} = f'_a(a_0, b_0, \dots, r_0)$$

$$\frac{df}{db} = f'_b(a_0, b_0, \dots, r_0)$$

$$\frac{df}{dr} = f'_r(a_0, b_0, \dots, r_0)$$

Проте на практиці дійсні значення вимірних величин a_0, b_0, \dots, r_0 невідомі, тому коефіцієнти впливу обчислюють для середніх значень вимірних параметрів $\bar{a}, \bar{b}, \dots, \bar{r}$, які відрізняються від дійсних значень на величину того ж порядку що і похибки вимірювання [1]

$$\frac{d\bar{f}}{d\bar{a}} = f'_a(\bar{a}, \bar{b}, \dots, \bar{r})$$

$$\frac{d\bar{f}}{d\bar{b}} = f'_b(\bar{a}, \bar{b}, \dots, \bar{r}) \quad (1.9)$$

$$\frac{d\bar{f}}{d\bar{r}} = f'_r(\bar{a}, \bar{b}, \dots, \bar{r})$$

Це приводить до появи невеликих похибок другого порядку у формулі ΔR , що неістотно, оскільки ΔR обчислюється також з точністю до незначних величин другого порядку. Оскільки похибки вимірювання $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta r$ є випадковими величинами, то величина R і похибка її обчислення ΔR є також випадковими величинами. Тому за дійсне значення величини R приймають її найбільш вірогідне значення

$$R_0 \approx \bar{R} = f(\bar{a}, \bar{b}, \dots, \bar{r}) \quad (1.10)$$

де:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i,$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i,$$

...

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i,$$

а точність її обчислення оцінюють середньоквадратичною похибкою $\sigma_{\bar{R}}$, у якій значення $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta r$ замінені середніми квадратичними похибками [6]

$$\sigma_{\bar{R}} = \sqrt{\left(\frac{d\bar{f}}{da}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{d\bar{f}}{db}\right)^2 \sigma_b^2 + \dots + \left(\frac{d\bar{f}}{dr}\right)^2 \sigma_r^2} \quad (1.11)$$

де:

$$\sigma_{\bar{a}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_a, \quad \sigma_a = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2},$$

$$\sigma_{\bar{b}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_b, \quad \sigma_b = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2},$$

...

$$\sigma_{\bar{r}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_r, \quad \sigma_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}.$$

Значення $\sigma_{\bar{a}}, \sigma_{\bar{b}}, \dots, \sigma_{\bar{r}}$ характеризують точність визначення дійсних значень a_0, b_0, \dots, r_0 .

При нормальному законі розподілу похибок вимірювання з вірогідністю 0,997:

$$a_0 = \bar{a} \pm 3\sigma_{\bar{a}},$$

$$b_0 = \bar{b} \pm 3\sigma_{\bar{b}},$$

$$r_0 = \bar{r} \pm 3\sigma_{\bar{r}}.$$

Відповідно дійсне значення величини R визначається з вірогідністю

$$0,683 \quad R_0 = \bar{R} \pm \sigma_{\bar{R}},$$

$$0,954 \quad R_0 = \bar{R} \pm 2\sigma_{\bar{R}},$$

$$0,997 \quad R_0 = \bar{R} \pm 3\sigma_{\bar{R}}.$$

Ступінь впливу первинних похибок $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta r$ вимірювання величин a, b, \dots, r на точність обчислення значення R визначається відносною часткою кожного доданку у формулі для $\sigma_{\bar{R}}$ [4]

$$\begin{aligned} K_a &= \frac{1}{\sigma_{\bar{R}}^2} \left(\frac{d\bar{f}}{da} \right)^2 \sigma_a^2 100\%, \\ K_b &= \frac{1}{\sigma_{\bar{R}}^2} \left(\frac{d\bar{f}}{db} \right)^2 \sigma_b^2 100\%, \\ K_r &= \frac{1}{\sigma_{\bar{R}}^2} \left(\frac{d\bar{f}}{dr} \right)^2 \sigma_r^2 100\%. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Для підвищення точності визначення значення R_0 (зменшення $\sigma_{\bar{R}}$) необхідно в першу чергу підвищувати точність вимірювання однієї з величин a, b, \dots, r коефіцієнт K яких має найбільше значення.

Розглянута методика справедлива, коли вимірювання величин a, b, \dots, r проводиться незалежно один від одного.

1.3 Приклади оцінки точності вимірювань

1.3.1 Приклад оцінки точності вимірювання однієї величини

Розглянемо послідовність обробки і оцінки точності вимірів одної величини на конкретному прикладі.

В результаті семи прямих вимірів діаметра світловодного волокна d отримані наступні значення в (мм): 2,475; 2,525; 2,527; 2,590; 2,493; 2,532; 2,498. Визначити справжнє значення діаметра волокна, оцінити точність вимірювань. Знайти похибку визначення справжнього діаметра волокна (довірчий інтервал) при довірчій ймовірності $\beta=0,6$.

Порядок розрахунків.

1. Складаємо розрахункову таблицю (табл. 1.2) для значень діаметра волокон d_i , над якими ведуться спостереження. В таблиці приведені значення діаметра, різниці $\Delta_i = d_i - \bar{d}$ та Δ_i^2 .

Таблиця 1.2

i	d_i	$\Delta_i = d_i - \bar{d}$	Δ_i^2
1	2,475	-0,045	0,002025
2	2,525	+0,005	0,000025
3	2,527	+0,007	0,000049
4	2,590	+0,070	0,004900
5	2,493	-0,027	0,000729
6	2,532	+0,012	0,000144
7	2,498	-0,022	0,000484
Σ	17,640	0,000	0,008356

Визначаємо середнє арифметичне значення діаметра волокна за формулою (1.3):

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{1}{7} \cdot 17,640 = 2,520 \text{ мм.}$$

Прийmemo реальне значення діаметра волокна рівним:

$$d_0 = \bar{d} = 2,520 \text{ мм.}$$

2 Визначаємо характеристики точності вимірювань, для чого розраховуємо різницю $\Delta_i = d_i - \bar{d}$. Сума цієї різниці повинна бути рівна нулю або близькою до нього (при округленні значень d).

Підносимо різницю до квадрату, підраховуємо їхню суму і середньоквадратичне відхилення похибки вимірювання діаметра волокна за формулою (1.4):

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n \Delta_i^2} = \sqrt{\frac{1}{6} \cdot 0.008356} = 10^{-1} \cdot 0.374 = 0.0374 \text{ мм.}$$

Максимальна похибка вимірювання d згідно з (1.5) може досягати значення:

$$\Delta_{dmax} = \pm 3\sigma_d = \pm 0.112 \text{ мм,}$$

де σ_d і Δ_{dmax} характеризують точність пристрою, за допомогою якого виконувалося вимірювання (припускається, що форма січення волокна кругла, пороговою невідповідністю можна знехтувати).

3. Знаходимо похибку визначення \bar{d} при довірчій вірогідності $\beta=0,6$.

Обчислюємо середньоарифметичне відхилення \bar{d} по формулі:

$$\sigma_{\bar{d}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sigma_d = \frac{0.0374}{\sqrt{7}} = 0.0141 \text{ мм.}$$

Визначаємо відносну довжину інтервалу t_β по значенням довірчої вірогідності $\beta=0,6$ і числу степенів волі $n-1=7-1=6$ за допомогою таблиці додатку:

$$t_{0,6} = t_\beta(0.6;6) = 0.906.$$

Виразуємо абсолютну похибку визначення \bar{d} за формулами (1.6-1.8):

$$\Delta_{0,6} = t_{0,6} \cdot \sigma_{\bar{d}} = 0.906 \cdot 0,0141 = 0,0128 \text{ мм.}$$

Таким чином, з ймовірністю 0,6 явне значення діаметра d_0 відрізняється від прийнятого $\bar{d}=2,520\text{мм}$ на величину не більше, ніж $0,0128\text{мм}$.

Довірчий інтервал відповідно до (1.9) має вигляд:

$$I_{0,6}(d)=(\bar{d}-\Delta_{0,6}<d_0<\bar{d}+\Delta_{0,6})=(2.5072<d_0<2.5328)\text{мм}.$$

1.3.2 Приклад оцінки точності непрямих вимірювань

Виконуються вимірювання фокусної відстані оптичної системи методом збільшення.

Значення передньої фокусної відстані оптичної системи розраховують за формулою:

$$f=(l'/l)x,$$

де l – величина предмета; l' – величина зображення; x – відстань від переднього фокуса системи до предмета.

В результаті вимірювань отримані значення величини l', l та x (в мм), представлені в розрахунковій таблиці (табл. 1.3).

Визначити значення фокусної відстані, оцінити точність цього значення, ступінь впливу первинних похибок, визначити довірчий інтервал з ймовірністю 0,6.

Таблиця 1.3

i	l_i	l'_i	x_i
1	20.07	38.21	52.19
2	19.95	38.38	52.62
3	20.03	38.19	52.45
4	19.90	38.35	52.71
5	20.05	38.37	52.56

1. Розраховуємо середнє значення виміряних величин за формулою (1.3):

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_1^n l_i = \frac{1}{5} \cdot 100.0 = 20.0 \text{ мм},$$

$$\bar{l}' = \frac{1}{n} \sum_1^n l'_i = \frac{1}{5} \cdot 191.5 = 38.3 \text{ мм},$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_1^n x_i = \frac{1}{5} \cdot 262.5 = 52.5 \text{ мм}.$$

2. Розраховуємо за формулою (1.4) середньоквадратичне відхилення вимірних величин, для чого складаємо розрахункову таблицю (табл. 1.4):

Таблиця 1.4

i	$\Delta l_i = l_i - \bar{l}$	$(\Delta l_i)^2$	$\Delta l'_i = l'_i - \bar{l}'$	$(\Delta l'_i)^2$	$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$	$(\Delta x_i)^2$
1	0,07	0,0049	-0,09	0,0081	-0,31	0,0961
2	-0,05	0,0025	0,08	0,0064	0,12	0,0144
3	0,03	0,0009	-0,11	0,0121	-0,08	0,0064
4	-0,10	0,0100	0,05	0,0025	0,21	0,0441
5	0,05	0,0025	0,07	0,0049	0,06	0,0036
Σ	0	0,0208	0	0,0340	0	0,1646

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\Delta l_i)^2} = \sqrt{\frac{0.0208}{4}} = 0.072 \text{ мм},$$

$$\sigma_{l'} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\Delta l'_i)^2} = \sqrt{\frac{0.0340}{4}} = 0.092 \text{ мм},$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\Delta x_i)^2} = \sqrt{\frac{0.1646}{4}} = 0.203 \text{ мм}.$$

$\sigma_{l'}$, σ_l , σ_x характеризують точність окремих вимірних величин l' , l та x .

3. Розраховуємо середньоквадратичне відхилення для \bar{l} , \bar{l}' та \bar{x} за формулою (1.6):

$$\sigma_{\bar{l}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_l = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot 0.072 = 0.032 = 3.2 \cdot 10^{-2} \text{ мм},$$

$$\sigma_{\bar{l}'} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_{l'} = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot 0.092 = 0.041 = 4.1 \cdot 10^{-2} \text{ мм},$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_x = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot 0.203 = 0.091 = 9.5 \cdot 10^{-2} \text{ мм}.$$

4. Знаходимо величину фокусної відстані системи за формулою (1.10):

$$f_0 \cong \bar{f} = \frac{\bar{l}'}{\bar{l}} \cdot \bar{x} = \frac{38.3}{20.0} \cdot 52.5 = 100.54 \text{ мм}.$$

5. Визначаємо $\sigma_{\bar{f}}$, для чого спочатку розраховуємо власну похідну за формулою (1.9):

$$\frac{df}{dl} = -\frac{l' \cdot x}{l^2}; \quad \left(\frac{d\bar{f}}{dl}\right) = -\frac{\bar{l}' \cdot \bar{x}}{\bar{l}^2} = -\frac{38.3 \cdot 52.5}{400} = -5.025,$$

$$\frac{df}{dl'} = -\frac{x}{l}; \quad \left(\frac{d\bar{f}}{dl'}\right) = \frac{\bar{x}}{\bar{l}} = \frac{52.5}{20} = 2.625,$$

$$\frac{df}{dx} = -\frac{l'}{l}; \quad \left(\frac{d\bar{f}}{dx}\right) = \frac{\bar{l}'}{\bar{l}} = \frac{38.3}{20} = 1.915.$$

А також їхні квадрати:

$$\left(\frac{d\bar{f}}{dl}\right)^2 = 25.30; \quad \left(\frac{d\bar{f}}{dl'}\right)^2 = 6.90; \quad \left(\frac{d\bar{f}}{dx}\right)^2 = 3.66.$$

Згідно з формулою (1.11):

$$\begin{aligned} \sigma_{\bar{f}}^2 &= \left(\frac{d\bar{f}}{dl}\right)^2 \cdot \sigma_l^2 + \left(\frac{d\bar{f}}{dl'}\right)^2 \cdot \sigma_{l'}^2 + \left(\frac{d\bar{f}}{dx}\right)^2 \cdot \sigma_x^2 = \\ &= 25.30 \cdot 10.5 \cdot 10^{-4} + 6.90 \cdot 16.7 \cdot 10^{-4} + 3.66 \cdot 82.8 \cdot 10^{-4} = 10^{-4} \cdot (266 + 115 + 303) = 684 \cdot 10^{-4} \text{ мм} \end{aligned}$$

Звідки $\sigma_{\bar{f}} = \sqrt{684} \cdot 10^{-2} = 26,2 \cdot 10^{-2} = 0,262 \text{ мм}$

6. Ступінь впливу первинних похибок визначаємо за формулою (1.12):

$$K_l = \frac{1}{\sigma_{\bar{f}}^2} \left(\frac{d\bar{f}}{dl} \right)^2 \sigma_l^2 100\% = \frac{266}{684} \cdot 100 = 38.8\% ,$$

$$K_{l'} = \frac{1}{\sigma_{\bar{f}}^2} \left(\frac{d\bar{f}}{dl'} \right)^2 \sigma_{l'}^2 100\% = \frac{115}{684} \cdot 100 = 16.8\% ,$$

$$K_x = \frac{1}{\sigma_{\bar{f}}^2} \left(\frac{d\bar{f}}{dx} \right)^2 \sigma_x^2 100\% = \frac{303}{684} \cdot 100 = 44.4\% .$$

Найбільшу роль в похибці розрахунку \bar{f} має первинна похибка Δx (44.4%) і, в основному, за рахунок малої точності вимірювання x ($\sigma_x \approx 2\sigma_{l'}$).

Значне підвищення точності визначення фокусної відстані системи може бути досягнуто за рахунок збільшення точності вимірювання x та l .

7. Визначаємо довірчий інтервал для f при довірчій вірогідності $\beta=0.6$ за формулою (1.7):

$$\Delta_{\beta} = t_{\beta} \cdot \sigma_{\bar{f}} .$$

По таблиці t_{β} додатку для $\beta=0.6$ та $n-1=4$ знаходимо $t_{\beta}(0.6,4)=0.941$ та $\Delta_{\beta}=0.941 \cdot 0.262=0.246$.

Тобто, $f_0 = \bar{f} \pm \Delta_{\beta} \approx 100.54 \pm 0.246$ мм з вірогідністю 0.6.

Крім того

$$f_0 = \bar{f} \pm \sigma_{\bar{f}} = 100.54 \pm 0.262 \text{ мм при } \beta=0.689,$$

$$f_0 = \bar{f} \pm 2\sigma_{\bar{f}} = 100.54 \pm 0.524 \text{ мм при } \beta=0.952,$$

і практично достовірно, що $f_0 = \bar{f} \pm 3\sigma_{\bar{f}} = 100.54 \pm 0.786$ мм.

Остаточо, для інженерних робіт, результат вимірювання представляємо у вигляді:

$$f = 100.54 \pm 0.79 \text{ мм} .$$

1.4 Контрольні запитання та завдання

1. Як визначається точність в метрології?
2. Які є методи прямих вимірювань?
3. Які ви знаєте види похибок? Які похибки мають місце при вимірюванні заломного кута призми автоколімайним методом за наявності невеликої сферичності бічної грані? Обґрунтуйте вашу відповідь.
4. Як визначити максимальну похибку вимірювального приладу («порогову чутливість»)?
5. Поясніть поняття довірчого інтервалу та довірчої ймовірності. В яких випадках його використовують?
6. В результаті восьми прямих вимірювань кута повороту площини поляризації кварцовою пластинкою отримані наступні значення: 101,5; 101,4; 101,5; 101,6; 101,5; 101,7; 101,6; 101,5. Визначте значення кута повороту, оцініть точність вимірювань. Знайдіть довірчий інтервал при $\beta = 0,8$.
7. В повітряному проміжку між плоско паралельною пластиною та плоско-випуклою лінзою в монохроматичному світлі ($\lambda = 0,69 \text{ мкм}$) спостерігається інтерференційна картина – кільця Ньютонів. В результаті семи вимірів діаметру темного кільця ($m = 3$) отримані наступні значення: 22,54; 22,56; 22,53; 22,48; 22,5; 22,56; 22,5. Враховуючи, що спостереження відбувались у відбитому світлі, визначте радіус кривизни лінзи та оцініть точність вимірювань.

2 Геометричні вимірювання

В оптичних і оптико-електронних вимірювальних приладах застосовують візуальну, фотографічну і оптико-електронну реєстрацію вимірюваної інформації.

Візуальна реєстрація

забезпечує досить високу точність при простій схемній реалізації, зручність і наочність при початковій установці і устаткуванні, надійність і довговічність приладу. Однак вона застосовується тільки у видимій області спектру, вимагає тривалого часу для зняття відліку, схильна до помилок оператора і виключає автоматизацію процесу вимірювання.

Фотографічна реєстрація дозволяє обробляти і документувати одночасно великий об'єм вимірювальної інформації у видимій, ближній УФ та ближній ІЧ областях спектру (спектрограф) з досить високою точністю, але вимагає застосування спеціальних процесів і технічних засобів для обробки фотоматеріалів, займає багато часу, ускладнює автоматизацію процесу вимірювання.

Оптико-електронна реєстрація застосовується у всіх областях спектру, характеризується високою чутливістю, точністю, дуже малою постійною часу, легко автоматизується і комп'ютеризується. Однак вимагає складних електронних систем і викликає труднощі при початковій установці і устаткуванні.

Перспективним і широко застосованим у даний час методом є об'єднання в одному приладі візуальної і оптико-електронної реєстрації. При цьому в стадії налаштування використовується візуальний канал, а для робочих вимірювань - оптико-електронний.

2.1 Візуальні геометричні вимірювання

2.1.1 Око як елемент вимірювального пристрою. Метрологічні характеристики зору

При роботі ока спільно з вимірювальними приладами проявляються всі його основні властивості[10]: акомодація, адаптація, роздільна здатність, контрастна чутливість і т.і.

Акомодація - властивість ока розглядати предмети, які перебувають на різних відстанях. Акомодація залежить від віку $[0 - 10D$ (20 років), $0 - 2,5D$ (60 років)]. Для “середнього” (нормального) ока величина акомодації приймається $0-4D$ або $\infty \div 250$ мм. Відстань 250 мм (l_0) найбільш зручна для розглядання предмету без напруги і називається відстанню найкращого бачення.

Гострота акомодації - глибина різкого зображення. Для нормального ока при величині зіниці 2 мм гострота акомодації $\approx \pm 0,3D$.

Адаптація - властивість ока пристосовуватись до різної яскравості (рівня освітленості). В залежності від яскравості об'єкта діаметр зіниці змінюється від 0,2 до 8 мм. Темнова адаптація протікає порівняно повільно. Темновий поріг чутливості досягається через 40-60 хв. після початку перебування в цілковитій темряві. Світлова адаптація проходить за 30 сек[6].

При вимірах необхідно прагнути досягти однакової освітленості відлікової шкали зображення предмета. Оптимальна освітленість для вимірів складає $50 \div 250$ лк.

Контрастна чутливість - здатність ока відчувати мінімальну різницю яскравості порівнювальних полів L_1 і L_2 , розташованих поруч. Контрастна чутливість залежить від яскравості, кольору, форми, інших характеристик полів зрівняння і складає 1-2 % при яскравості від 5 до 250 кд/м². (рис. 2.1).

Роздільна здатність (гостротазору) –це найменший кут, під яким роздільно видно два близько розташованих предмета[6]. Залежить від діаметра вхідної зіниці, освітленості предмета його форми. Визначається розміром колбочок (5 мкм) на сітківціока. (рис. 2.2).

При зменшенні або збільшенні діаметра зіниціока від 2 мм роздільна здатність зменшується. Якщо діаметр зіниціока менше 1 мм, то роздільна здатність зменшується через дифракцію світла, а більше 2 мм - в результаті впливу сферичної хроматичної аберації розсіяння світла всерединіока.

Роздільна здатність ідеальної оптичної системи

$$\Psi = \frac{140''}{D} \quad (2.1)$$

Для нормального ока при освітленості 50...250 лк і діаметрі зіниці 2 мм гострота зору (Ψ) згідно з (2.1) складає 60''.

В особливих випадках при розгляданні одиночних предметів (зірки на небі) гострота зору зростає до 2...2,5''.

Величина поля різкого бачення нерухомого ока дорівнює 4° або 17 мм в просторі предметів на відстані найкращого бачення ($I_0 = 250$ мм).

Всі оптичні вимірювання зводяться до поперечного і повздовжнього наведення перехрестя або іншого відлікового пристрою на шкалу або контрольований об'єкт із натиї відліків з шкал. Точність наведення визначається властивостями ока, параметрами оптичної системи, типом шкали і формою контрольованого об'єкта.

Емпірично встановлено, що при поперечній установці досягається наступна точність [1, 6]:

- наведення сітки на об'єкт довільної форми - 30 – 60'' (рис. 2.3а);
- наведення індексу на шкалу іоніусна установка - 10 – 15'' (рис. 2.3б)
- бісекторна установка - 6 – 8'' (рис. 2.3в).

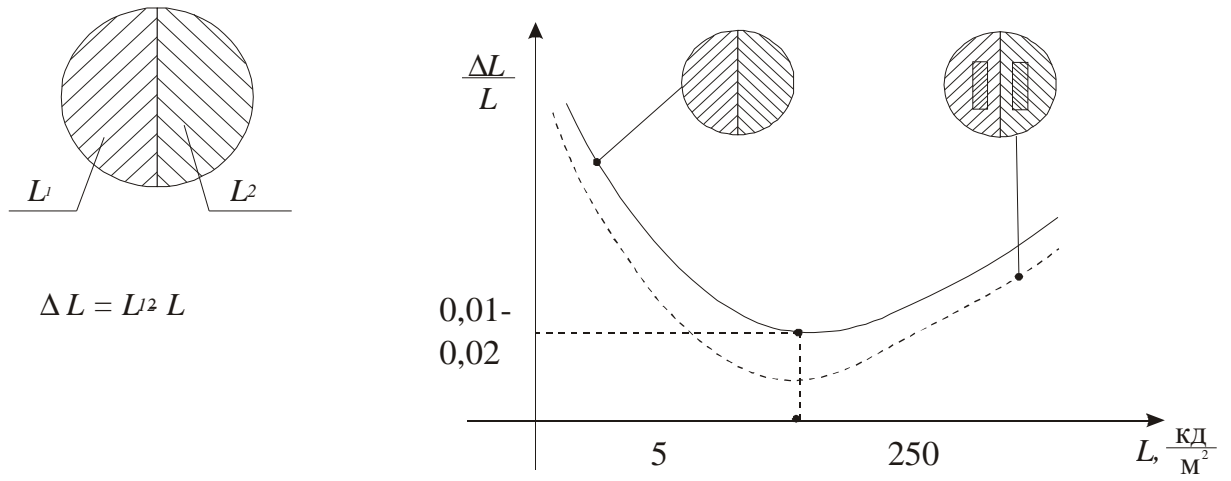


Рис. 2.1 Контрастна чутливість ока

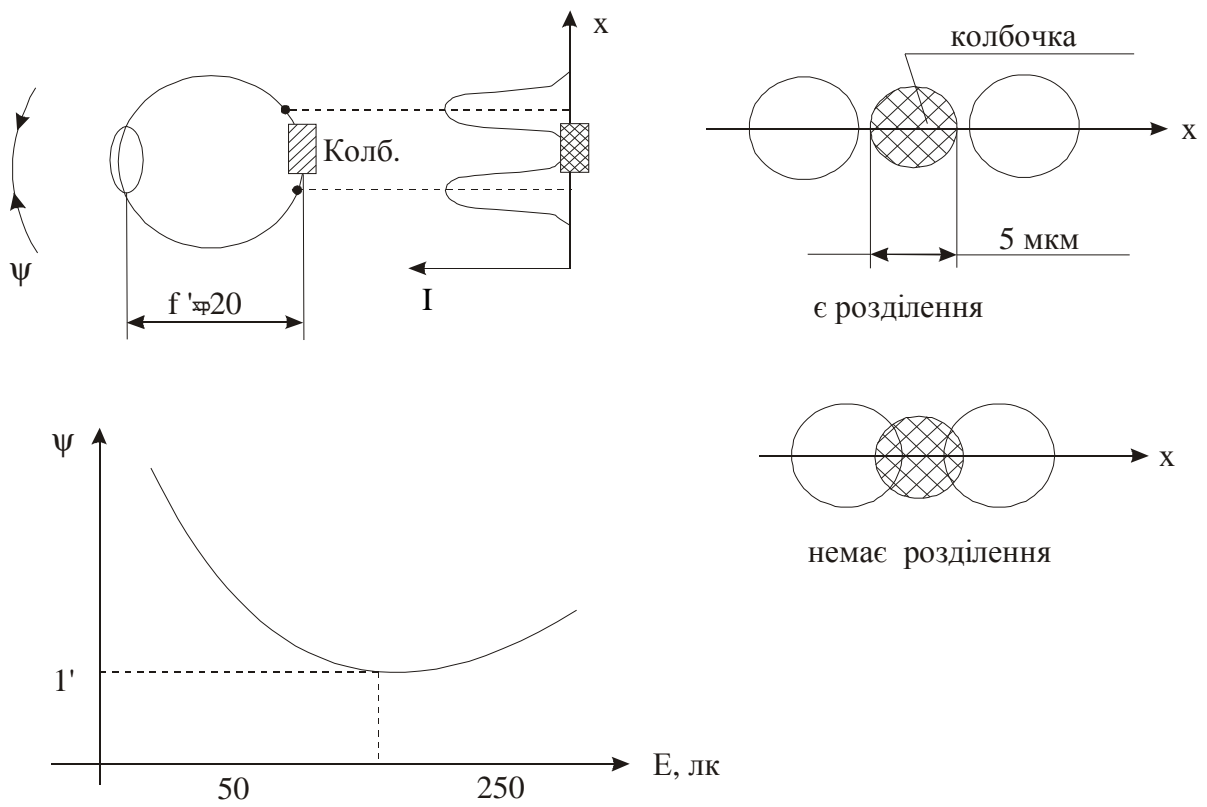


Рис. 2.2 Роздільна здатність ока

При роботі каспільноз оптичною системою, збільшення якої дорівнює G раз більше (помилка наведення в G раз менше).

Чутливість поперечної наводки виявляється в середньому в 5...6 раз вище роздільної здатності ока. Це пояснюється тим, що поняття роздільної здатності справедливо для двох точкових зображень, побудованих на сітківці визначається діаметром колбочок.

В горизонтальному напрямі центри подальшого ряду колбочок здвинуті, тому взаємний здвиг штрихів розпізнається ще і тоді, коли відстань між їх зображеннями на сітківці менше діаметра колбочок.

Найбільш точною є бісекторна установка, при якій використовується особлива властивість зору оцінка 0,1-0,05 інтервалу шкали в том випадку, якщо видима довжина інтервалу складає 1,5-2 мм.

Для розмірів штрихів і шкал рекомендується наступне відношення (рис. 2.4).

2.1.2 Мікроскопічні вимірювання

Вимірювальний мікроскоп його характеристики. Оптична система вимірювального мікроскопа складається з трьох компонентів – об'єктива, окуляра і сітки (системи сіток) відлікової системи (рис. 2.5)[11-13].

Предмет (шкала) знаходиться перед об'єктивом на відстані декілька більшої, чим $f_{об}$. Об'єктив створює дійсне, збільшене і перевернуте зображення предмета в передній фокальній площині окуляра. Це проміжне зображення є предметом для окуляра. Окуляр дає уявне збільшене зображення предмета в безкінечності.

В передній фокальній площині окуляра розташована сітка, яку видно в окуляр одночасно з зображенням об'єкта, що дає можливість по шкалі сітки визначити його розміри.

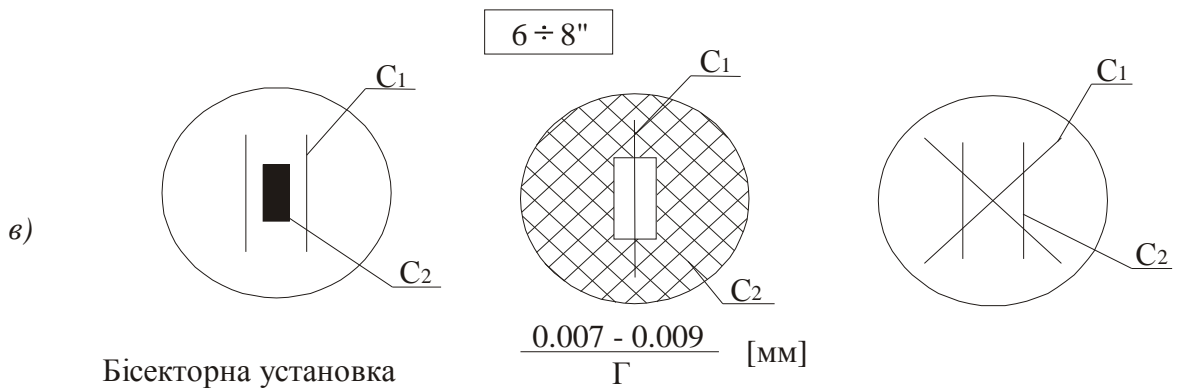
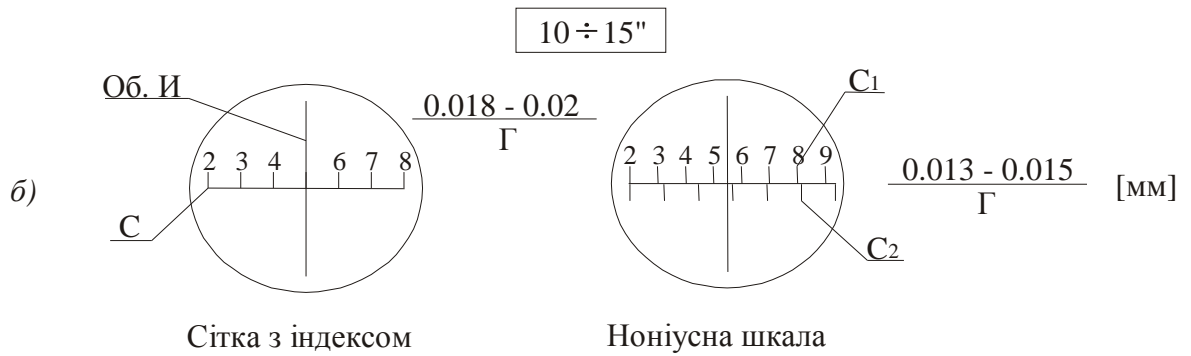
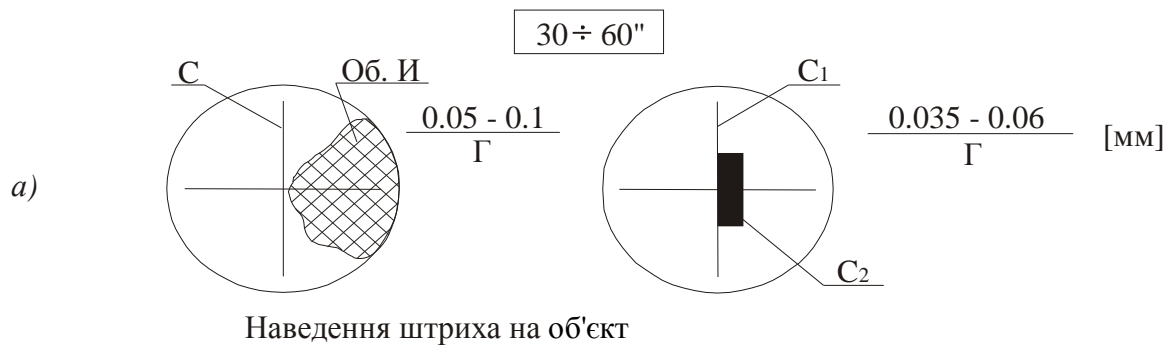
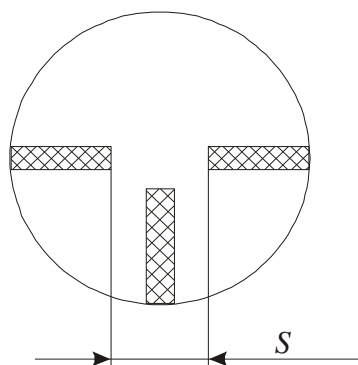


Рис. 2.3 Точність поперечної установки

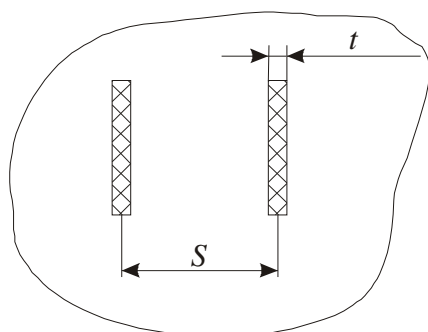


$$S = \frac{nf'}{1000}$$

n - кутова ціна розриву в тисячних дистанції (0,003-0,004)

f' - фокусна відстань системи до сітки

Розрив візирної сітки



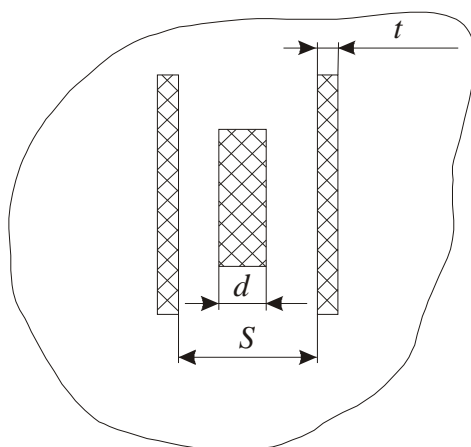
$$S = \frac{1,5-2}{\Gamma} \text{ [мм]}$$

$$t = f_{ок'} \cdot \Psi \text{ [мм]}$$

$$\left. \begin{array}{l} f_{ок'} = 25 \text{ мм} \\ \Psi = 1' \end{array} \right\} t = 0,007 \text{ мм}$$

Приймають $t = 0,008-0,02 \text{ мм}$

Ціна поділки і ширина штриха



$$S = (2 \div 3)d = \frac{2}{\Gamma} \text{ [мм]}$$

$$t = \frac{d}{3} \text{ [мм]}$$

Бісекторна установка

Рис. 2.4 Рекомендовані розміри штрихів

При цьому дійсний розмір об'єкта буде в $\beta_{об}$ раз менше, виміряного по сітці ($\beta_{об}$ - збільшення об'єктива).

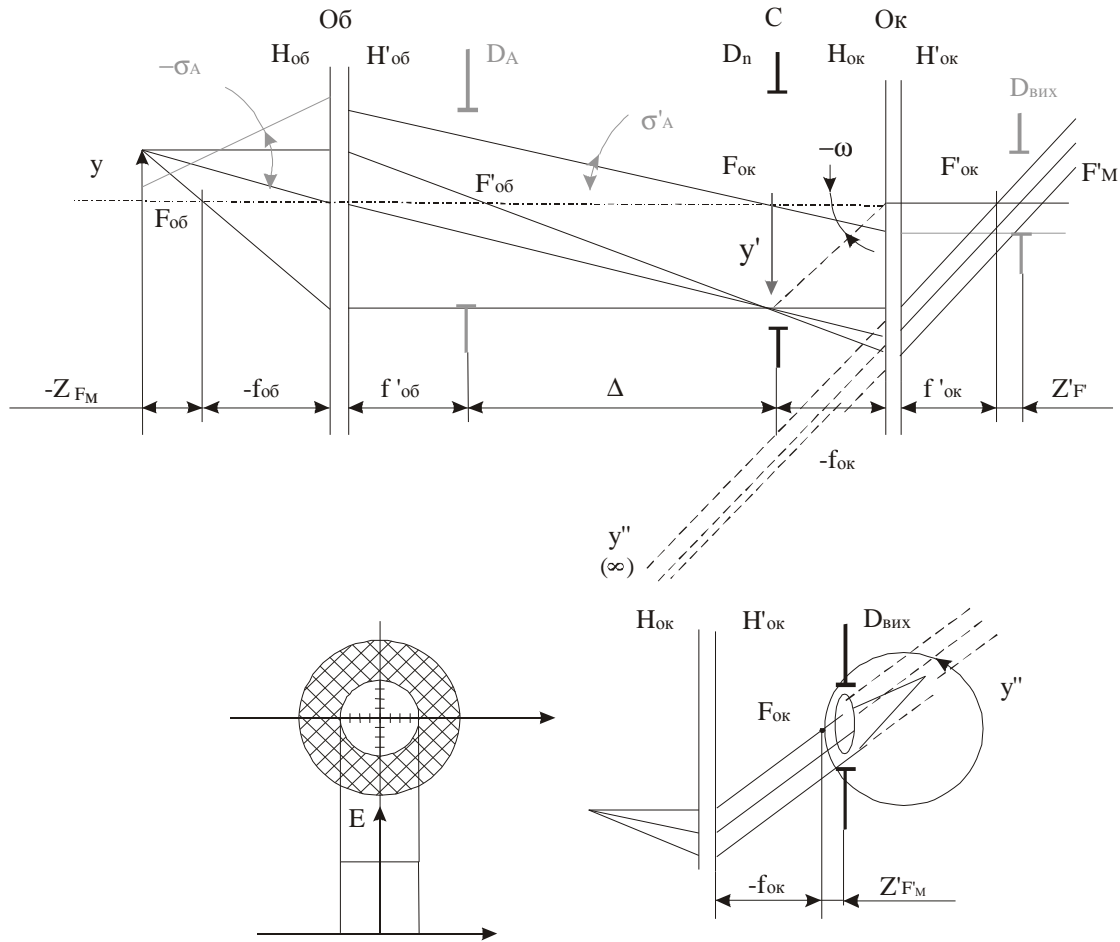


Рис. 2.5 Принципова оптична схема мікроскопа.

Відстань між заднім фокусом об'єктива і переднім фокусом окуляра Δ називається оптичною довжиною тубуса мікроскопа (рис. 2.6)[11, 12]. Для кожного об'єктива величина Δ має своє значення в межах 150-200 мм. Для того щоб втримати цю відстань, положення об'єктива при його встановленні в мікроскоп фіксується нижнім зрізом тубуса мікроскопа, в який упирається оправа об'єктива. На верхній зріз тубуса опирається оправа окуляра. Відстань від нижнього до верхнього зрізу тубуса називається механічною довжиною тубуса. Вона стандартизована (160-

190 мм). Номіналізбільшень, вказані на оправі об'єктива, відповідають реальним тільки при стандартній довжині тубуса. В всіх інших випадках збільшення об'єктива повинно бути визначено.

В об'єктивів малих збільшень апертурною діафрагмою і вхідною зіницею служить оправа об'єктива. Її зображення через окуляр отримується за точкою $F'_{ок}$ і служить вихідною зіницею всього мікроскопа.

В складних об'єктивах апертурною діафрагмою є спеціальна діафрагма, установлена в задній фокальній площині об'єктива. При цьому вхідна зіниця всієї системи мікроскопа лежить в безкінечності, а вихідна - в задній фокальній площині мікроскопа.

Лінійне поле мікроскопа різко обмежується польовою діафрагмою, встановленою в площині проміжного зображення - передній фокальній площині окуляра, де знаходиться сітка.

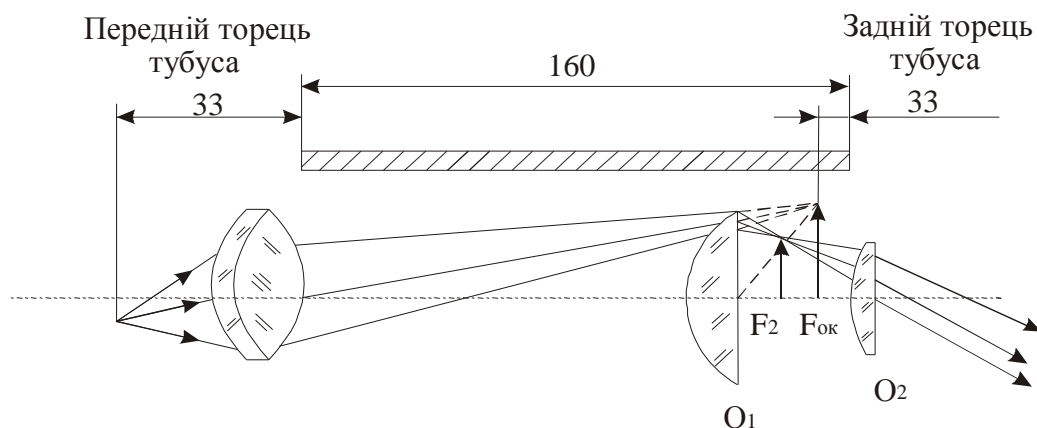


Рис. 2.6 Механічна довжина тубуса мікроскопа.

Основні характеристики мікроскопа [11-14].

Видиме збільшення мікроскопа Γ_M визначається збільшенням об'єктива $\beta_{об}$ і окуляра $\Gamma_{ок}$ [13]

$$\beta_{об} = -\frac{\Delta}{f_{об}'},$$

$$\Gamma_{ок} = \frac{250}{f_{ок}'},$$

$$\Gamma_{м} = \beta_{об} \Gamma_{ок} = \frac{250}{f_{м}'}$$

Лінійне поле мікроскопа (діапазон вимірювань) $2y$ обмежується діаметром польової діафрагми[12]

$$2y = \frac{D_n}{\beta_{об}} = \frac{2y'}{\beta_{об}}$$

Зіншої сторони діаметр польової діафрагми залежить від кутового поля окуляра $2\omega'$ [13]

$$D_n = 2y' = 2f_{ок}' \operatorname{tg} \omega' = \frac{500 \operatorname{tg} \omega'}{\Gamma_{ок}},$$

$$2y = \frac{500 \operatorname{tg} \omega'}{\beta_{об} \Gamma_{ок}} = \frac{500 \operatorname{tg} \omega'}{\Gamma_{м}}$$

Числова апертура A характеризує світлосилу мікроскопа і роздільну здатність:

$$A = n \sin \sigma_A$$

де n – показник заломлення середовища між об'єктом і об'єктивом. Для вимірювальних мікроскопів імерсія не застосовується і $n = 1$.

Діаметр вихідної зіниці $D_{вих}$ визначається фокусом і апертурним кутом окуляра[12]

$$D_{вих} = 2f_{ок}' \operatorname{tg} \sigma_A' = \frac{500A}{\Gamma_{м}},$$

$$\left. \begin{array}{l} \Gamma_M = 150 \\ A = 0,3 \end{array} \right\} D_{\text{вих}} = 1,0 \text{ мм.}$$

Якщо діаметр вихідної зіниці мікроскопа значно менше діаметра зіниці окуляра, то метрологічні характеристики зору повністю не використовуються, а для забезпечення достатньої освітленості зображення на сітківці потрібно інтенсивне освітлення об'єкта.

Роздільна здатність δ .

З дифракційної теорії створення зображення в мікроскопі [13]:

$$\delta = \frac{\lambda}{2A}.$$

В просторі зображень відстань між двомароздільними точками δ' :

$$\delta' = \delta \Gamma_M = \frac{\lambda}{2A} \Gamma_M.$$

Для того, щоб око бачило роздільно дві точки, які знаходяться на відстані δ' , ця відстань повинна бути узгоджена з лінійною межею розділення око $l_0 \sin \Psi$:

$$\delta' \geq l_0 \sin \Psi \quad l_0 = 250 \text{ мм.}$$

Враховуючи малий діаметр вихідної зіниці мікроскопа і низьку контрастність об'єктів, кутову межу розділення око приймають $2' - 4'$.

$$\Psi_1 = 2', \quad \delta_1 = 250 \sin 2' = 0,145,$$

$$\Psi_2 = 4', \quad \delta_2 = 250 \sin 4' = 0,290,$$

$$0,145 < \delta' < 0,290 \text{ [мм]},$$

$$0,145 < \frac{\lambda}{2A} \Gamma_M < 0,290 \text{ [мм]}.$$

Мінімальне видиме збільшення, при якому око повністю використовує роздільну здатність мікроскопа називають корисним.

$$\text{При } \lambda = 0,55 \text{ мкм} = 0,00055 \text{ мм}$$

$$500A < \Gamma_k < 1000A.$$

Мікроскоп, збільшення якого менше $500A$ не дає можливості розрізнити ті об'єкти, які розділяє об'єктив с апертурою A . Збільшення, перевищує $1000A$ не забезпечує виявлення нових деталей предмета.

Глибина зображуваного простору T [11] – повинна забезпечувати одночасне спостереження декількох сіток і зображення об'єкта, а глибина зображуваного простору мікроскопа – вимірюваного об'єкта і його елементів (рис. 2.7).

Однак надмірне збільшення глибини зображуваного простору в вимірювальному мікроскопі може привести до того, що одночасно будуть спостерігатися елементи що “заважають” (дефекти в матеріалі, на якому нанесена шкала і т.д.).

Для окуляра $T_{ок}$:

$$T_{ок} = \frac{250^2 \Psi}{D_{вих} \Gamma_{ок}^2},$$

$$\left. \begin{array}{l} \Psi = 1' = 0,0003 \text{ рад} \\ \Gamma_{ок} = 10^x \\ D_{вих} = 1 \text{ мм} \end{array} \right\} T_{ок} = 0,2 \text{ мм.}$$

Повна глибина зображуваного простору мікроскопа є сумою трьох глибин акомодційної $T_{ак}$, геометричної $T_{г}$, дифракційної $T_{д}$:

$$T_{м} = T_{ак} + T_{г} + T_{д},$$

$$T_{ак} = \frac{250}{\Gamma^2}.$$

В мікроскопах з сіткою окомодованою зображення сітки і $T_{ак} = 0$.

$$T_{г} = \frac{250\Psi}{\Gamma_{м}A},$$

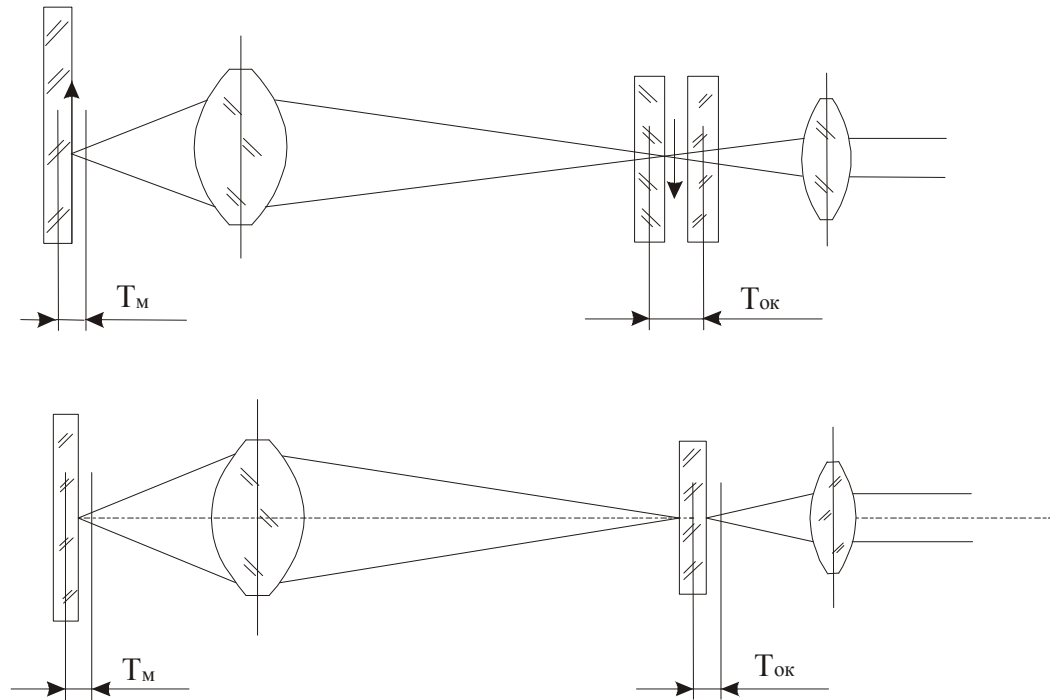


Рис. 2.7 Глибина зображуваного простору.

$$\left. \begin{array}{l} \Psi = 1' = 0,0003 \text{ рад} \\ \Gamma_M = 150^x \\ A = 0,3 \end{array} \right\} T_\Gamma = 0,0016 \text{ мм} = 1,6 \text{ мкм},$$

$$T_d = \frac{n\lambda}{2A^2},$$

$$\left. \begin{array}{l} n = 1 \\ \lambda = 0,55 \text{ мкм} = 0,00055 \text{ м} \\ A = 0,2 \end{array} \right\} T_d = 0,003 \text{ мм} = 3 \text{ мкм}.$$

Нерідко мікроскоп фокусують на зображення об'єкта, яке побудоване невипробуваною оптичною системою. При цьому висока точність установки може бути отримана при умові, що числова апертура об'єктива мікроскопа дорівнює або дещо більше апертури випробуваного об'єктива.

В цьому випадку чутливість поперечної наводки в лінійній мірі обчислюється по формулі Захар'євського,

$$\Delta\gamma \approx \frac{a}{\sigma},$$

де $a = 0,05$ мкм, σ – передній апертурний кут оптичної системи (рад).

Точність повздовжньої установки приблизно в 15-40 раз менше і складає $\Delta_z \approx \frac{b}{\sigma^2}$, де $b = 0,2$ мкм.

$$1. A = 0,11$$

$$2. A = 0,11$$

$$\Delta y = \frac{0,05}{0,11} \approx 0,45 \text{ мкм} \quad \Delta z = \frac{0,2}{0,11^2} \approx 16,5 \text{ мкм}.$$

Із зростанням апертури відношення $\frac{\Delta z}{\Delta y}$ зменшується

$$1. A = 0,3$$

$$2. A = 0,3$$

$$\Delta y = 0,17 \text{ мкм} \quad \Delta z = 2,2 \text{ мкм}.$$

Відлікові системи вимірювальних мікроскопів. Системи прямого відліку [6, 12]. Під прямим відліком розуміють зняття відліку по шкалам без попереднього суміщення зображення штрихів. Оптичні системи в таких пристроях призначені тільки для збільшення видимих розмірів поділок шкал і об'єкта.

По шкалі візирного мікроскопа МИР-2 роблять безпосереднє вимірювання об'єктів невеликого розміру, зображення яких не перевищують довжини шкали (діапазон вимірювань). Реальний розмір об'єкта буде в $\beta_{об}$ раз менше, де $\beta_{об}$ – збільшення об'єктива мікроскопа (рис. 2.8а) [12].

В оптичній ділильній головці ОДГ-60 [12] використовується дві шкали – рухома градусна, розташована на місті об'єкта (C_1) і нерухома окулярна (C_2), яка має 60 малих поділок, тобто ціна однієї поділки дорівнює $1'$ (рис. 2.8б).

В шкалах поперечного масштабу[12]використовується дві сітки - рухома міліметрова (C_1) інерухома окулярна (рис. 2.9). Великий міліметровий інтервал окулярної шкали (C_2) розділений бісекторами по горизонталі на десять частинз ціною ділення 0,1 мм. В свою чергу, кожен малий інтервал з ціною поділки 0,1 мм поділений також на десять частинза допомогою одинадцяти бісекторів, рознесених по вертикаліізсунутих по горизонталі на однакову величину – 0,01 мм. Таким чином міліметрова шкала виявляєтьсяінтерпольованою на 100 поділок.

МИР-2

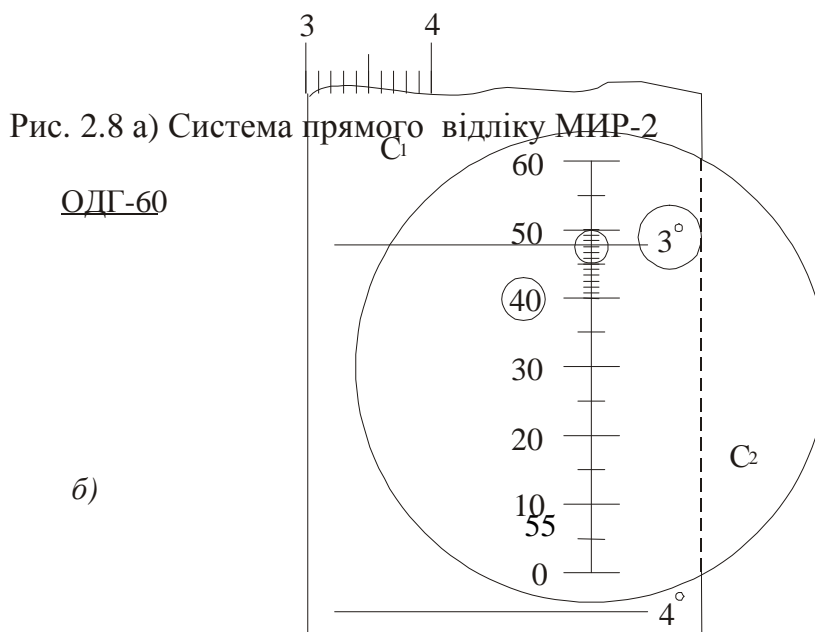
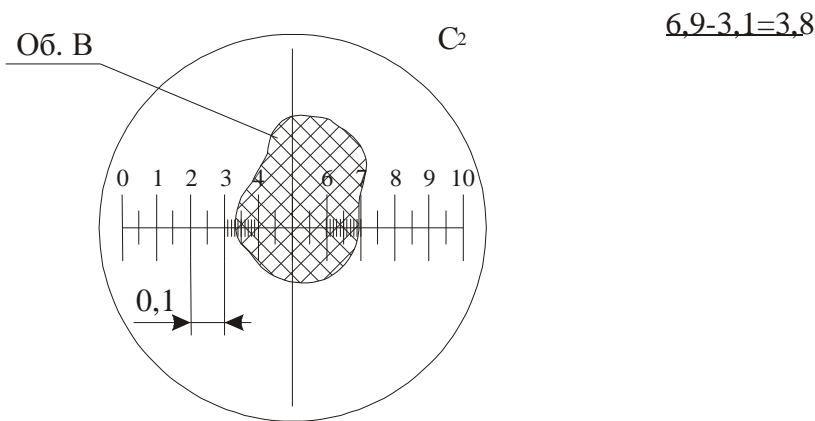
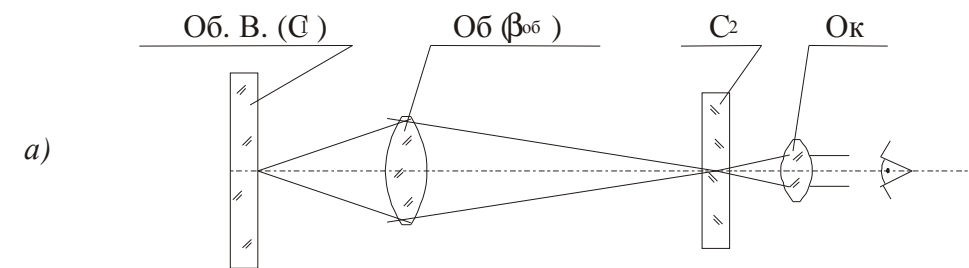


Рис. 2.8 а) Система прямого відліку МИР-2

ОДГ-60

Відлік
3° 48'...

б)

При високій якості зображення можлива оцінка "на око" тисячних часток міліметра.

Відлікові системи з мікрометрами[6]. Оптико-механічні мікрометри - це відлікові пристрої, які містять оптично сполучені рухомі і нерухомі шкали, причому ціна поділки рухомої шкали в декілька раз менше ціни поділки нерухомої шкали, за рахунок чого відбувається її інтерполяція.

Переміщення рухомої шкали здійснюється механічним способом.

Оптико-механічні мікрометри призначені для безпосередніх лінійних вимірювань об'єктів, зображення яких, надане оптичною системою, не перевищують межі переміщення шкали мікрометра.

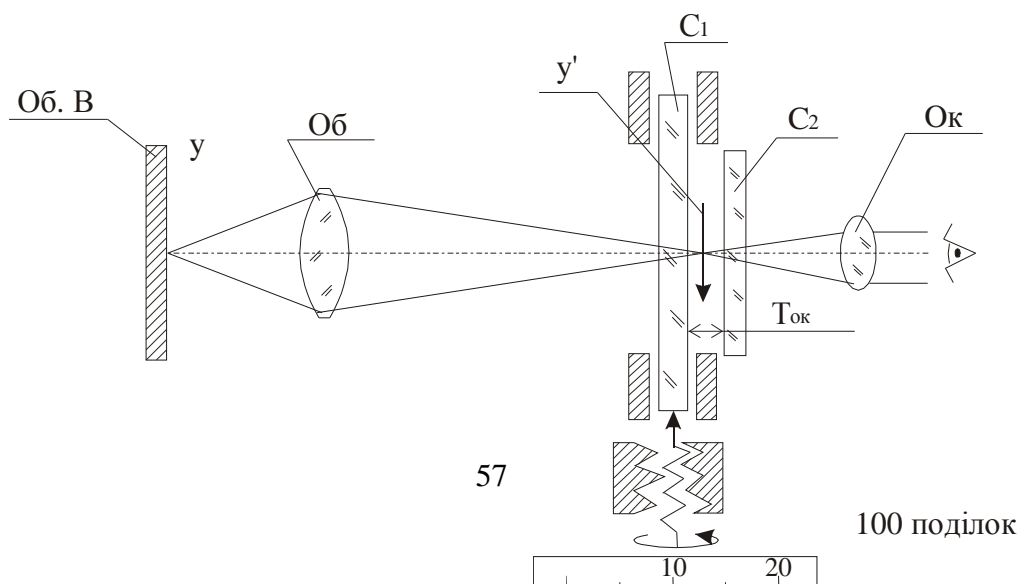
Оптико-механічні мікрометри називають окулярними, якщо вони встановлені в площині сітки окуляра, екранними, якщо вони встановлені в площині екрана, на який проектується зображення об'єкта і об'єктними, якщо вони встановлюються в площині вимірюваного об'єкта.

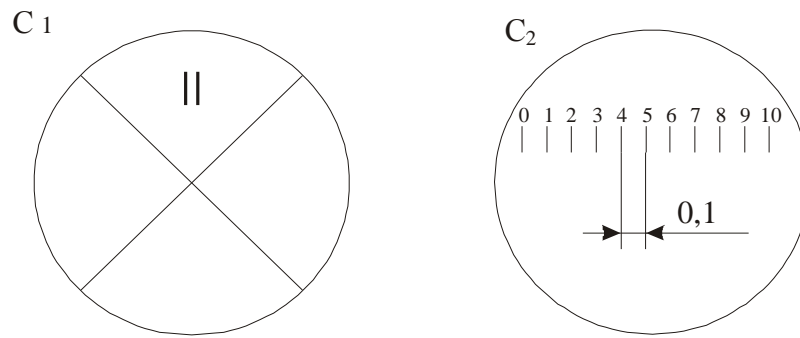
Гвинтовий окулярний мікрометр МОВ-1-15^x [12]. В фокальній площині окуляра знаходиться нерухома сітка з міліметровими поділками (C_2) і майже впритул до неї - рухома сітка (C_1), на яку нанесені перехрестя біштрих (рис. 2.10). Переміщення цієї сітки здійснюється обертанням барабана мікрометричного гвинта з кроком 1 мм. Барабан має 100 поділок, отже міліметрова шкала C_2 інтерполюється на 100 поділок, тобто ціна поділки барабанної шкали складає 0,01 мм.

В окуляр одночасно видно три зображення - сіток C_1 і C_2 і вимірюваного об'єкта, причому зображення об'єкта розташовується між сітками.

Відлік знімається по шкалі C_2 (відносно індексу C_1) і по шкалі барабана після наведення перехрестя на край вимірюваного об'єкта.

Спиральний окулярний мікрометр ОМС [9, 12].





Відлік 8,145...

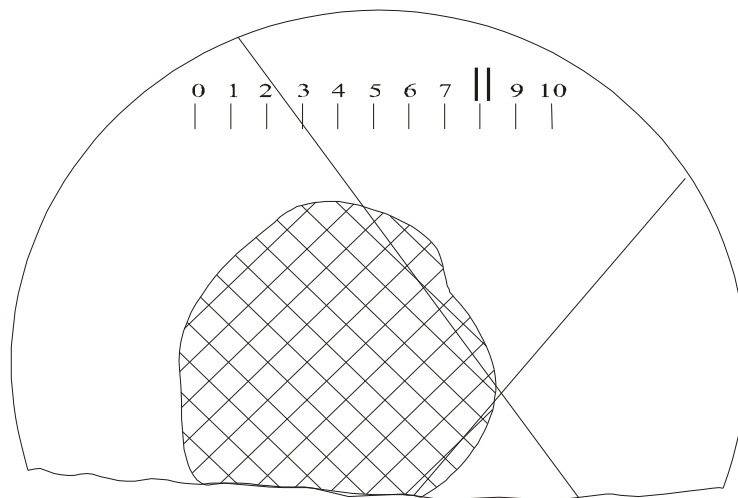


Рис. 2.10 Гвинтовий окулярний мікрометр

Мікрометр є частиною відлікових мікроскопів і слугує для точного відліку по лінійним шкалам в довжиномірах, компараторах, сферометрах і т.п.

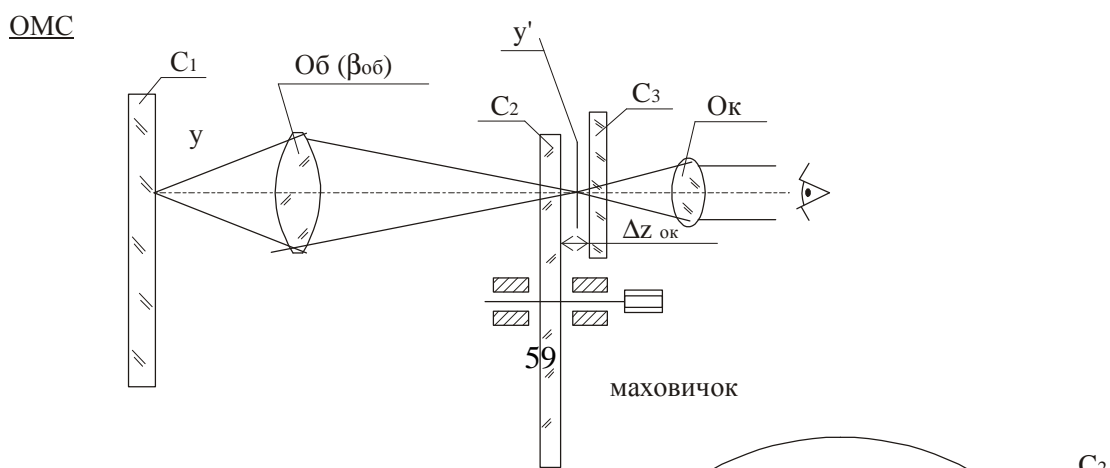
Міліметрова шкала (C_1) проектується об'єктивом в площину між нерухомою (C_3) і поворотною (C_2) сітками. На нерухомій окулярній сітці C_3 нанесена лінійна шкала (10 поділок) і індекс (рис. 2.11). На сітці,

що повертається за допомогою маховичка, нанесені одинадцять витків подвійної спіралі Архімеда і кругова шкала, розділена на 100 частин.

В полі зору видно три шкали: C_1 (один штрих в зоні нерухомої сітки C_3), нерухома (C_3), десять інтервалів якої відповідають одному інтервалу C_1 і поворотна кругова шкала (C_2), яка інтерполює нерухому шкалу C_3 на 100 ділень. Таким чином ціна поділки мікрометра складає 0,001 мм.

Для проведення відліку необхідно поворотом маховичка встановити поворотну шкалу так, щоб штрих міліметрової шкали C_1 , що знаходиться в зоні витків спіралі Архімеда, виявився точно посередині між лініями найближчого витка спіралі (бісекторна установка). Індексом для відліку міліметрів слугує нульовий штрих сітки C_3 . По цій же шкалі відраховуються десяті доли міліметрів (відрізок від нульового штриха до видимого штриха міліметрової шкали C_1). Соті тисячні частини міліметрів знімаються по круговій шкалі C_2 .

Оптичні компенсатори [12]. В оптичних компенсаторах зображення основної "грубої" шкали (лінійної або кругової) переміщується в невеликих межах відносно нерухомої окулярної шкали. Таке переміщення зображення здійснюється оптичним способом, тобто зміною положення оптичних деталей. Зсув оптичної деталі зв'язано з переміщенням точної шкали, яка здійснює інтерполювання "грубої".



В всіх оптичних компенсаторах малій величині зсуву зображення основної шкали відповідає великий зсув рухомої шкали, чим і досягається висока точність відліку (рис. 2.12).

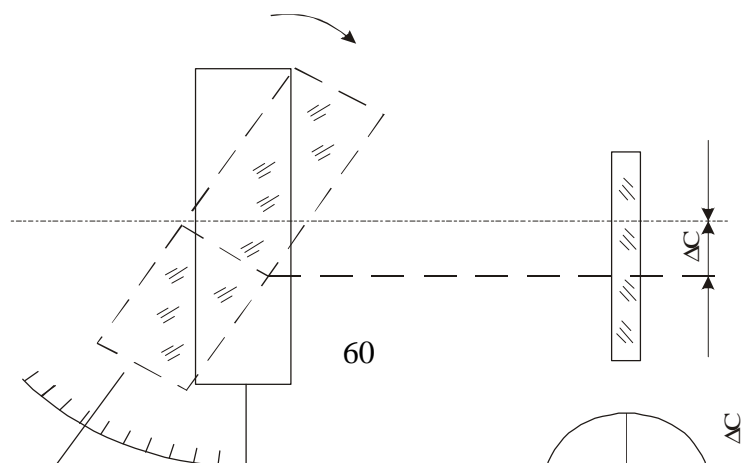


Рис.2.12 Оптичні компенсатори

В оптико-механічних вимірювальних приладах застосовують, в основному, три типи компенсаторів:

- з плоско-паралельною пластинкою;
- зрухомими клинами;
- лінзові компенсатори.

Компенсатор з плоско-паралельною пластинкою використовує властивість похилої пластинки зсувати пройдений через неї промінь.

В оптичній ділильній головці ОДГ-1 [12] пластина компенсатора жорстко пов'язана зрухомою сіткою окуляра відлікового мікроскопа (C_2). При повороті на кут Δ відбувається зсув зображення градусних поділок лімба на величину ΔC відносно нерухомої окулярної шкали з ціною ділення $10'$ (C_3) і одночасно зсув зрухомої сітки на величину Δl відносно індексу. При зсуві зображення лімба на $10'$ рухома сітка переміщається на

60 поділок. Таким чином, ціна однієї поділки рухомої сітки дорівнює 10" (рис. 2.13).

2.1.3 Кутові вимірювання

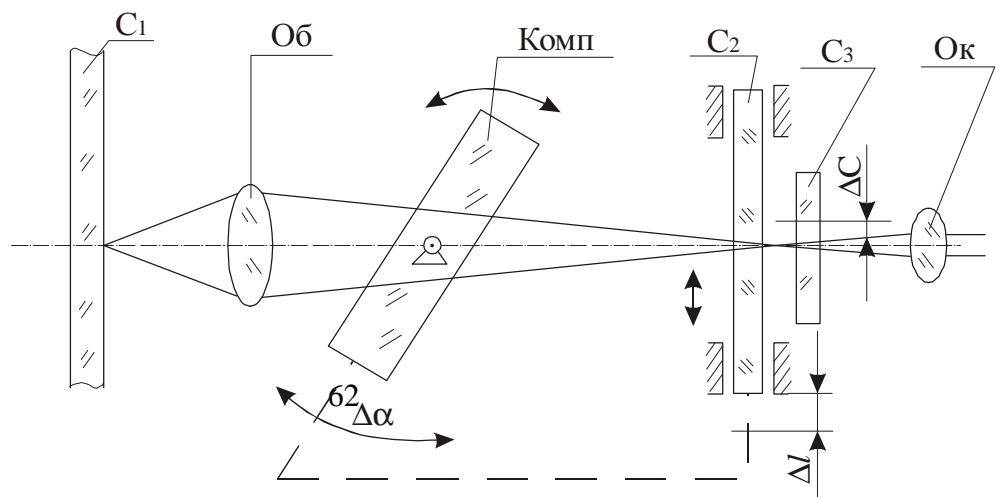
Засоби кутових вимірів і їх відлікові системи. Вимірювальні зорові труби. Найбільшого застосування в кутових вимірюваннях отримала труба Кеплера [12]. Її основними оптичними вузлами є об'єктив, окуляр і вимірювальна сітка (рис. 2.14). Задній фокус об'єктива і передній фокус окуляра суміщені. В їх загальній фокальній площині, де будується проміжне дійсне перевернуте зображення безкінечно віддаленого об'єкта, встановлюється сітка. Сітка розглядається через окуляр одночасно із зображенням об'єкта.

У випадках, коли треба мати пряме зображення, в трубу Кеплера між об'єктивом і окуляром розташовують лінзову або призмову обертальну систему.

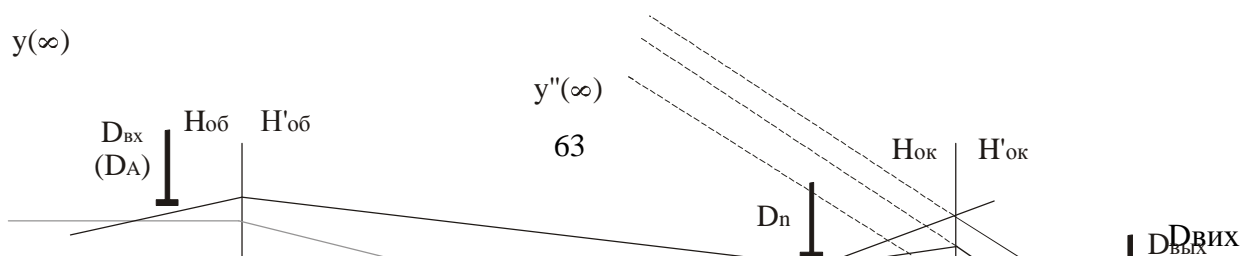
Паралельний пучок променів, який потрапляє в об'єктив зорової труби, виходить з окуляра також паралельним пучком променів.

Оправа об'єктива є, як правило, одночасно вхідною зіницею і апертурною діафрагмою. Її зображення через окуляр розташовується біля заднього фокуса окуляра і є вихідною зіницею системи.

Польова діафрагма знаходиться в площині проміжного зображення. Її зображення через об'єктив і окуляр є вхідним і вихідним вікном системи



ізнаходиться в безкінечності, тобто в місці розташування об'єкта його зображення, через це труба Кеплера вільна від віньєтування її поле зору різко обмежене.



Основні характеристики зорової труби [12, 13]. Видиме збільшення ($\Gamma_{\text{тр}}$) - відношення тангенса кута під яким око спостерігача бачить зображення предмета, утвореного зоровою трубою, до тангенсу кута, під яким видно сам предмет неозброєним оком.

$$\Gamma_{\text{тр}} = \gamma_{\text{тр}} = \frac{tg\omega'}{tg\omega},$$

$$\gamma_{\text{тр}} = \frac{1}{\beta_{\text{тр}}}, \quad \Gamma_{\text{тр}} = \frac{f'_{\text{об}}}{f_{\text{ок}}} = \frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вих}}}.$$

Кутове поле зорової труби (2ω) – характеризує розмір різко зображуваного простору предметів.

У зоровій трубці Кеплера різко зображуваний простір обмежений діафрагмою, встановленою в передній фокальній площині окуляра, де виходить проміжне зображення, утворене об'єктивом.

Максимальне кутове поле $2\omega_{\text{max}}$ труби обмежене максимально можливим кутовим полем $2\omega'_{\text{окуляра}}$ [13]

$$\text{tg}\omega_{\text{max}} = \frac{\text{tg}\omega'}{\Gamma_{\text{тр}}} = -\frac{D_n}{2f'_{\text{об}}}.$$

Діаметр вихідного зіниці $D_{\text{вих}}$ зазвичай задають рівним діаметру зіниці ока або трохи більшим. Коли потрібне велике збільшення, наприклад в геодезичних трубах, діаметр вихідного зіниці обмежують до 2-3 мм, в іншому випадку надмірно збільшуються розміри системи.

Світлосилою H називається відношення освітленості E зображення, що створюється оптичною системою, до яскравості предмета L [13]

$$H = \frac{E'}{L},$$

$$H = \frac{n'^2 \tau_{\text{ока}} \tau \pi \left(\frac{D_{\text{вх}}}{\Gamma_{\text{тр}}} \right)^2}{4 f'^2_{\text{ока}}}, \quad D_{\text{вих}} \geq D_{\text{ока}},$$

$n'=1,336$ – показник заломлення рідини ока,

$\tau_{\text{ока}}$ – коефіцієнт пропускання ока,

τ коефіцієнт пропускання оптичної системи,

$f'_{\text{ока}}$ – задня фокусна відстань ока.

Якщо діаметр зіниці ока більше вихідної зіниці зорової труби, суб'єктивна яскравість зображення озброєного ока буде менше яскравості

предмета, спостережуваного неозброєним оком у відношенні квадратів діаметрів вихідної зіниці системи і зіниці ока.

Збільшення зорової труби, при якому діаметр її вихідної зіниці дорівнює діаметру зіниці ока, називається нормальним збільшенням $\Gamma_{\text{тр.н}}$.

Межа роздільності труби $\Psi_{\text{тр}}$ визначається для простору предметів і оцінюється в кутовій мірі. Ця межа розділення пов'язана з кутовою межею розділення ока, тобто за окуляром (у просторі зображень) кутова межа розділення повинна дорівнювати $60''$ [12].

Тоді в просторі предметів

$$\Psi_{\text{тр}} = \frac{60''}{\Gamma_{\text{тр}}}.$$

Щоб отримати таку роздільність, об'єктив труби повинен мати певну межу роздільності. З дифракційної теорії

$$\Psi_{\text{об}} = \frac{1,22\lambda}{D}, \quad \lambda = 0,000555 \text{ мм},$$

$$\Psi_{\text{об}} = \frac{140''}{D}, \quad D \text{ [мм]}.$$

Збільшення телескопічної системи, при якому межа роздільності об'єктиву повністю використовується оком, називається корисною $\Gamma_{\text{тр.к}}$.

$$\Psi_{\text{тр.к}} = \Psi_{\text{об}}, \quad \frac{60''}{\Gamma_{\text{тр.к}}} = \frac{140''}{D},$$

$$\Gamma_{\text{тр.к}} = \Gamma_{\text{тр.н}} = \frac{60'' D}{140''} \approx 0,5D.$$

Коліматори [12, 13]. Коліматори використовуються у вимірювальних приладах і установках для штучного створення нескінченно віддаленої точки візування. Оптична схема коліматора зазвичай складається з об'єктива з невеликим відносним отвором і сітки, розміщеної в його

передній фокальній площині і освітлюваної за допомогою освітлювача (рис. 2.15).

В ролі сітки використовують непрозору діафрагму з малим круглим отвором (для дифракційних вимірів), штрихові шкали (для кутових вимірів) і міри (для оцінки якості оптичних систем).

В освітлювачі застосовується схема розфокусованого освітлення сітки з установкою перед нею розсіювача.

Величина фокусної відстані об'єктива коліматора коливається від сотень міліметрів до кількох метрів. Переміщуючи сітку коліматора, можна змінювативеличину відхилення променів від паралельності. Зміщенням сітки з фокусу F на величину z викликає збіжність променів на відстані z' від фокусу F' .

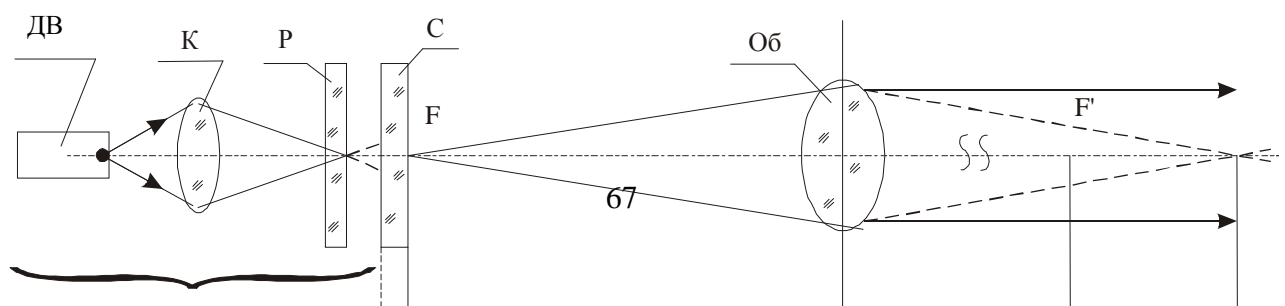
$$z' = -\frac{(f_k')^2}{z}.$$

Якщо встановити перед коліматором зорову трубу, то в полі зору окуляра буде видно зображення сітки коліматора.

Причому різкість зображення практично не залежить від відстані між трубою і коліматором. Зображення сітки залишається нерухомим при поздовжньому зсуві коліматора або труби, але поворот коліматора (або труби) на кут α викликає зміщення цього зображення на величину y'

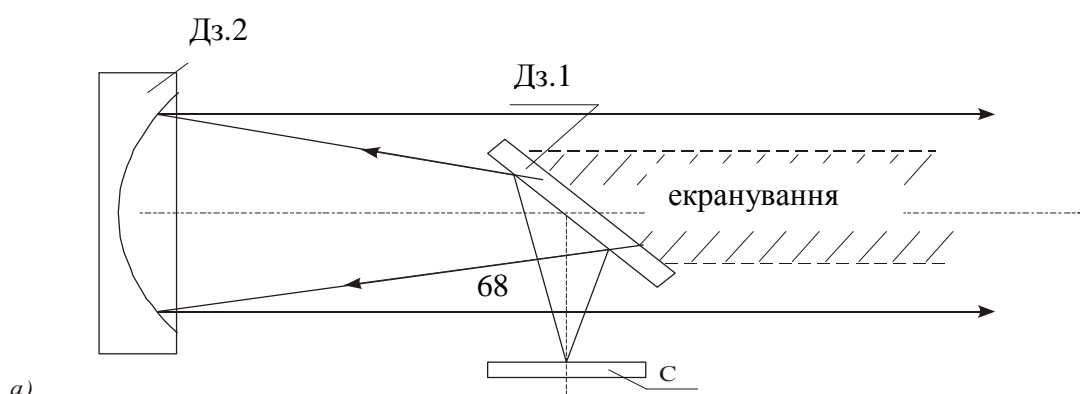
$$y' = f_{\text{тр}}' \operatorname{tg} \alpha .$$

Вимірявши зміщення зображення сітки y' можна з високою точністю визначити кут взаємного повороту труби і коліматора α (рис. 2.16). В УФ та ІЧ областях спектру застосовують дзеркальні і дзеркально-лінзові коліматори(рис. 2.17) [15].



Дзеркально-лінзові коліматори не мають екранування, але їх спектральний діапазон обмежений пропусканням оптичних елементів.

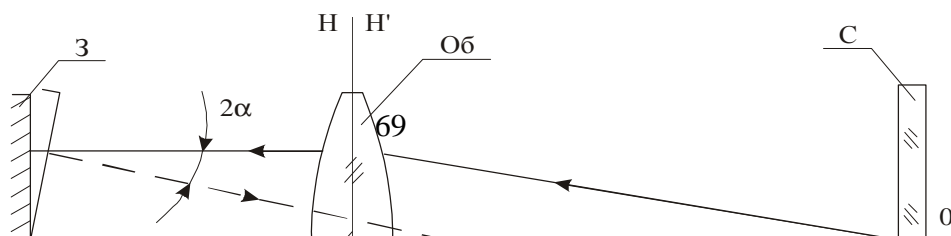
Автоколіматори [12]. Системи, які проектують зображення об'єктива за допомогою поверхні, що відбиває в площину самого об'єкта, називаються автоколімаційними. Як правило автоколіматор об'єднує в собі коліматор і зорову трубу, що сполучені через дзеркало. Автоколіматори призначені для вимірювання малих кутів повороту дзеркала.



Коли джерело світла O перебуває у фокусі об'єктива, промені на виході об'єктива утворюють паралельний пучок, який відбившись від дзеркала, знову збереться у фокусі O (рис. 2.18). При повороті дзеркала на кут α , паралельний пучок променів, після відбиття від дзеркала, відхилиться на кут 2α і буде знову зібраний об'єктивом, але вже в точці O' , що знаходиться на відстані y' від точки O . При цьому:

$$y' = f_{об}' \operatorname{tg} 2\alpha .$$

Автоколіматор з окуляром Аббе [11, 12]. У фокальній площині об'єктива встановлена сітка, склеєна з призмою прямокутного перерізу зі скосом під кутом 45° . У площині сітки призма покрита шаром металу. З цього шару прорізаний прозорий хрестик, висота якого укладається в проекції похилій грані призми. Зовнішні межі призми, крім торця, через який виробляється підсвічування, покриті чорним лаком (рис. 2.19)



Якщо дзеркало перед об'єктивом встановлено перпендикулярно оптичній осі, то зображення хрестика зміщене від геометричного центру догори на таку ж величину, на яку зміщений сам хрестик донизу. Це положення зображення хрестика прийнято за нульовий. При інших кутових положеннях дзеркала зображення хрестика зміщене відносно нуля на величину y'

$$y' = f_{об} \operatorname{tg} 2\alpha$$

Перевагою окуляра Аббе є його велика світлосила (втрати яскравості 25-20%), недоліком – екранування частини поля зору призмою підсвічування.

Автоколіматор з окуляром Гауса [11, 12]. Автоколіматор складається з об'єктива, сітки, встановленої у фокальній площині об'єктива, для підсвічування якої використовується напівпрозора плоскопаралельна пластинка, встановлена до оптичної осі під кутом 45° та окуляра (рис. 2.20).

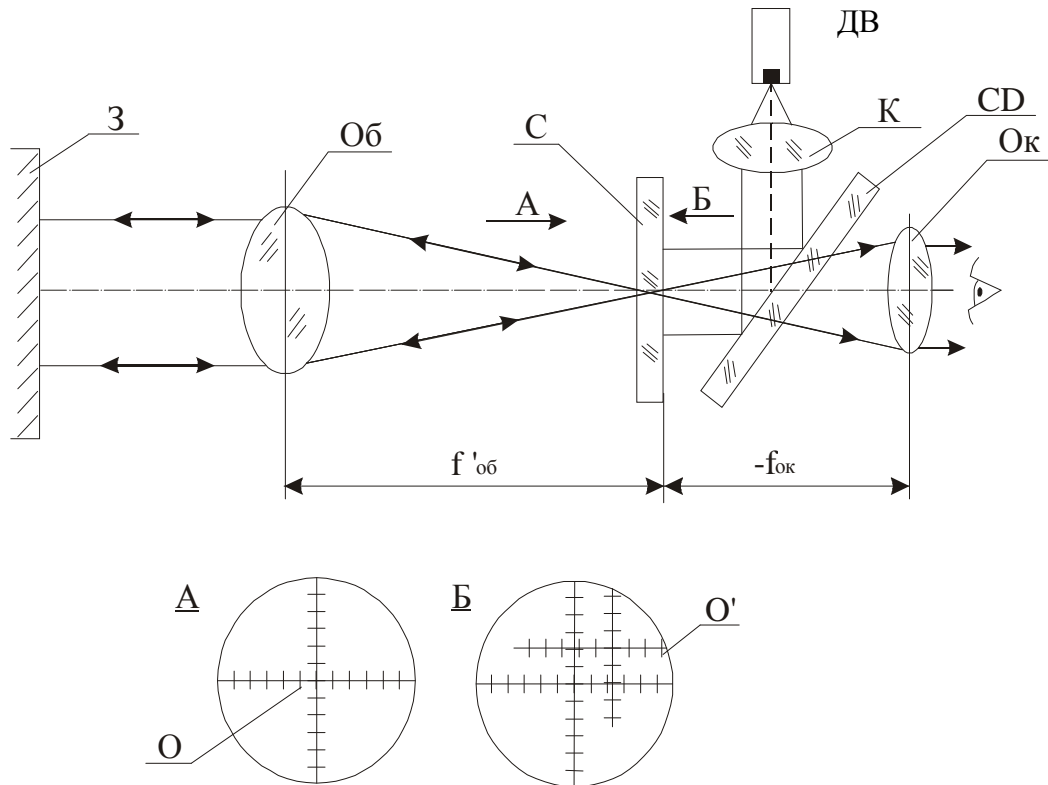


Рис. 2.20 Автоколіматор з окуляром Гауса

Перевага окуляра Гауса – незатінення поля зору. Недоліки – велика втрата яскравості (60-80%), сторонні відблиски, що вносяться похилою пластинкою і довгофокусність окуляра, що призводить до малого збільшення та низької чутливості.

Автоколіматор з окуляром-куб [11, 12]. Автоколіматор складається з об'єктива, світлоділильного кубика і двох сіток, встановлених у фокальній площині об'єктива і сполучених через світлорозділювач (рис. 2.21). На освітлюваній сітці зроблений прозорий хрестик на шарі алюмінію, а на окулярній - нанесено перехрестя з поділками.

Перевага окуляра-куб – незатінення поля зору і короткофокусність окуляра, що дає можливість отримати велике збільшення і високу точність вимірювання.

Недоліки – значна втрата яскравості (80-85%) і складність юстування двох сіток.

Всі розглянуті автоколіматори можна використовувати як зорову трубу при вимкненому освітлювачі і як коліматор при спостереженні з боку об'єктива.

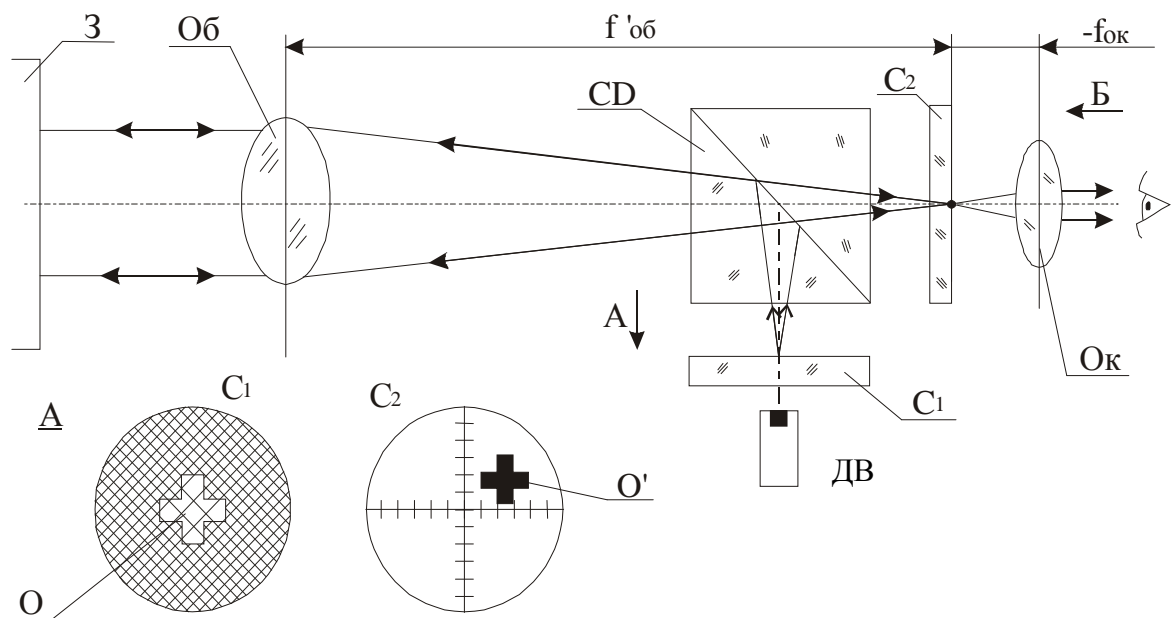


Рис. 2.21 Автоколімаційний окуляр-куб

Гоніометри [9, 11, 15, 16]. Гоніометри призначені для вимірювання кутів між плоскими полірованими гранями різних деталей, а також для вимірювання кутів відхилення променів, що проходять через призми і клини, виготовлених з прозорих матеріалів.

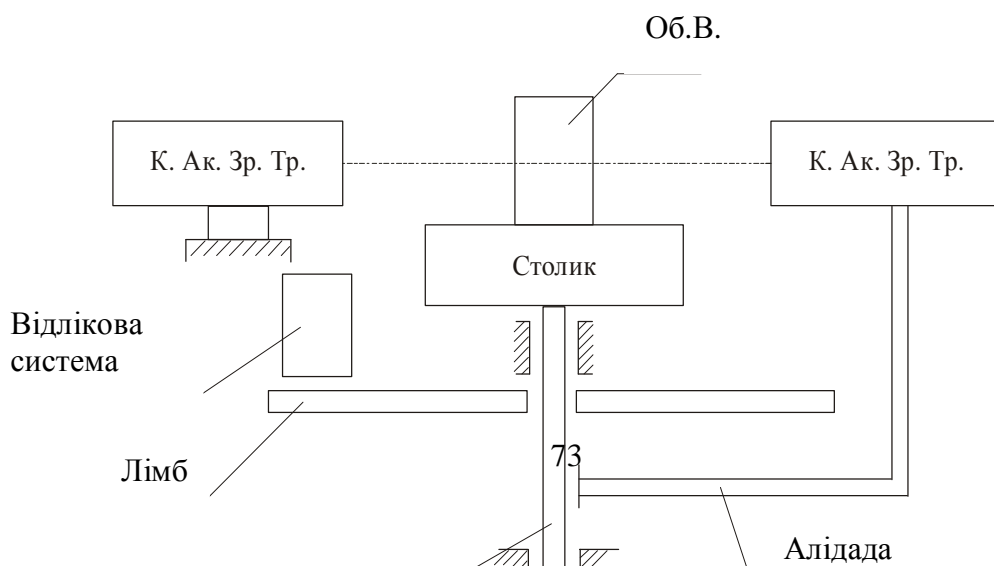
Вимірювання кутів на гоніометрах здійснюється абсолютним методом, тобто шляхом порівняння з точно відградуваним лімбом (круговою шкалою).

Основними частинами гоніометра [9] є осьова система, лімб, зорова труба, коліматор, відлікова система для зняття відліку по лімбу (рис. 2.22).

Для зменшення помилки, викликані переміщенням осі в підшипнику, яке приводить до ексцентриситету лімба, застосовується відлік показань з двох діаметрально протилежних ділянок лімба (рис. 2.23).

На поверхні лімба нанесена шкала з поділками (1080 ступенів). Ціна поділки $20'$, оцифровка поділів проведена через 1° . Зображення штрихів лімба через призмовий блок і систему об'єктивів передається на діаметрально протилежній ділянці, а потім обидва зображення через призму і об'єктив направляється в оптичний мікрометр і розділювальний блок, причому одне зображення пряме, а інше - зворотне (рис. 2.24).

Принцип дії оптичного мікрометра полягає в наступному. На шляху променів від лімба до розділювального блоку поміщені дві пари оптичних клинів. Клин розташований вершинами в протилежні сторони так, що через одну пару проходить пряме зображення одного, а через іншу - зворотне зображення другої ділянки лімба. При переміщенні рухливих клинів вздовж оптичної осі зображення ділянок лімба зміщуються поперек оптичної осі і в протилежних напрямках. Кожне наступне суміщення штрихів обох зображень лімба відбувається при повороті лімба на $10'$, хоча він розділений на 20-хвилинні інтервали, що пояснюється рухом обох зображень в різні боки з однаковою швидкістю.



З рухливими клинами механічно пов'язана скляна шкала. Вона має 600 поділок і взаємному переміщенню зображень лімба на $10'$, відповідає повне переміщення шкали. Таким чином ціна поділки мікрометра дорівнює $1''$.

Зображення поділок лімба і шкали мікрометра розташовані в одній площині і розглядаються через відліковий мікроскоп. Число градусів визначається за прямим зображенням лімба відносно вертикального

індексу. Число десятків хвилин визначається за кількістю інтервалів між оцифрованими градусними поділками, які відрізняються на 180° .

Одиниці хвилин і секунди відраховуються за шкалою мікрометра і риски в малому вікні.

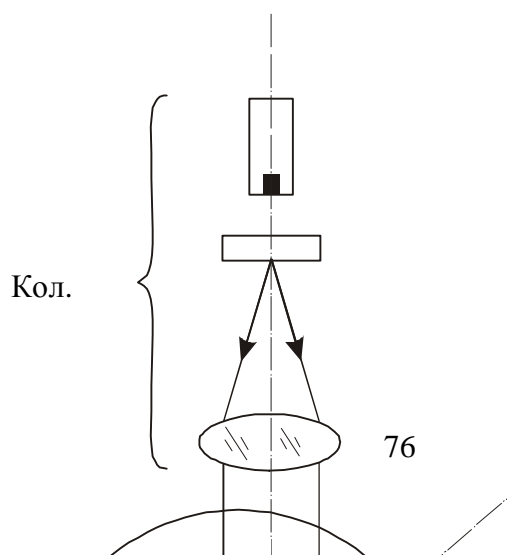
Наведення на грань призми здійснюють колімаційним і автоколімаційним методом (рис. 2.25) [12].

У першому випадку столик з призмою повернутий так, щоб паралельний пучок променів, що виходить з коліматора, відбившись від грані призми, потрапив в зорову трубу. Зображення сітки коліматора поєднують з перехрестям сітки зорової труби і беруть перший відлік по лімбу. Потім столик з лімбом повертають до суміщення зображення сітки з перехрестям після відбиття від іншої межі призми і беруть другий відлік. Вимірюваний кут дорівнює 180° мінус кут, визначений по лімбі.

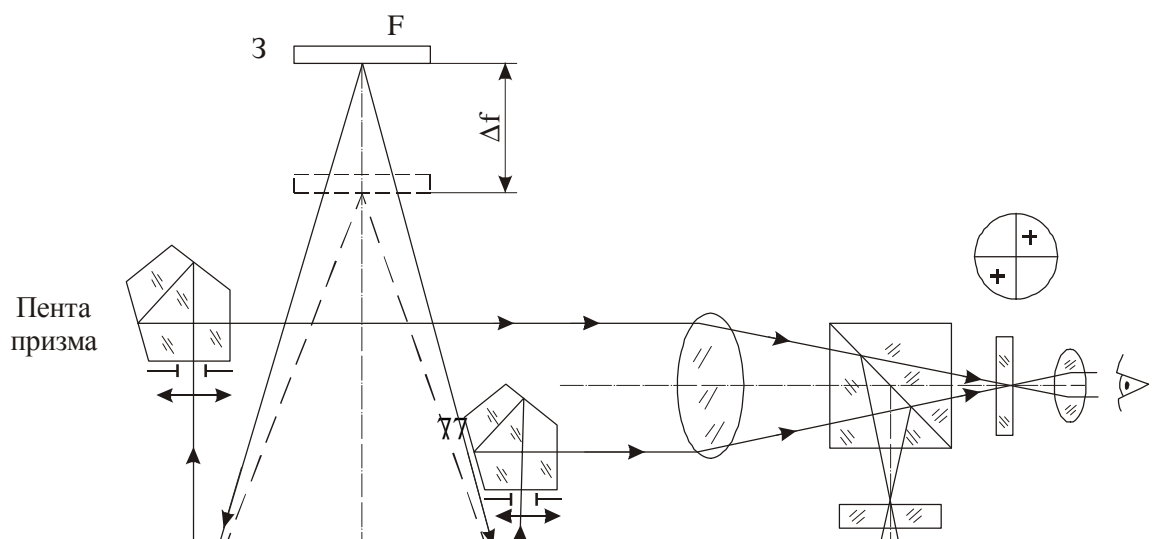
У другому випадку використовують автоколіматор за допомогою якого отримують автоколімаційне зображення марки від грані призми.

Методи кутових вимірів. Контроль увігнутого параболоїда [6].

Чудова властивість увігнутого параболоїда полягає в тому, що осьовий паралельний пучок променів, падаючий на ідеальний параболоїд, після відбиття утворює суворо гомоцентричний пучок променів незалежно від відносного отвору параболоїда. Ця властивість використовується для контролю форми увігнутих параболоїдом методом автоколіматора і



пентапризми, що переміщуються в меридіональній площині параболоїда
(рис. 2.26).



Паралельний пучок променів, що виходить з об'єктиву автоколіматора, надходить до пентапризми, забезпечені пристроями для переміщення їх перпендикулярно осі параболоїда назустріч один одному. Вузькі пучки променів, відбиті від пентапризми, потрапляють на різні зони параболоїда і після відбиття від нього фокусуються в точці F - фокусі параболоїда, в фокальній площині якого розташовано плоске дзеркало. Очевидно, що якщо прилад не має власних помилок, а параболоїд ідеальний, то фокус будь-якої зони знаходиться в точці F. У полі зору автоколіматора в цьому випадку спостерігається одне автоколімаційне зображення марки.

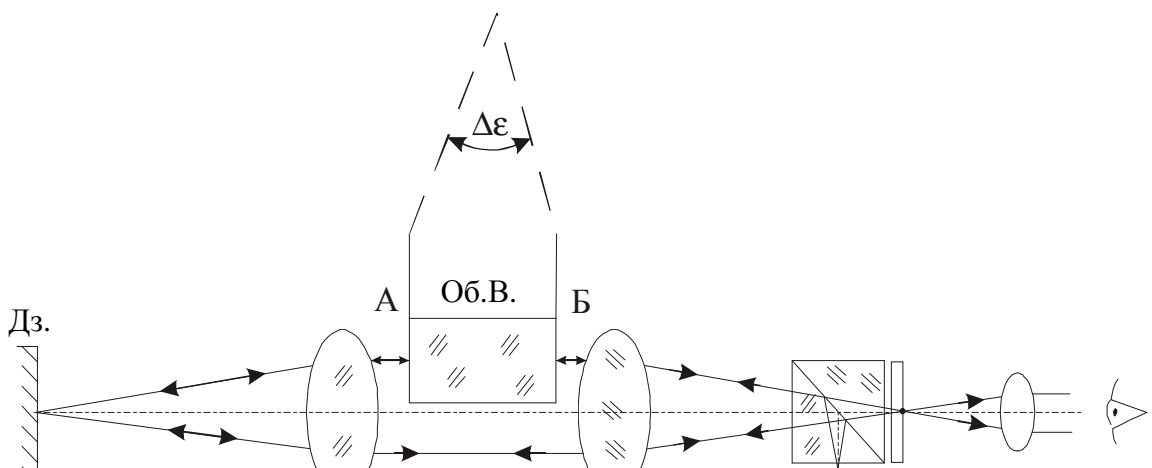
Якщо поверхня параболоїда має помилки, то, при переміщенні пентапризми з однієї зони в іншу, утворюються два автоколімаційних зображення марки, відстань між якими вимірюється по сітці автоколіматора. Величину помилок параболоїда можна також визначити переміщаючи плоске дзеркало вздовж осі параболоїда на величину Df до поєднання обох автоколімаційних зображень.

Таким чином, сутність вимірювань на розглянутій установці зводиться до визначення положення фокусів різних зон.

Контроль непрозорих плоскопаралельних деталей [13]. В установці використовується оптична система "котяче око", яка складається з об'єктиву і встановленого в його фокальній площині плоского дзеркала. Паралельний пучок променів, що входить в таку систему, виходить також паралельним пучком (рис. 2.27).

Контрольована деталь повинна займати не більше половини апертури автоколіматора і об'єктиву "котячого ока".

Пучок променів, що виходить з автоколіматора потрапляє частково на праву поверхню контрольованої деталі, а частково в "котяче око" і після нього на ліву поверхню деталі. Відбившись від контрольованих поверхонь, світло тим же шляхом повертається в автоколіматор. Якщо поверхні деталі строго паралельні, то в автоколіматорі спостерігається одне автоколімаційне зображення, в іншому випадку спостерігається два автоколімаційних зображення, відстань між якими пропорційно непаралельності.



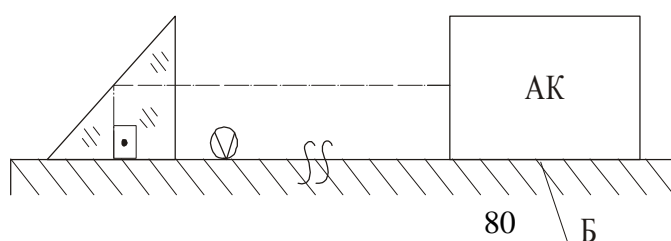
Автоколімаційний контроль розташування поверхонь (рис. 2.28).

2.1.4 Лінійні вимірювання

Методи і засоби лінійних вимірювань [14]. Лінійні вимірювання здійснюються приладами, забезпеченими лінійними еталонними мірами і вимірювальними мікроскопами і діють за принципом порівняння еталону і контрольованого об'єкта. Однак різниця самих еталонних мір дозволяють розділити такі прилади на дві великі групи.

Прилади першої групи призначені для визначення малих відхилень вимірюваного об'єкта від розміру кінцевої міри еталонного об'єкта (відносні вимірювання, диференціальний метод). До приладів цієї групи відносяться оптиметри, ультраоптиметри і оптикатори.

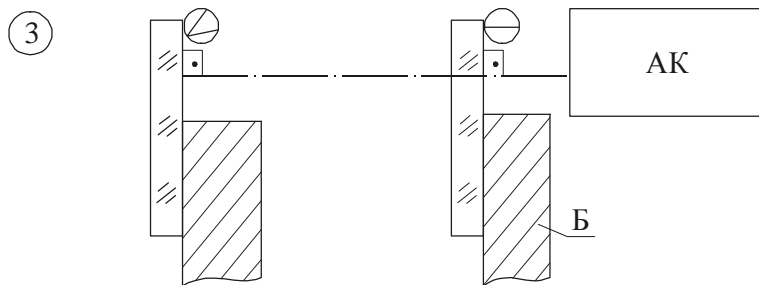
①



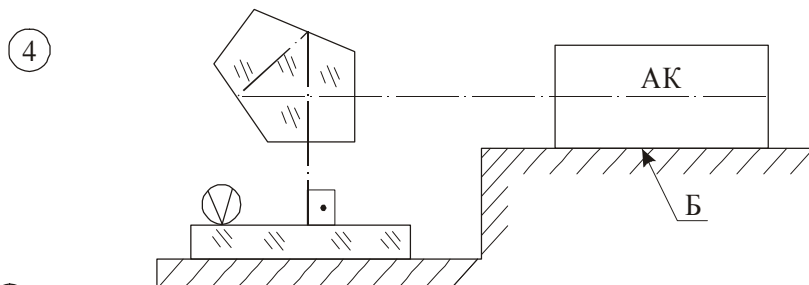
Контроль
перпендикулярності

②

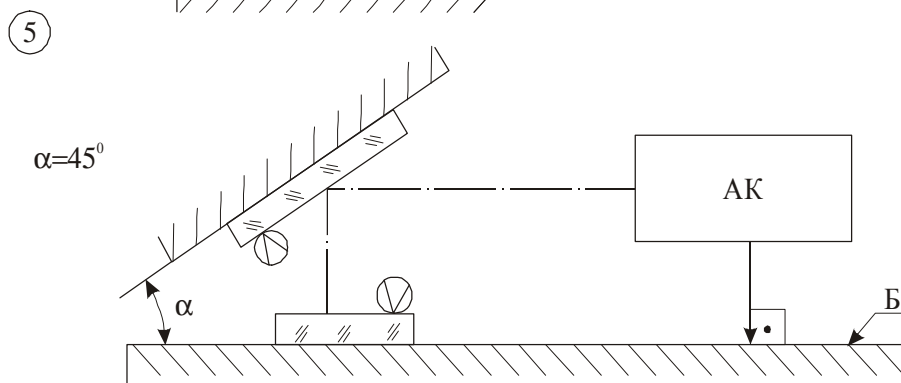
Контроль
перпендикулярності на
двох рівнях



Контроль паралельності
при зміщенні двох
автоколімаційних
зображень



Контроль паралельності
на двох рівнях



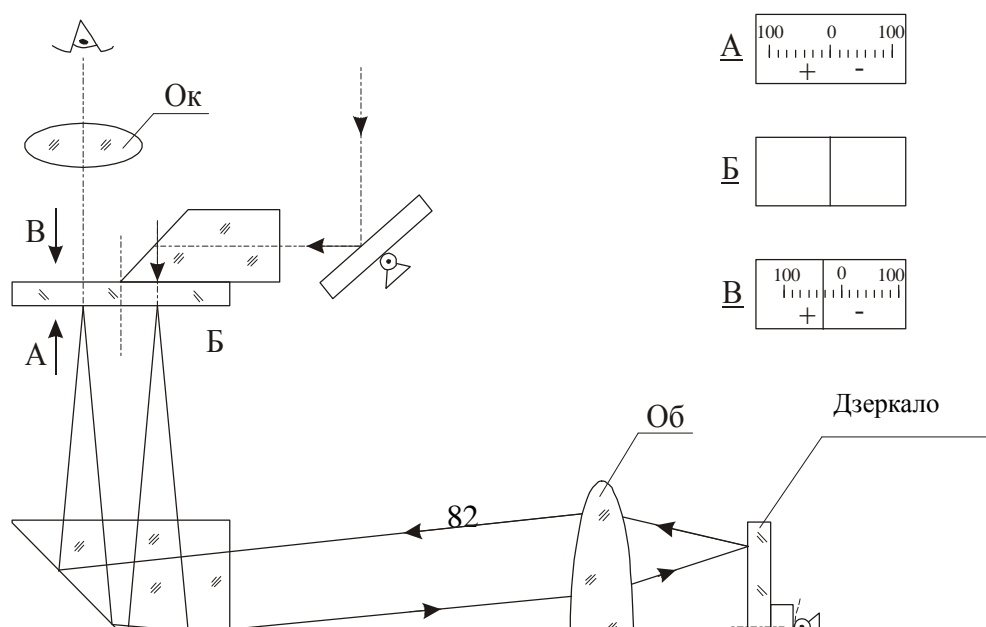
Контроль угла
Контроль кута

Рис. 2.28 Автоколімаційний контроль розташування поверхонь

Прилади другої групи призначені для безпосередніх вимірів об'єктів шляхом порівняння їх з еталонними штриховими мірами (шкалами). Еталонна шкала може бути вбудована у вимірювальний прилад (абсолютні вимірювання, метод безпосередньої оцінки). До приладів цієї групи відносяться компаратори, довгоміри, сферометри, катетометри, вимірювальні машини.

Прилади для відносних вимірювань. Оптиметри [11-13]. Принцип дії заснований на поєднанні оптичного і механічного важелів (рис. 2.29). Оптична частина складається з автоколіматора (зазвичай Аббе) і хитного дзеркала, механічна - являє собою важіль, пов'язані з вимірювальним стрижнем і хитним дзеркалом. Дзеркало нахиляється в невеликих межах під дією вимірювального стрижня, кінець якого знаходиться в контакті з вимірюваним зразком. Поворот дзеркала викликає зсув автоколімаційного зображення шкали, яке спостерігається в окуляр і відраховується по нерухомому вказівнику.

Ультраоптиметри – оптиметри підвищеної точності [11]. Підвищення точності обумовлено застосуванням дзеркального оптичного помножувача, що складається з рухомого і нерухомого дзеркал (рис. 2.30). Рухоме дзеркало пов'язане важелем з вимірювальним стрижнем і відхиляється при



його переміщенні. Промінь після багаторазового відбиття в оптичному помножувачі повертається в автоколіматор або направляється до зорової труби. Величина відхилення променя пропорційна кількості відбиттів.

Оптикатори– на відміну від оптиметрів, в яких застосовуються шарніри з опорами ковзання і кочення, в них використовується пружинний шарнір (рис. 2.31) [13]. Поворот пружини, до якої прикріплено плоске дзеркало, щодо своєї поздовжньої осі пропорційний зміщенню вимірювального стрижня. У свою чергу, поворот дзеркала викликає переміщення відбитого від нього променя (зображення щілини) за шкалою.

Непереборною похибкою всіх важільних систем є зміна плечей важеля при його перекочуванні по опорі, що змінює передавальне відношення всієї системи (рис. 2.32).

Прилади для абсолютних вимірювань. Компаратори – призначені для вимірювання штрихових і кінцевих мір шляхом безпосереднього порівняння їх з штриховими еталонними шкалами (рис. 2.33) [11, 12].

Компаратори мають рухомий стіл, на якому встановлюють еталонну шкалу, вимірюваний об'єкт, два мікроскопи, один з яких є візирним, а інший – відліковим і забезпечений окулярним мікрометром.

Візирні і відлікові мікроскопи послідовно наводяться на початок і кінець відповідно еталонної і вимірюваних шкал.

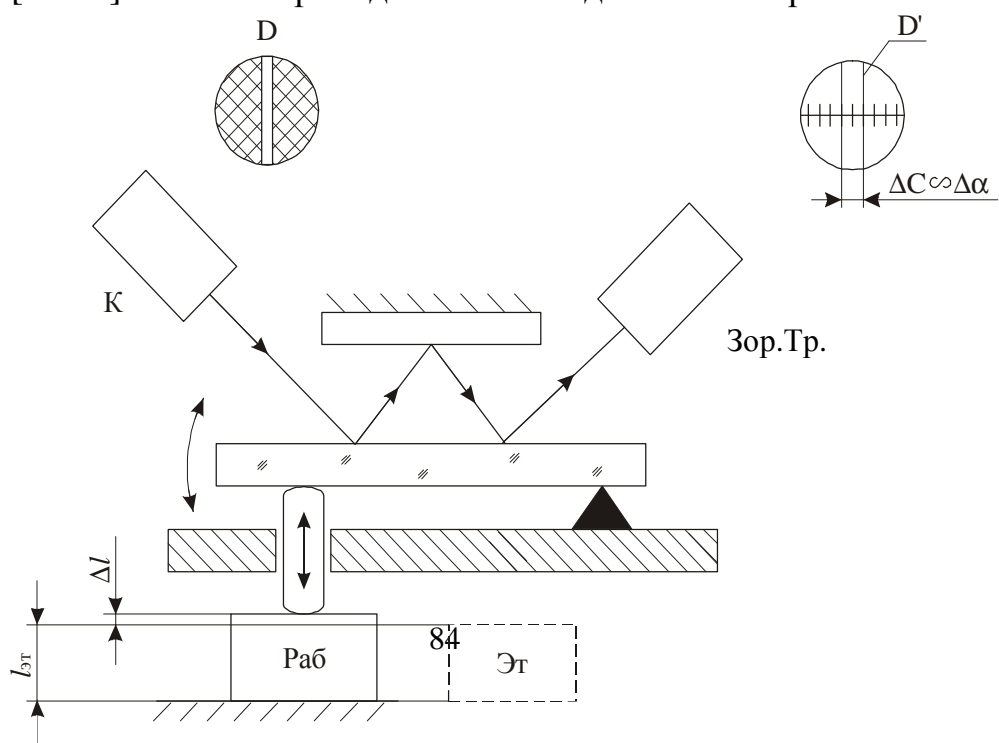
Відліковим мікроскопом визначають різницю між ними.

При компаруванні можна зміщати мікроскопи нерухомих шкал або шкали щодо нерухомих мікроскопів.

Найменші похибки має поздовжній компаратор Аббе зрозташуванням лінії вимірюваної і еталонної шкал на одній прямій.

Шкали переміщуються на каретці вздовж лінії візування, а мікроскопи встановлені на стійці.

Довжиноміри – призначені для вимірювання виробів контактним способом [11-13]. У таких приладах об'єкт і відліковий мікроскоп



нерухомі, ажорстко пов'язані між собою вимірювальний стрижень і зразкова шкала при вимірах переміщуються.

Методика вимірювання зводиться до того, що вимірювальний стрижень приводиться в зіткнення з поверхнею предметного столика, а потім з верхньою поверхнею вимірюваного об'єкту.

Різниця відліків при двох положеннях вимірювального стрижня дає довжину вимірюваної деталі (рис. 2.34).

У комплект ряду довгомірів входить центрувальний мікроскоп. Він встановлюється на вимірювальному стержні і дозволяє поєднувати обрану

точку об'єкта з лінією візування. Одночасно його можна використовувати для безконтактного вимірювання виробів по висоті (похибка буде визначатись глибиною різкості і точністю поздовжньої установки мікроскопа)

Катетометри – призначені для дистанційного вимірювання відрізків (вертикальних) які неможливо безпосередньо виміряти [11, 13]. Принцип роботи приладу полягає в тому, що зорова труба послідовно наводиться на крайні точки вимірюваного об'єкта(рис. 2.35). Положення труби фіксується за допомогою відлікового мікроскопа з еталонною шкалою, закріпленої на стійці. Зорова труба і відліковий мікроскоп змонтовані в одній каретці і переміщуються одночасно.

Вимірювальні машини призначені для точного вимірювання великих довжин [13]. Представляють собою поєднання оптиметра і горизонтального довгоміра (компаратора)(рис. 2.36).

Сферометри - призначені для вимірювання радіусів кривизни сферичних поверхонь на основі вимірювання висоти кульового сегмента (методом довгоміра) [11].

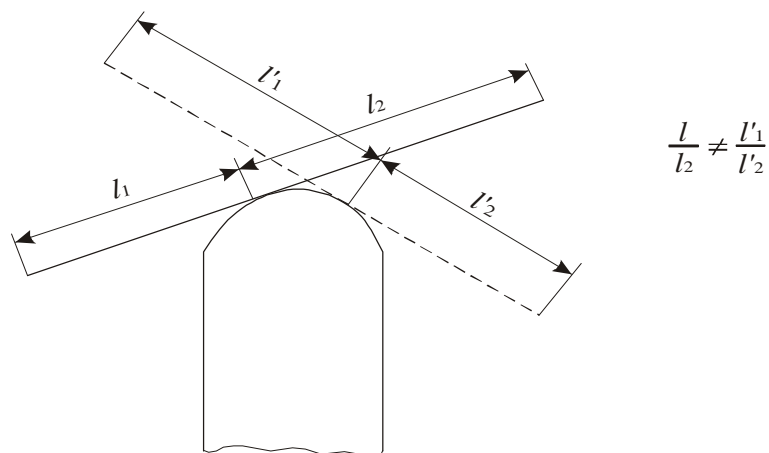
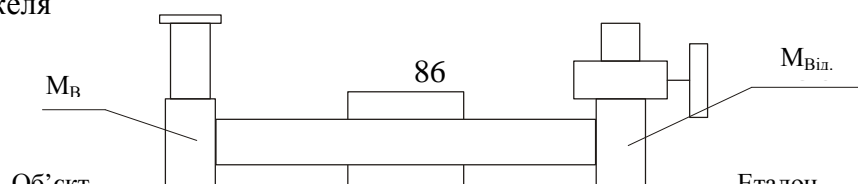
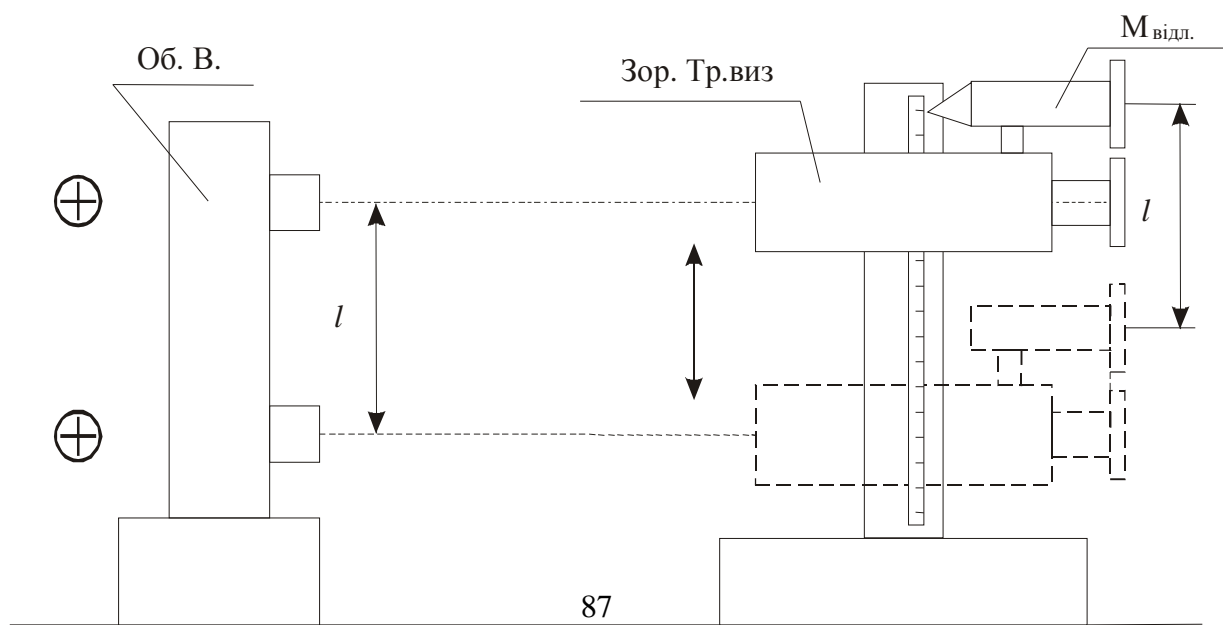


Рис. 2.32 Зміна передавального відношення при перекачуванні важеля





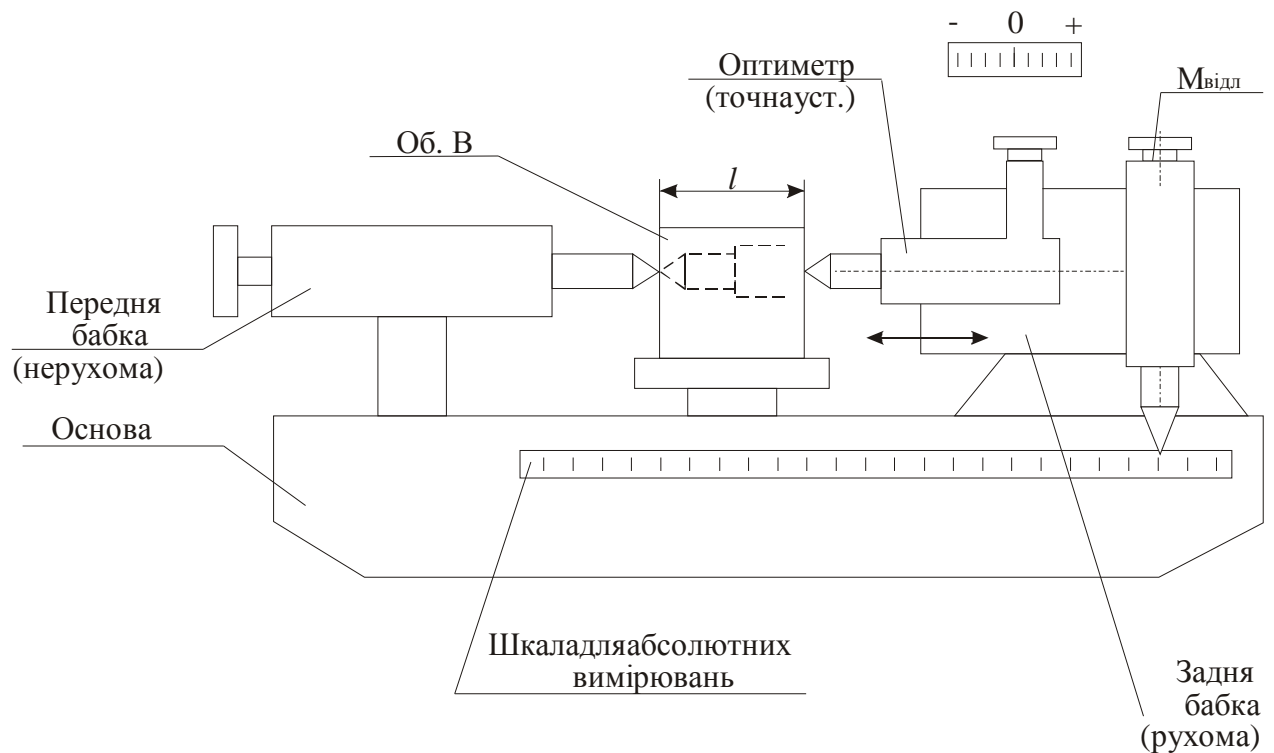


Рис. 2.36 Вимірювальна машина

2.1.5 Тіньові та проєкційні методи вимірювань

Тіньові методи (метод Фуко) [14, 15]. У 1856 р. Леон Фуко запропонував метод дослідження якості оптичних поверхонь, що зіграв величезну роль у розвитку, перш за все, астрономічної оптики. Для цього методу характерна поєднання чутливості з надзвичайною простотою виконання і наочністю. За допомогою цього методу можна виявити

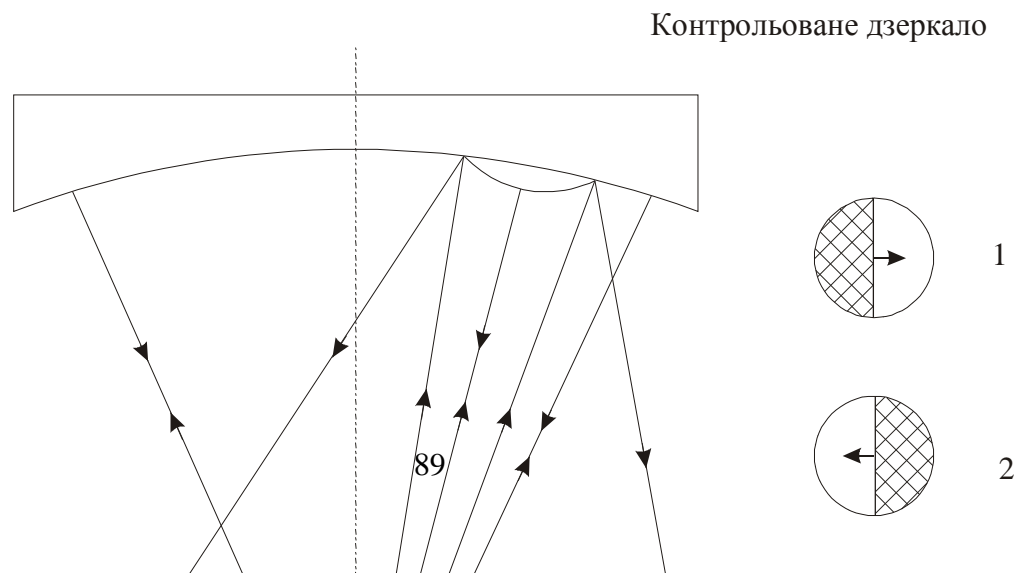
дефекти величиною $1/50-1/200\lambda$. Однак цей метод не дозволяє кількісно оцінити похибки поверхні.

Якщо дзеркало має ідеальну сферичну форму, то після відбиття від нього, промені знову повернуться в центр кривизни, утворюючи суворо гомоцентричний пучок променів (рис. 2.37). При позиції ножа перед центром кривизни (за центром кривизни) по мірі перекриття променів спостерігач побачить рух тіні зліва направо (справа наліво).

Якщо ніж знаходиться точно проти центру кривизни дзеркала, то при русі зліва направо відбувається дуже швидке і рівномірне по всій поверхні дзеркала зниження освітленості.

Якщо на поверхні дзеркала є деформована ділянка (бугор), а ніж знаходиться в центрі кривизни, спостерігач побачить поверхню дзеркала в цілому рівномірно освітленою, крім ділянки бугра, у якого права частина виявиться світлою, а ліва темною, так як відбитий промінь від правої половини бугра потрапляє в око, а від лівої затримується ножем. Виникає характерна тіньова картина, що дозволяє визначити протяжність деформованої ділянки і його положення на поверхні дзеркала.

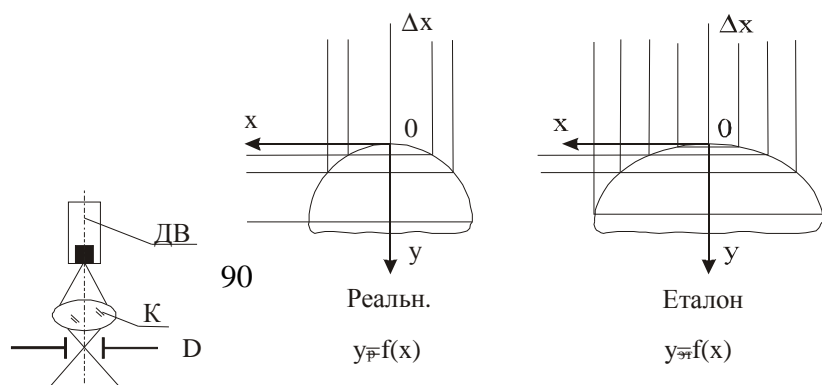
Проекційні методи.Метод тіньового перетину [17].Заснований на проектуванні еталонного світлового пучка на контрольовану поверхню і порівнянні результатів вимірювання з розрахунковими даними для тіньової картини ідеальної поверхні (рис. 2.38).



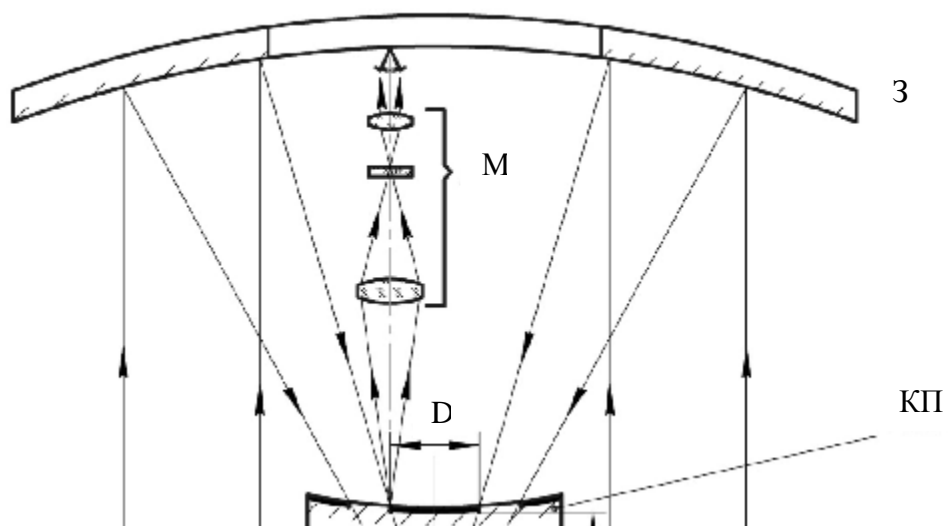
Метод придатний для контролю шорстких поверхонь. У разі полірованих поверхонь їх покривають тонким шаром білої емульсії (крейдяної).

Метод світлового конуса.

Застосовується для контролю увігнутих поверхонь [17]. Установка містить дзеркально-лінзову систему, що формує світловий конус (рис. 2.39). Це конус, перетинаючи контрольовану поверхню, утворює тіньову зону певного діаметру. Переміщуючи контрольовану поверхню вздовж осі конуса, проводять безперервні вимірювання діаметра тіньової зони і величини зсуву. За початок відліку беруть положення контрольованої поверхні, коли тіньова зона вироджується в точку.



Перед вимірюванням контрольована поверхня центрується щодо оптичної осі установки і перевіряється обертанням деталі навколо осі по тіньовому контуру, який повинен зберігати позицію по висоті і діаметру.



2.2 Оптико-електронні геометричні вимірювання

2.2.1 Структурна схема вимірювального ОЕП

Структурна схема показує основні функціональні блоки пристрою і зв'язок між ними. По ній можна судити про призначення та взаємодію окремих частин і про роботу приладу в цілому.

Структурні схеми вимірювальних ОЕП досить різноманітні, що пов'язано з широким спектром розв'язуваних ними завдань, принципів побудови і різноманіттям застосованих в них елементів, однак у самому загальному вигляді структурна схема містить наступні вузли (рис. 2.40) [18].

Джерело випромінювання (ДВ) і оптична система освітлювального каналу ($ОС_1$) - формують необхідний для роботи приладу променистий потік, визначають апертуру і поле зору освітлювального каналу (ОК), спектральний склад випромінювання.

Модулятор (Мод) - змінює характеристики променистого потоку в часі таким чином, щоб забезпечити найкращі умови роботи приймального каналу (ПК) - наприклад, для роботи електронного блоку на змінному сигналі, що підвищує стабільність і зменшує шуми (звуження Δf).

Оптична система приймального каналу (ОС) формує зображення вимірюваного об'єкта, або надходящого від нього потоку із заданими параметрами (див. схеми мікроскопа і зорової труби).

Аналізатор зображення (АЗ) призначений для виділення вимірювальної інформації від об'єкта. Такою інформацією може бути лінійне або кутове переміщення об'єкта, його координати або розміри. Аналізатор здійснює первинне перетворення потоку випромінювання від об'єкта таким чином, що один або декілька параметрів перетвореного потоку стають функціонально пов'язаними з інформативними параметрами об'єкту ($\Phi = f(\Delta x)$).

В ряді ОЕП аналіз зображення ведеться безпосередньо багатоелементними (позиційно-чутливими) приймачами, які і виконують функції аналізаторів.

Часто аналізатор зображення перетворює потік випромінювання таким чином, що він стає функцією часу, тобто виконує функції модулятора.

Аналізатор є вимірювальним перетворювачем і в значній мірі визначає метрологічні характеристики і параметри всього приладу: статичну характеристику, діапазон роботи, чутливість, методичну та інструментальну похибки, роздільну здатність (порогову чутливість).

Приймач випромінювання (ПВ) - перетворює оптичний сигнал в електричний.

Електронний блок (ЕБ) – проводить вторинну обробку вимірювальної інформації (посилення і перетворення сигналу, логічні операції, це може бути мікроконтролер або мікропроцесор).

Реєструючий пристрій (РУ) – перетворює вимірювальну інформацію, представлену в електричному сигналі у форму, зручну для оператора (стрілочний прилад, цифровий індикатор, монітор).

2.2.2 Амплітудні аналізатори зображення

У амплітудних аналізаторах використовується залежність між вимірюваним параметром об'єкта і величиною променистого потоку, що надходить на приймач випромінювання[19]. Ця залежність здійснюється або спеціальними масками, які перекривають чутливу площадку приймача, або переміщенням об'єкта щодо приймача, або поділом потоку від об'єкту на пропорційні частини і включенням приймачів випромінювання з диференціальної схемою (на алгебраїчний суматор). В останньому випадку зміна вимірюваного параметра веде до збільшення потоку на одному приймачі та зменшення на іншому. Суматор формує різницевий сигнал, величина якого пропорційна вимірюваному параметру, а знак - напряму його зміни.

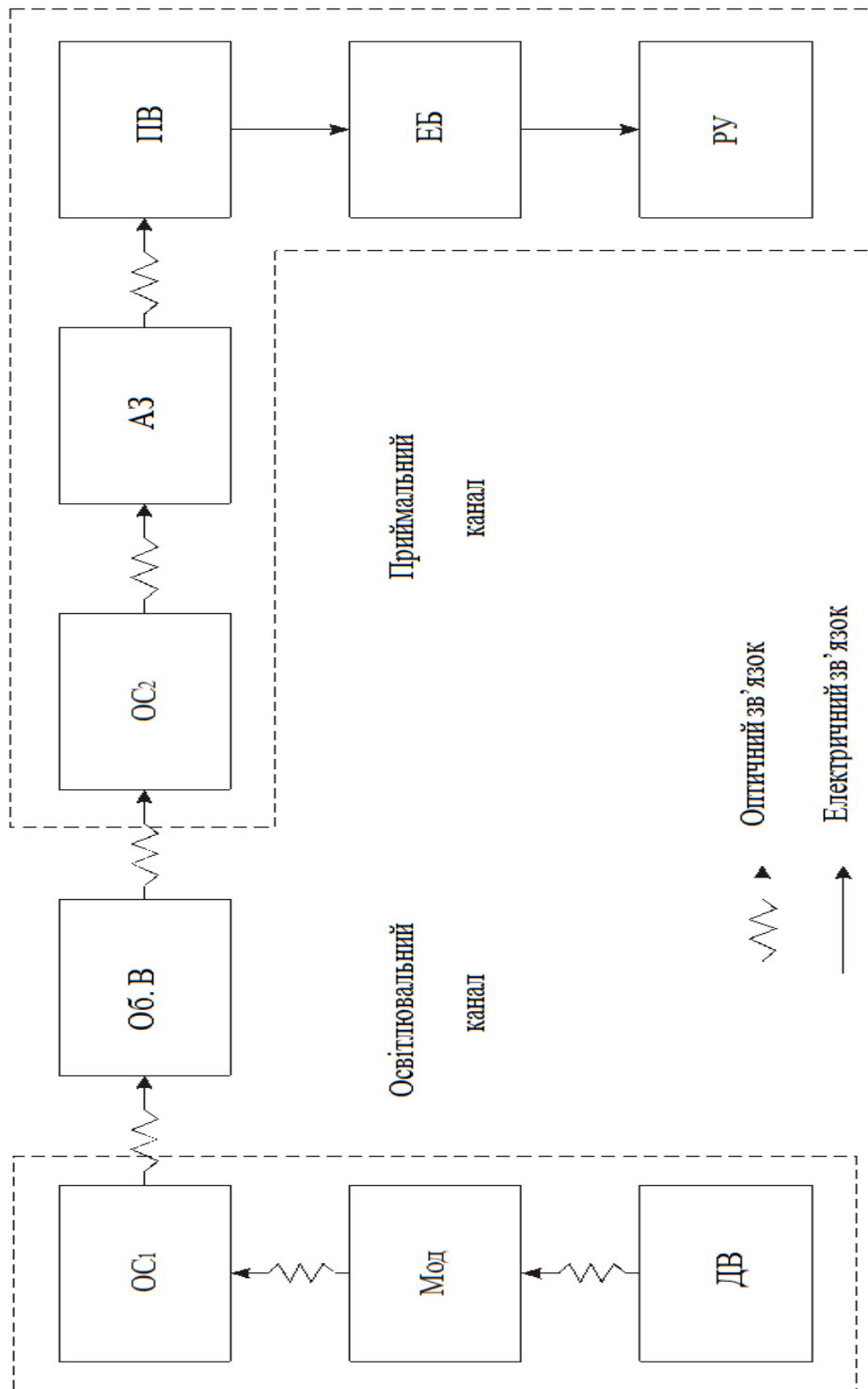


Рис. 1.40. Структурна схема вимірювального ОЕП.

Перевагою амплітудного аналізатора є простота схеми і монотонність статичної характеристики. Недоліком низькі стабільність і перешкодозахищеність, тому що будь-яка зміна величини потоку, у тому числі не пов'язана з об'єктом, веде до зміни вихідного сигналу.

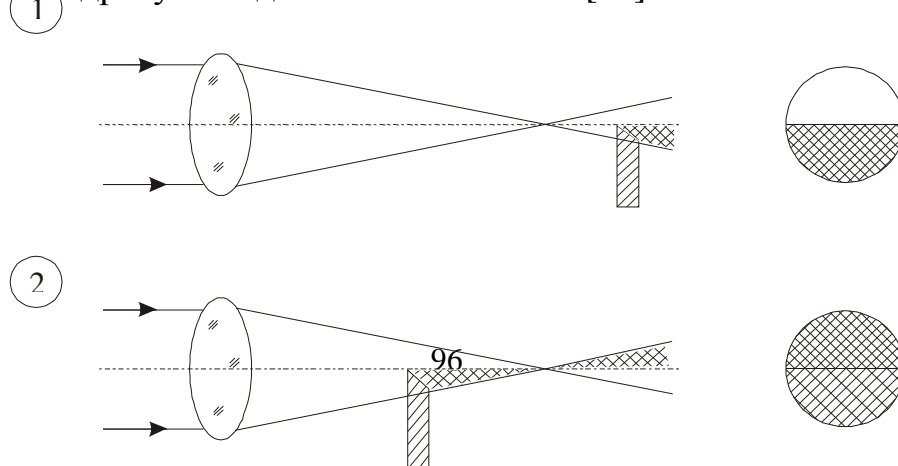
Вимірювання робочих відстаней об'єктивів в невидимій області спектру [19]. Вимірювальна установка складається з коліматора, "ножа" (непрозорого екрану з гострим краєм) і світлоділительної призми, яка ділить падаючий на неї пучок променів на дві частини і направляє їх на два приймачі випромінювання, включених по диференційній схемі (рис. 2.41). Вимірюваний об'єктив розміщується в паралельному пучку променів, що виходить з коліматора таким чином, щоб його площина зображення збігалася з вершиною ножа. Правильність установки визначається наступним чином.

Якщо вводити ніж в світловий гомоцентричний пучок, то затемнена частина буде лежати вище або нижче леза ножа в залежності від того, чи перебуває ніж позаду або спереду площини зображення. Коли ніж точно збігається з площиною зображення, поле освітлено рівномірно.

Відповідно до положення ножа буде змінюватися і освітленість приймачів, і відповідно фотоструми, що надходять на суматор. На виході суматора формується різницевий сигнал, що визначає величину і напрямок (знак) переміщення ножа. При збігу ножа з площиною зображення сигнал на виході суматора дорівнює нулю.

2.2.3 Кодові аналізатори зображення

У кодових аналізаторах використовується два основних методи отримання вимірювальної інформації: зчитування з кодової маски і послідовний підрахунок одиничних збільшень [20].



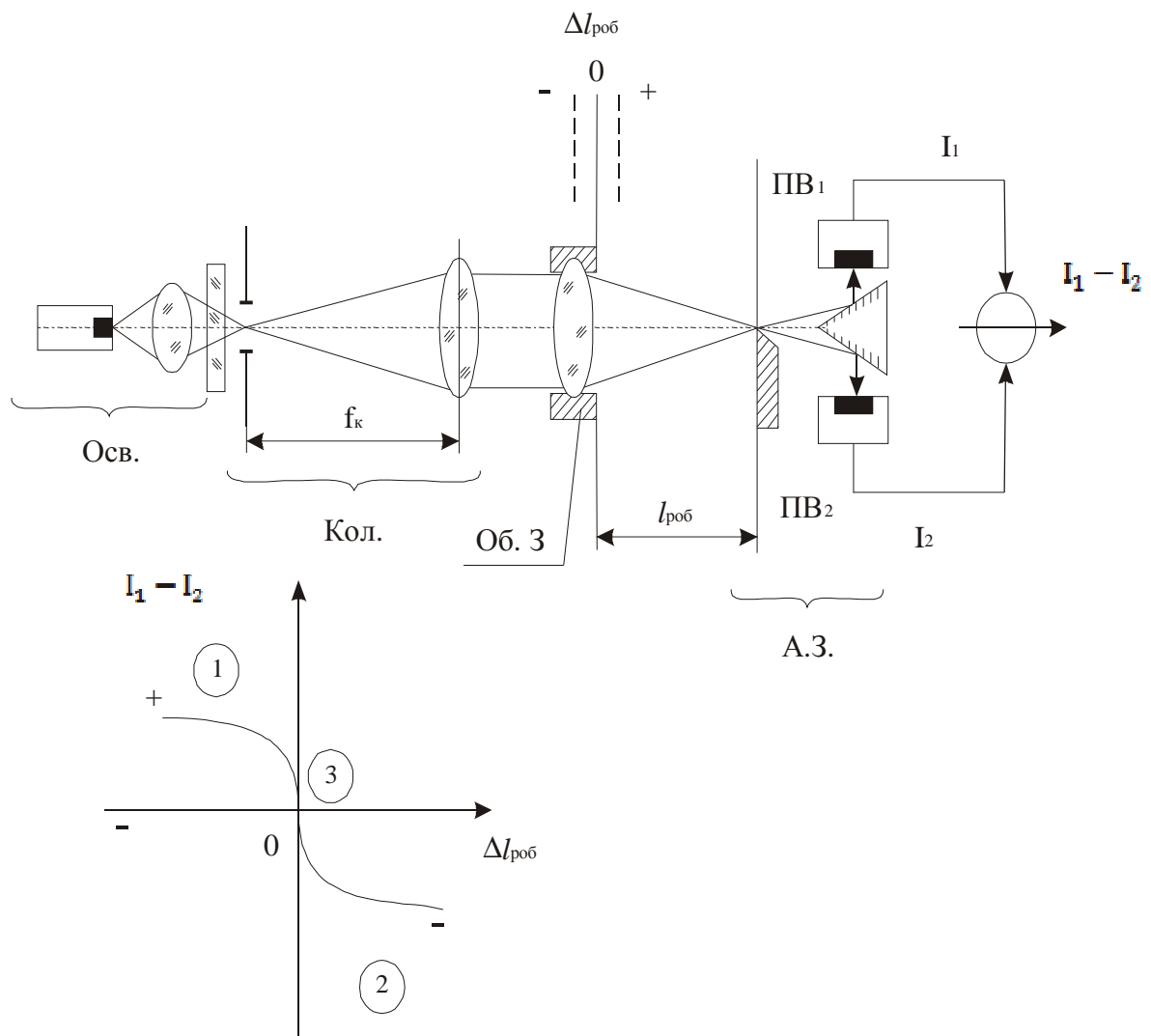


Рис. 2.41 Вимірювання робочих відстаней

Кодові маски будуються за принципом відповідності кожного їх дискретному кутовому чи лінійному положенню єдиній цифровій кодовій комбінації. Цифрові коди можуть бути реалізовані на основі будь-якої системи числення, однак на практиці найбільше застосування отримали двійкові і двійково-десяткові коди (рис. 2.42).

При побудові маски в двійковому кодi весь діапазон вимірювання кута або лінійного переміщення розбивають на рівні інтервали (кроки квантування) і кожному інтервалу ставлять у відповідність двійкове число. При цьому крок квантування повинен відповідати кутовому δ чи лінійному Δ роздільності маски.

Кодові маски представляють собою скляні кола або платівки, на яких виконана система примикаючих одна до другої розрядних доріжок з прозорими і непрозорими ділянками [16, 21].

Число розрядів визначається виразами:

для кругової шкали

$$P_k = \log_2 \frac{360^\circ}{\delta};$$

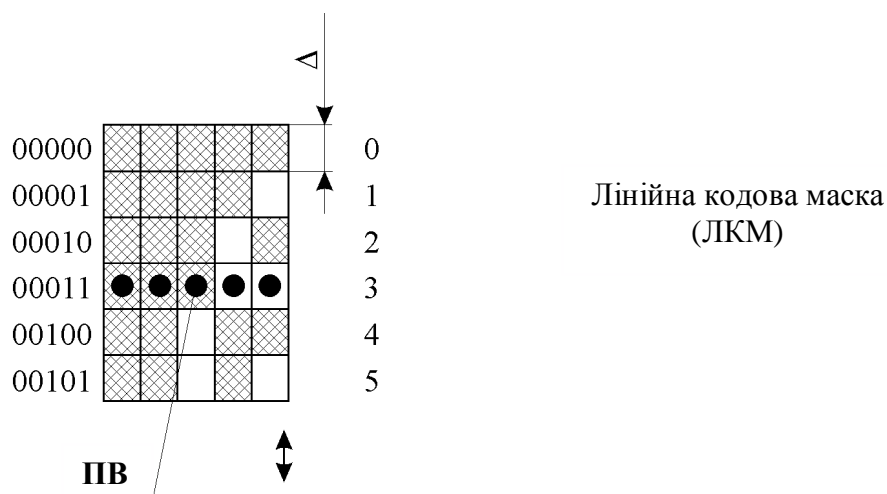
для лінійної шкали

$$P_l = \log_2 \frac{L}{\Delta} \quad ;$$

де L - довжина шкали.

Кожному положенню кодової шкали відповідає цілком певне двійкове число. Зчитування інформації з маски здійснюється за допомогою лінійки приймачів випромінювання, розміщених за вузькою щілиною. Число приймачів відповідає числу розрядних доріжок.

Існуючі кодові перетворювачі кутових і лінійних переміщень забезпечують дозвіл 0,02-0,05 мм або 10-20 кут.сек. Подальше підвищення роздільної здатності веде до невиправданого технологічного і



енергетичного зменшення ширини кодового інтервалу (кроку квантування) і збільшення габаритів через збільшення числа розрядів.

У кодових аналізаторах послідовного рахунку використовується підрахунок числа штрихів, що пройшли щодо нерухомого приймача

випромінювання при переміщенні лінійної шкали (рис.2.43). Роздільна здатність аналізатора визначається ціною поділки лінійної шкали.

Однак довгі шкали з малою ціною поділки нетехнологічні і мають високу вартість.

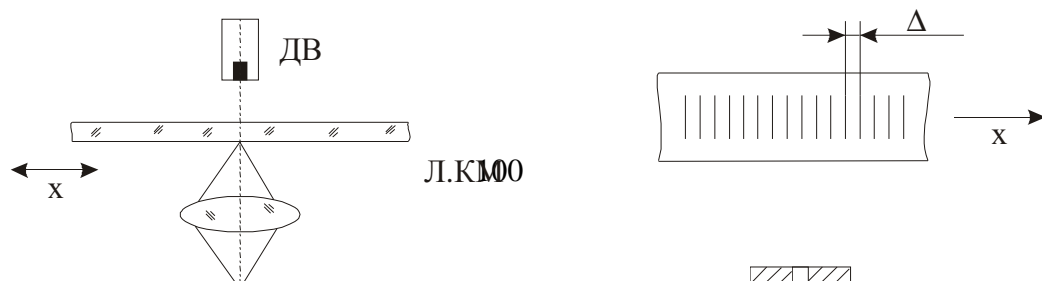
Для підвищення роздільної здатності без зменшення ціни поділки використовуються різноманітні інтерполятори, наприклад лінійки приймачів випромінювання, встановлені за принципом шкали поперечного масштабу.

Сполучення лінійної шкали з приймачем випромінювання та інтерполятором зазвичай здійснюється простою оптичною системою. Перед ПВ встановлюється вузька щілинна діафрагма.

Облік напрямку переміщення лінійної шкали здійснюється двома або трьома приймачами випромінювання, зсунутими один щодо одного на ширину чутливої площадки. Логічний пристрій фіксує послідовність проходження штрихом кожного приймача, визначає напрям переміщення і видає команду (+ чи -) на лічильник імпульсів.

2.2.4 Амплітудний аналізатор-модулятор

Вимірювання робочого відрізка [15, 19]. Установка для вимірювання робочого відрізка складається з коліматора, у фокусі об'єктива якого встановлена кругла діафрагма, досліджуваної оптичної системи і амплітудного аналізатора-модулятора, за яким встановлено приймач випромінювання (рис. 2.44). Аналізатор являє собою секторний диск(з



прозорим і непрозорим секторами), вісь обертання якого паралельна оптичній осі установки. При розрахунку схеми діаметр діафрагми коліматора вибирають таким чином, щоб її зображення, яке передається досліджуваною оптичною системою, точно вписувалося в сектор растра.

При розфокусуванні зображення діафрагми в площині растра буде розмиватися і збільшуватися.

Якщо растр обертається, променистий потік буде модулюватися за рахунок перехрестя зображення діафрагми непрозорими секторами растра. На виході приймача випромінювання з'явиться змінний електричний сигнал, глибина модуляції якого залежить від співвідношення розмірів зображення діафрагми і ширини сектора растра.

Максимальна глибина модуляції і максимальний змінний сигнал будуть при рівності зображення діафрагми і сектора. У цьому випадку відбувається повне перекриття і повне відкриття зображення діафрагми. При збільшенні розмірів зображення діафрагми, перекриття буде неповним і глибина модуляції (величина змінного сигналу) зменшиться. Якщо зображення діафрагми заповнить парне число секторів растра, модуляція буде відсутня, тому що площі відкритого та закритого ділянок зображення діафрагми будуть рівні між собою при будь-якому повороті растра. Т.ч. по максимуму змінного сигналу можна визначити положення досліджуваної оптичної системи, при якому її площина зображення збігається з площиною растра і по цьому положенню знайти робоче відстань.

2.2.5 Аналізатор зображення – багатоелементний приймач випромінювання. Оптико-електронний автоколіматор

Аналізатор зображення у вигляді багатоелементного приймача випромінювання забезпечує високу стабільність та амплітуднуперешкодозахищеність, однак як всідискретніструктури призводить до

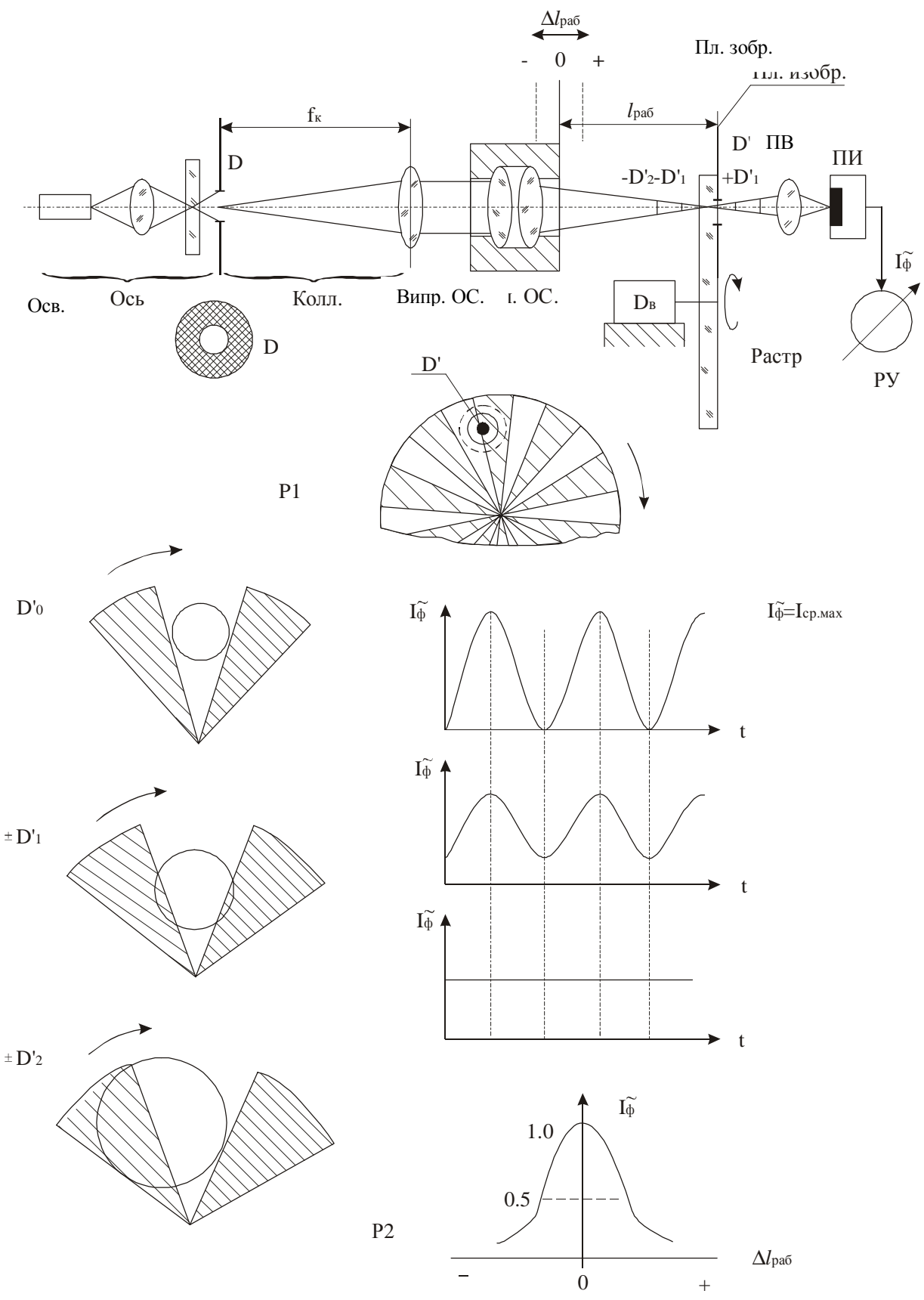


Рис. 2.44 Вимірювання робочого відмітку

стрибокподібної статичній характеристиці, що має зону нечутливості, яка дорівнює відстані між окремими елементами.

Оптична схема автоколіматора [16] містить світлорозділювач, через який поєднані V-образна марка (сітка) і лінійка приймачів випромінювання (ПЗС-структура). Марка і лінійка знаходяться в фокальній площині об'єктива. Нахил дзеркала, встановленого перед об'єктивом по двох координатах викликає переміщення автоколімаційного зображення марки відносно лінійки приймачів також по двох координатах (рис. 2.45).

Електронний блок виробляє послідовне опитування приймачів випромінювання, визначаючи на які з них потрапляє автоколімаційне зображення марки. Після цього, за заданими алгоритмами, визначається зміщення марки по осях y і z і відповідні нахили дзеркала.

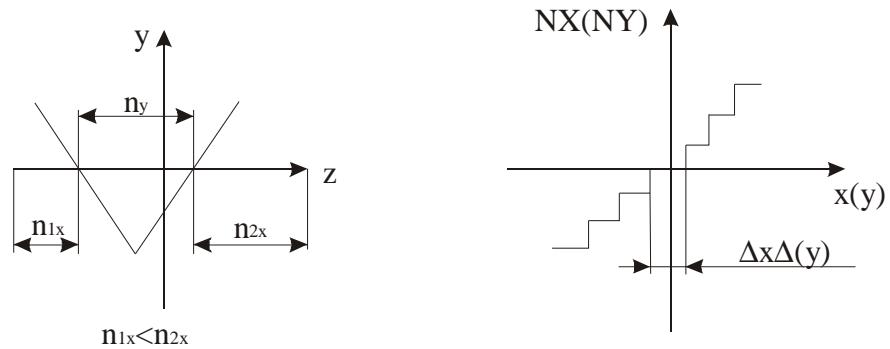
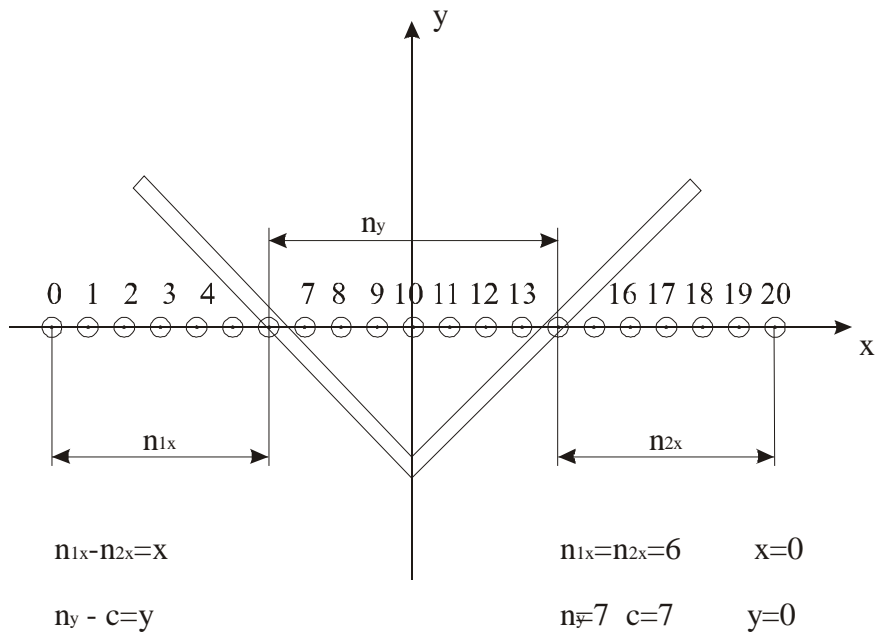
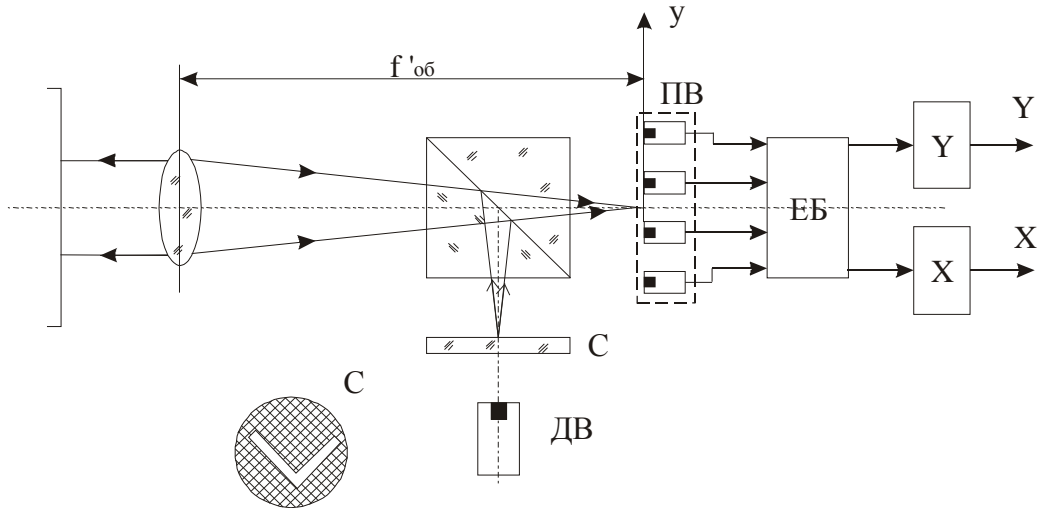
2.2.6 Час-імпульсний аналізатор зображення. Оптико-електронний мікроскоп

Призначений для точного наведення на штрих шкали і для вимірювання неузгодженості між штрихом і віссю мікроскопа [22]. Використовується в компараторах, довгомірах, відлікових системах, що працюють з штриховими шкалами.

Час-імпульсний аналізатор зображення забезпечує монотонність статичної характеристики, амплітудну перешкодозахищеність, високу точність (вимірювання часу). Ціна поділу може бути змінною.

Світло від джерела випромінювання через світлорозділювач (схема Бека) спрямовується на шкалу, висвітлюючи деяку її ділянку ($d_{ок}'$) (рис. 2.46). Величина цієї ділянки визначає поле зору мікроскопа. Відбившись від шкали, світло прямує в приймальний канал, поле зору

якого набагато менше полязору мікроскопа поосвітлювальному каналу.
Завдяки вібратору з дзеркалом, встановленому в приймальному



105
Рис. 2.45 Автоколіматор з лінійкою ЛВ

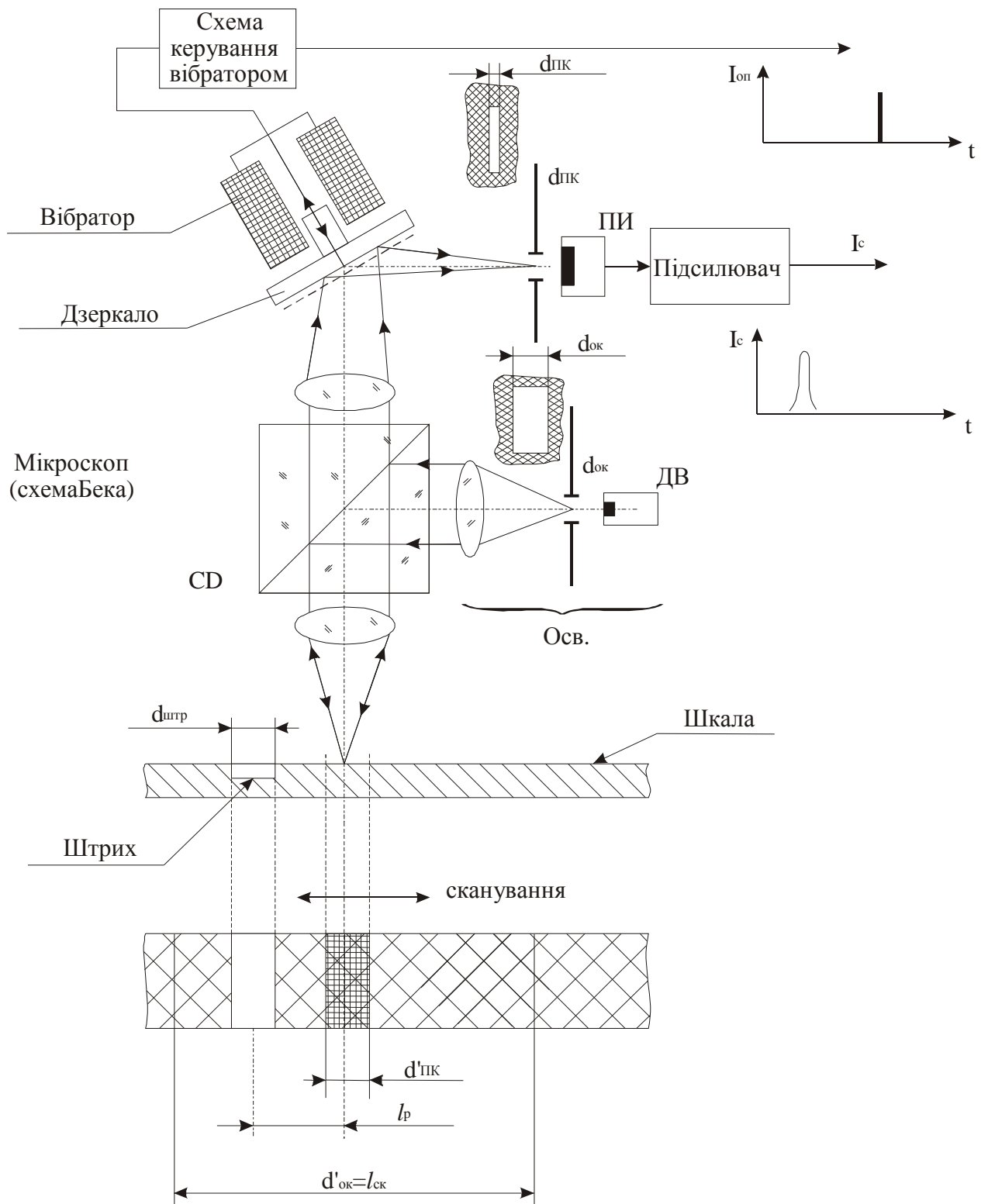


Рис. 2.46 Фотоелектричний мікроскоп (схема принципова)

каналі, його поле зору ($d_{\text{пк}}'$) робить зворотно-поступальні рухи уздовж поля зору мікроскопа і як би "переглядає" його (сканування). При збігу поля зору приймального каналу з відбиваючим штрихом шкали, потік випромінювання, що надходить на приймач різко збільшується і на його виході формується імпульс фотоструму (I_c) (рис. 2.47).

Цей імпульс подається на один із входів електронного ключа, відкриваючи його. На інший вхід подається опорний сигнал ($I_{\text{оп}}$), що виробляється схемою управління вібратора, який закриває ключ. За час, коли ключ відкритий, через нього проходить певна кількість високочастотних імпульсів від спеціального генератора (ГВІ). Кількість високочастотних імпульсів, що пройшли через ключ на лічильник, буде пропорційно часовому інтервалу між опорним сигналом і імпульсом фотоструму, тобто пропорційно лінійній неузгодженості між віссю мікроскопа і штрихом шкали, тому що поява опорного сигналу відбувається в один і той же час (при збігу поля зору приймального каналу з віссю мікроскопа). Знак неузгодженості визначається тимчасовим положенням імпульсу фотоструму щодо опорного сигналу, а ціна поділу всього відлікового пристрою – частотою високочастотних імпульсів (чим вище частота, тим менша ціна поділки).

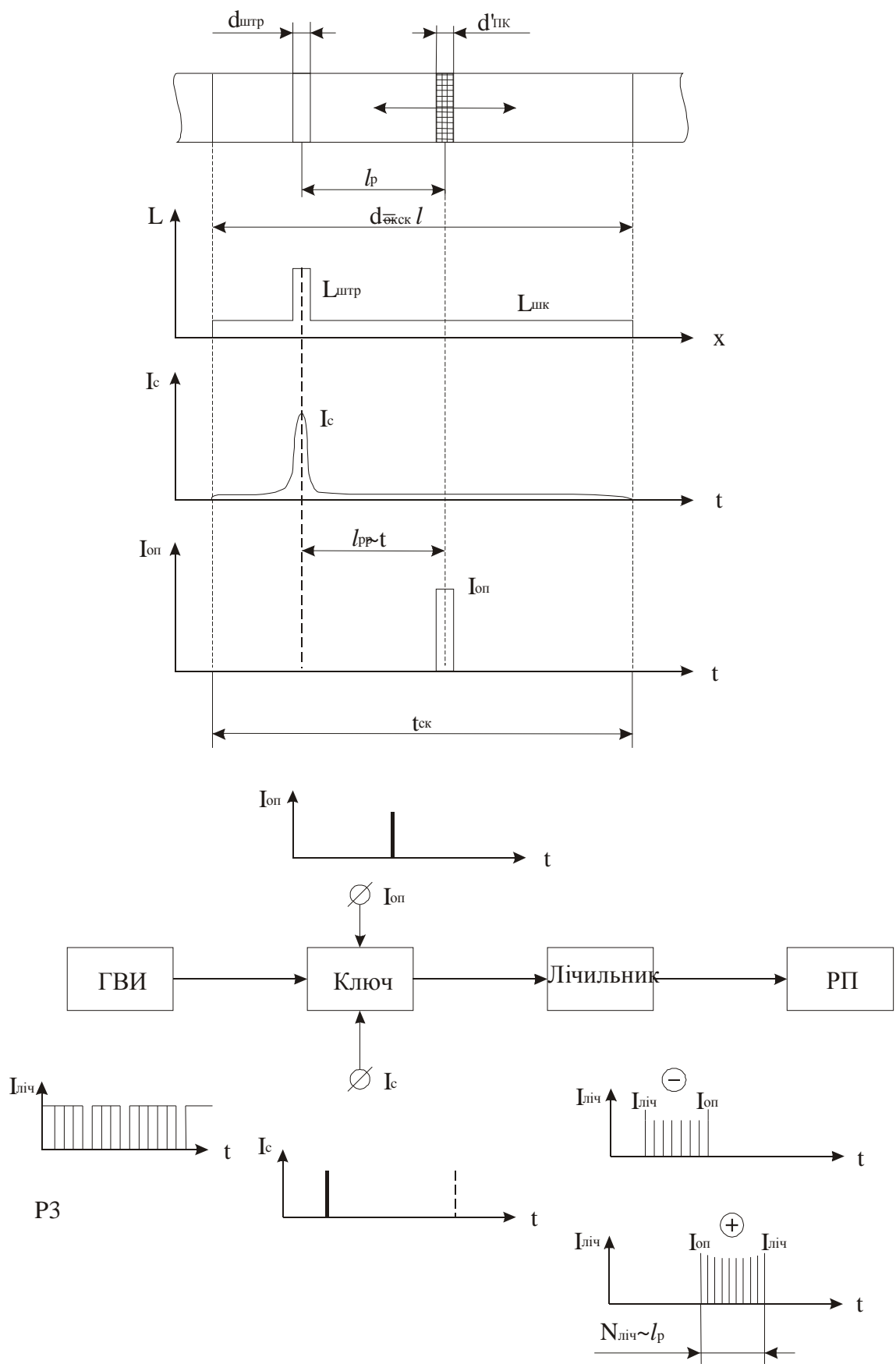


Рис. 2.47 Формування сигналу

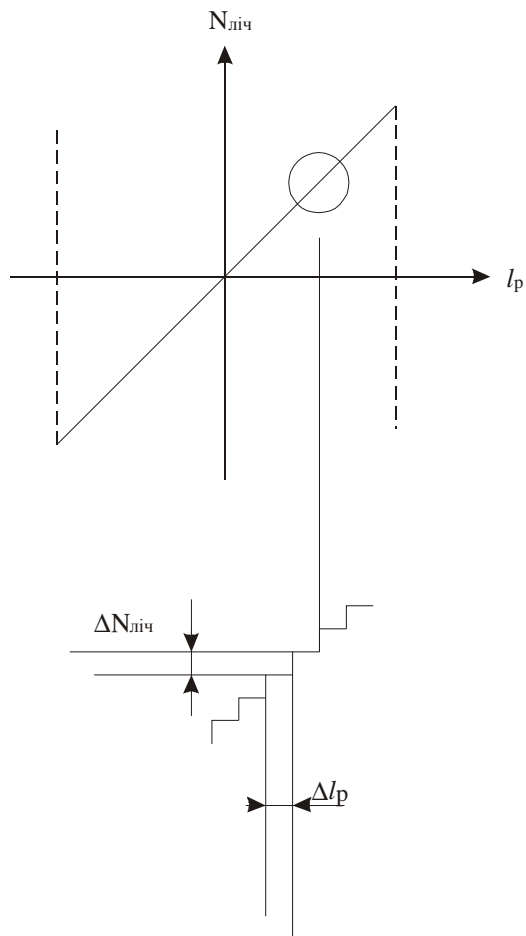
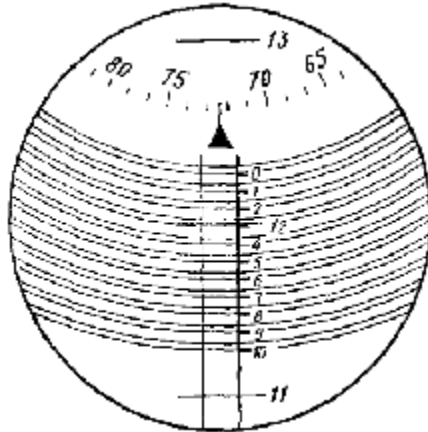


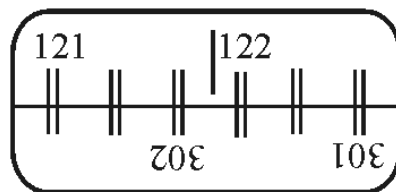
Рис. 2.48 Фотоелектричний мікроскоп (градувальна характеристика)

2.3 Контрольні запитання та завдання

1. Який вид поперечного наведення перехрестя дає найбільшу точність? Яка властивість зору при цьому використовується?
2. Які відлікові системи вимірювальних мікроскопів ви знаєте?
3. Яка відлікова система вимірювального мікроскопа зображена. Зніміть відлік.



4. Назвіть основні характеристики зорової труби Кеплера. Якщо в оптичну систему додати призмову обертальну систему, що зміниться?
5. Перерахуйте окуляри, що використовуються в автоколіматорах. Обґрунтуйте переваги та недоліки кожного з них.
6. Зніміть відлік по шкалі гоніометра.



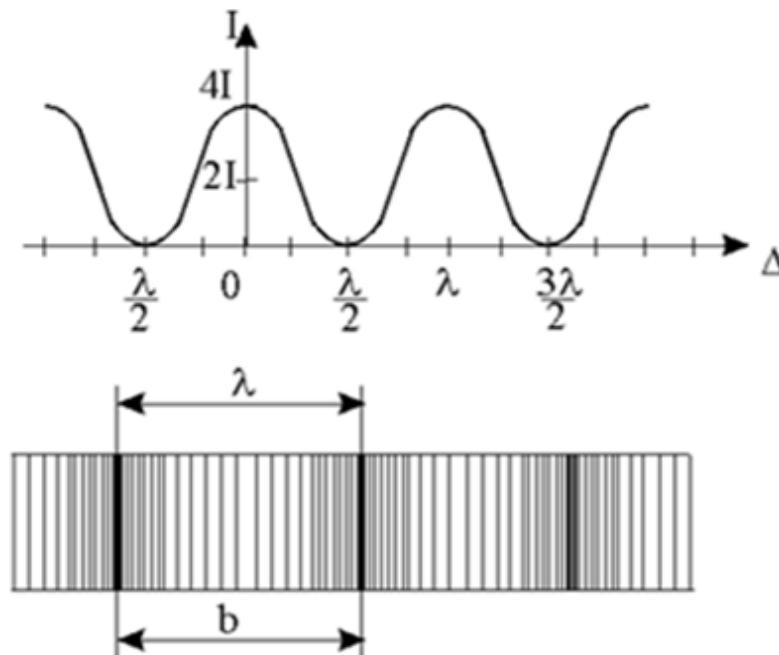
7. Як за допомогою гоніометра виміряти заломний кут дисперсійної призми?
8. Яким чином здійснюється контроль увігнутого параболоїда? Яка властивість при цьому використовується? Яка роль пентапризми?
9. Яке призначення та в чому принципова відмінність оптиметрів, ультраоптиметрів та оптикаротів?
10. Суть тіньового методу Фуко. Переваги та недоліки даного методу.
11. Обґрунтуйте переваги оптико-електронного автоколіматора порівняно з оптико-механічним.
12. Опишіть принцип дії оптико-електронного мікроскопа.

3 Хвильові вимірювання

3.1 Інтерференційні вимірювання

3.1.1 Елементи теорії вимірювальних інтерферометрів.

Інтерференція когерентних хвиль. Якщо при взаємодії двох або декількох світлових хвиль відбувається перерозподіл їх сумарної енергії, то виникає вище інтерференції утворюється характерна інтерференційна картина (рис. 3.1), яка представляє собою послідовне чергування максимумів і мінімумів інтенсивності у вигляді смуг або кілець [23].



Ширина інтерференційної картини

Рис. 3.1 Інтерференційна картина

Необхідною умовою для появи інтерференції є когерентність світлових хвиль, тобто рівність частот цих хвиль та постійна в часі різниця фаз. Ці умови задовольняють тільки монохроматичні світлові хвилі, в основі появи яких лежать гармонійні коливання.

$$y = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де y – значення коливальної величини в даний момент часу t , A – амплітуда коливань, ω – кутова частота коливання, $\omega t + \varphi_0$ – фаза коливань, φ_0 – початкова фаза.

Застосування принципу суперпозиції [24] до світлових хвиль означає, що результуюча напруженість електричного поля двох світлових хвиль, які проходять через одну точку, дорівнює векторній сумі напруженостей електричних полів кожної з хвиль окремо (Рис. 3.2а). У випадку, коли напруженості складових полів рівні, але протилежно направлені, напруженість результуючого поля дорівнює нулю. Якщо ж напрям векторів напруженості електричних полів взаємодіючих хвиль однаково направлені, то відбувається підвищення інтенсивності світла (Рис. 3.2б).

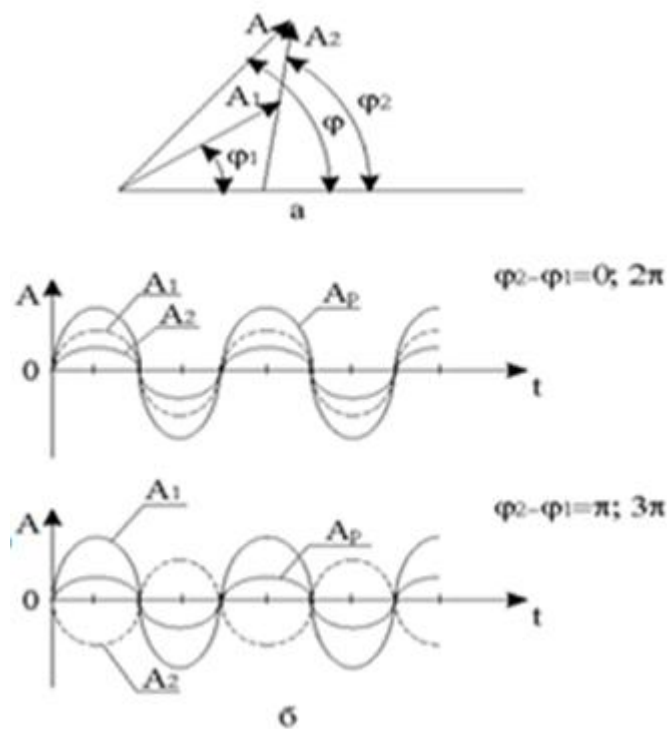


Рис. 3.2 Складання гармонічних коливань

Амплітуда результуючого коливання знаходиться шляхом геометричного додавання амплітуд вихідних коливань [13]

$$A_p^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \delta\varphi,$$

де $\delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$.

Найважливішою характеристикою при складанні гармонічних коливань є інтенсивність результуючого коливання. Поняття інтенсивність умовне. Під інтенсивністю коливань I мають на увазі величину, пропорційну квадрату амплітуди $I \approx A^2$.

Інтенсивність результуючого коливання [13, 23]

$$I_p = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta\varphi \quad (3.1)$$

Енергія коливання пропорційна інтенсивності.

Аналізуючи вираз (3.1) з точки зору вимірювання різниці фаз приводить до наступних висновків:

$$1. \text{ При різниці фаз } \varphi_2 - \varphi_1 = 0; 2\pi; \dots 2\pi m \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1, \quad I_p = I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$2. \text{ При різниці фаз } \varphi_2 - \varphi_1 = \pi; 3\pi; \dots \pi(2m + 1) \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1, \quad I_p = I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

В першому випадку відбувається підсилення результуючого коливання, в другому—ослаблення(рис. 3.1б)

Якщо при цьому $I_1 = I_2$, то $I_{\max} = 4I_1$, а $I_{\min} = 0$ (тобто відбувається повне гасіння світла).

Зазвичай ці умови визначаються не через різницю фаз $\varphi_2 - \varphi_1$, а через різницю шляхів ходу хвиль, так як головну роль при утворенні будь-якої інтерферуючими променями, пов'язана з різницею фаз

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}.$$

Максимуми інтерференційної картини[24] мають місце в тому випадку, коли різниця ходу хвиль, що інтерферують, рівна парному числу півхвиль $\frac{\lambda}{2}$ або цілому числу довжин хвиль λ

$$I_p = I_{\max} \quad \text{при} \quad \Delta = 0; \lambda; 2\lambda; \dots m\lambda$$

Мінімуми інтерференційної картини[13] виникають при різниці ходу хвиль, що інтерферують, рівному непарному числу півхвиль $\frac{\lambda}{2}$

$$I_p = I_{\min} \quad \text{при} \quad \Delta = \frac{\lambda}{2}; \frac{3\lambda}{2}; \dots (2m + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

З викладеного виходить, що різниця ходу, що створюється оптичною інтерференційною схемою, складатиме число довжин хвиль, що укладаються на відрізьку, який є різницею оптичних довжин шляхів хвиль, що інтерферують.

Важливою кількісною характеристикою якості інтерференційної картини є контраст (видимість інтерференційних смуг) [23], для оцінки якого використовують функцію

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3.2)$$

Контраст, розрахований за формулою (3.2) може змінюватися від 1 до 0. Причинами, що знижують контраст інтерференційної картини, є нерівність інтенсивностей, фонове засвічення, розмір джерела випромінювання, його немонохроматичність.

Способи отримання інтерференційної картини [25]. Для здійснення двопроменевої інтерференції в будь-якій реальній схемі необхідно від одного джерела випромінювання отримати дві когерентні хвилі, а потім звести їх в площину спостереження.

Існують два способи ділення світлової хвилі (рис. 3.3):

1. діленням хвилі по її фронту (інтерференція Френеля);
2. діленням хвилі по амплітуді (інтерференція Ньютона).

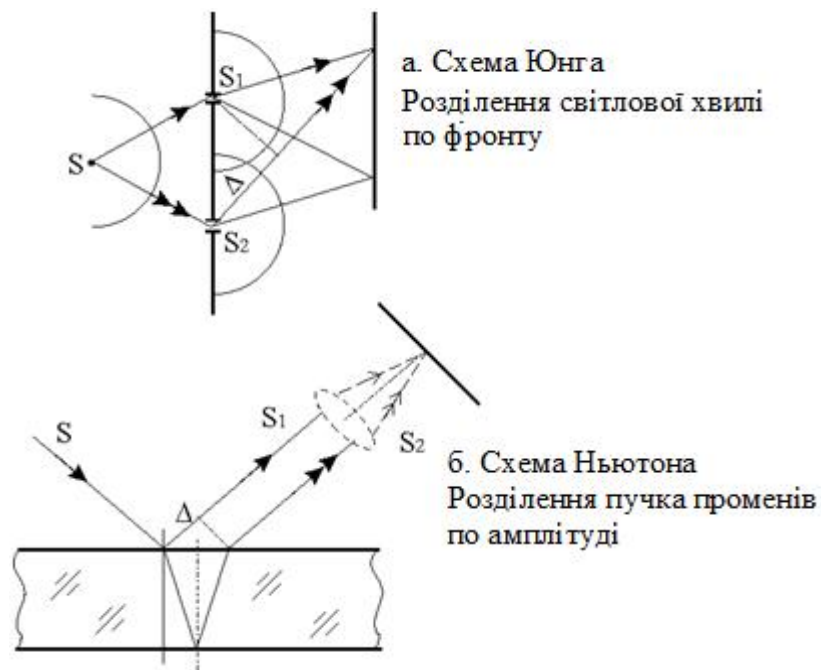


Рис. 3.3 Способи ділення світлової хвилі

Відмітною властивістю першого способу є ділення первинної хвилевої поверхні на дві частини за площею з подальшим накладенням однієї частини на іншу. За таким принципом діють так звані біосистеми – дзеркала Френеля, білінза Френеля і ін. При другому способі когерентні промені, що інтерферують, отримують шляхом ділення падаючого паралельного пучка по амплітуді. Таку інтерференцію можна реалізувати за допомогою скляної плоскопаралельної пластини або повітряної пластини, утвореної повітряним шаром між двома пластинами. Падаючий

промінь частково відбивається, а частковозаломлюється в друге середовище, що і означає ділення первинного променя по амплітуді. Цей промінь когерентний і інтерферують між собою.

Розрізняють два види інтерференції на пластині: смуги рівного нахилу і смуги рівної товщини [25, 26]. Виникнення інтерференційної картини у вигляді смуг рівної товщини обумовлене інтерференцією світла, відбитого від передньої і задньої поверхні пластини змінної товщини. Для тих ділянок плівки, які мають однакову товщину, виходить однакова різниця ходу. Кожному значенню довжини хвилі променів, що інтерферують, відповідає своя різниця ходу (Рис. 3.4).

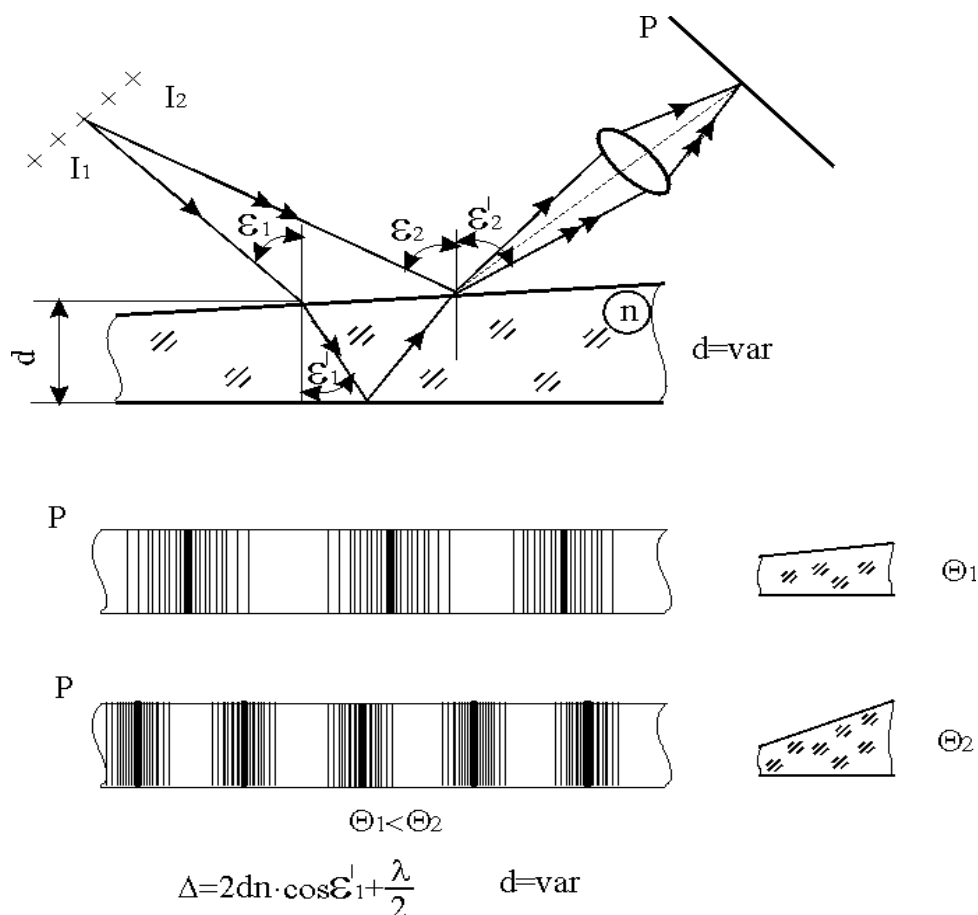


Рис. 3.4 Смуги рівної товщини

Смуги рівного нахилу [13, 25] є інтерференційною картиною у вигляді системи світлих і темних смуг, що чергуються, або кілець. Таку картину спостерігають при освітленні плоскопаралельної пластини постійної товщини монохроматичним джерелом випромінювання (Рис. 3.5).

Різниця ходу променів, що інтерферують, залежатиме лише від кута падіння променів, оскільки n і d в даному випадку постійні. Оскільки смуги рівного нахилу локалізовані в нескінченності, то їх можна спостерігати за допомогою зорової труби, або спроектувати за допомогою об'єктиву інтерференційну картину на екран.

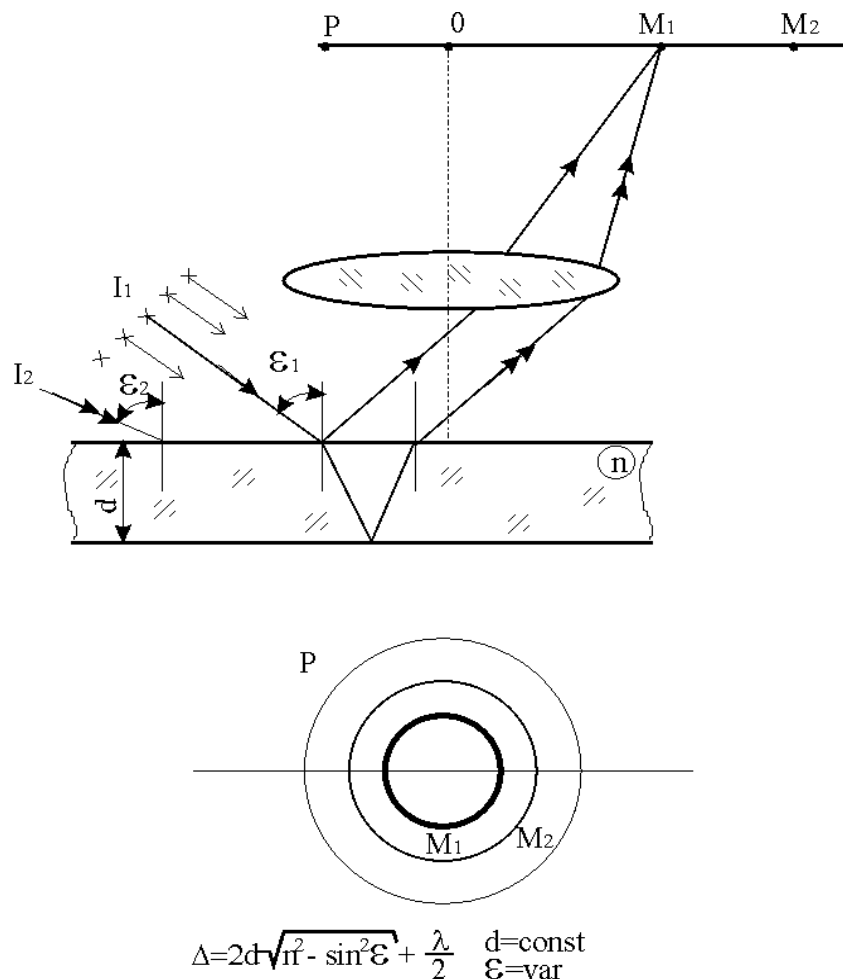


Рис. 3.5 Смуги рівного нахилу

3.1.2 Основні типи вимірювальних інтерферометрів

Оптичні прилади, за допомогою яких по спостережуваній в них інтерференційній картині можна судити про інші оптичні явища або оптичні властивості речовини, називають інтерферометрами. Розрізняють двопроменеві і багатопроменеві інтерферометри. Багатопроменеві інтерферометри мають високі роздільну здатність і дисперсію. За допомогою цих приладів для довжини хвилі можна отримувати інтерференційні смуги дуже малої ширини (великароздільна здатність), віддалені одна від одної на великій відстані (велика дисперсія). Ці властивості важливі при спектроскопічних спостереженнях. Тому багатопроменеві інтерферометри застосовують як інтерференційні спектроскопи.

Двопроменеві інтерферометри мають малу роздільну здатність і дисперсію і в спектроскопії не застосовуються. Проте з їх допомогою можна з великою точністю вимірювати показники заломлення тіл і їх геометричні параметри.

У двопроменевих і багатопроменевих інтерферометрах в основному використовуються інтерференція типу Ньютона. Френелівська інтерференція застосовується дуже рідко.

Розрізняються інтерферометри лише методом здобуття когерентних хвиль і конструкцією, складність якої залежить від того, яку характеристику безпосередньо на приладах вимірюють.

Інтерферометр Фізо [11, 23]. Застосовуються для контролю плоских поверхонь. Явище інтерференції виникає в повітряному шарі міжталонною і досліджуваною пластинами, на які спрямує паралельний пучок

променів від монохроматичного джерела випромінювання. Промені, відбиті від верхньої поверхні досліджуваної пластини і від нижньої поверхні еталонною, інтерферують, утворюючи смуги рівної товщини. Промені, що по дорозі назад інтерферують, проходять світлоділник і збираються у фокальній площині об'єктиву (Рис. 3.6). Інтерференційну картину можна розглядати візуально, в окуляр або лупу. Площини контрольованої пластини оцінюють за формою інтерференційних смуг. Ширину і напрям смуг регулюють нахилом столу. Якщо поверхня досліджуваної пластини ідеально плоска, то інтерференційні смуги будуть прямолінійними. Навіть самі незначні відступи від плоскості приводять до викривлення смуг. Оцінюючи викривлення смуг, можна визначити загальне відхилення від площинності і розмір місцевих погрешностей з точністю до 0,1 ширини інтерференційної смуги.

Інтерферометр Майкельсона [25]. Це класичний прилад широко вживаний для контролю відхилення поверхонь оптичних деталей від ідеальної плоскості, неоднородностей в склі і ін.

Промінь світла, падаючий на світлоділильну пластину, розділяється на два променя. Так утворюється двівітків порівняння, які розташовуються під кутом 90 градусів один до одного. У кожній гілці знаходиться плоске дзеркало, одне з яких можна пересувати паралельно первинному положенню.

Когерентні промені, пройшовши подвійну дорогу в кожній з гілок інтерферометра, після віддзеркалення від дзеркал, знов'єднуються на поверхні світлоділильної пластини і інтерферують. На дорозі другого пучка променів вводять компенсуючу пластину, що має таку ж товщину, що і світлоділильна пластинка, щоб компенсувати різницю ходу, що виникає в

результаті трикратного проходження променів через світлоділильну пластину в одному каналі (рис 3.7.).

Дія інтерферометра Майкельсона зводиться до дії тонкого повітряного шару в еквівалентній оптичній схемі. Різниця ходу променів в цій схемі і вигляд інтерференційної картини обумовлені нерівністю гліок інтерферометра і залежать від форми дзеркал і кутів, які утворюють цідзеркала з падаючими на них променями.

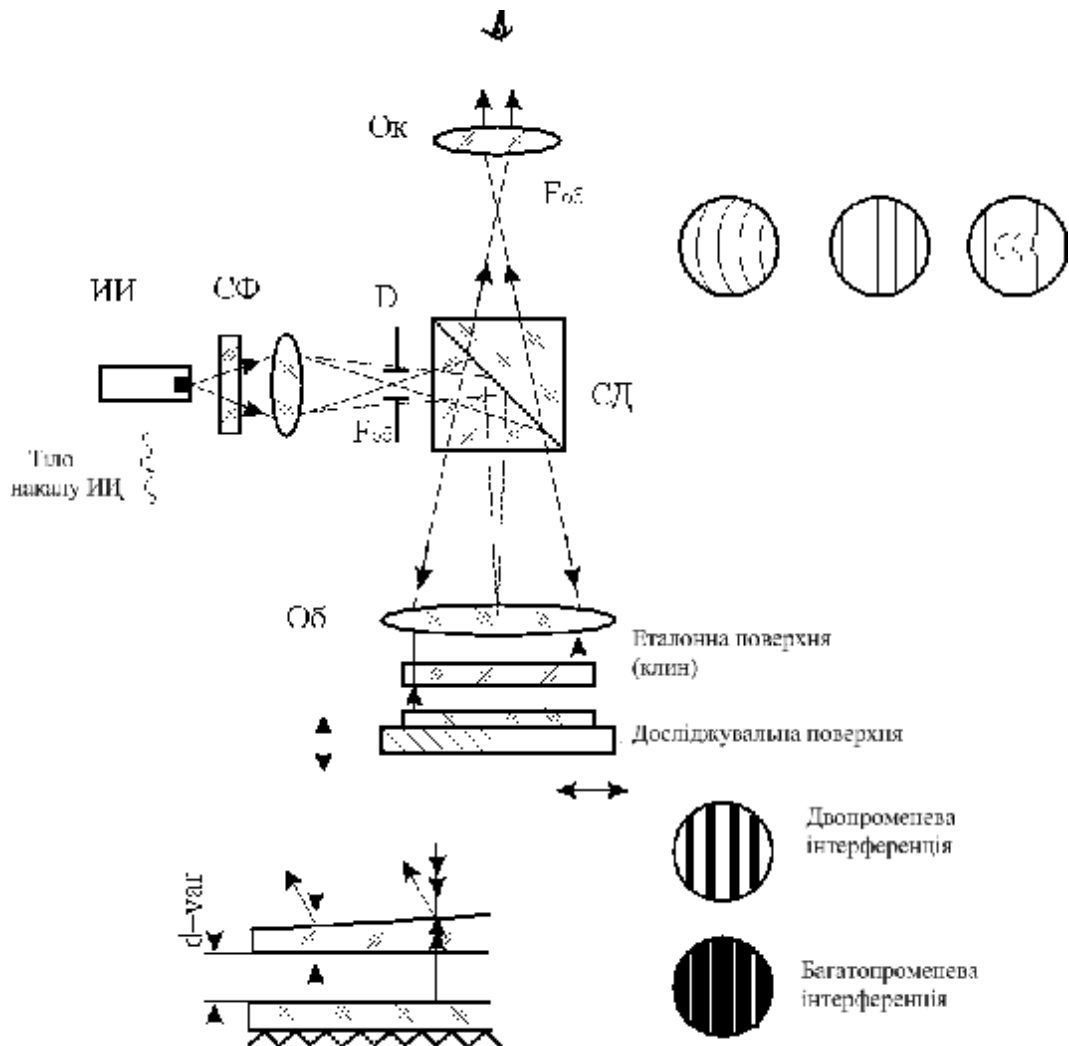


Рис. 3.6 Інтерферометр Фізо

При плоских дзеркалах, встановлених перпендикулярно до падаючих променів, повітряний шар має вигляд плоско-паралельної пластини, в якій формується інтерференція типу Ньютона з утворенням кілець рівного нахилу. Інтерференційна картина спостерігається у фокальній площині об'єкту за допомогою окуляра або проектується на екран (рис. 3.8). При нахилі одного з дзеркал повітряний шар набуває форми клину і в інтерферометрі утворюються смуги рівної товщини [25]. Оптична схема

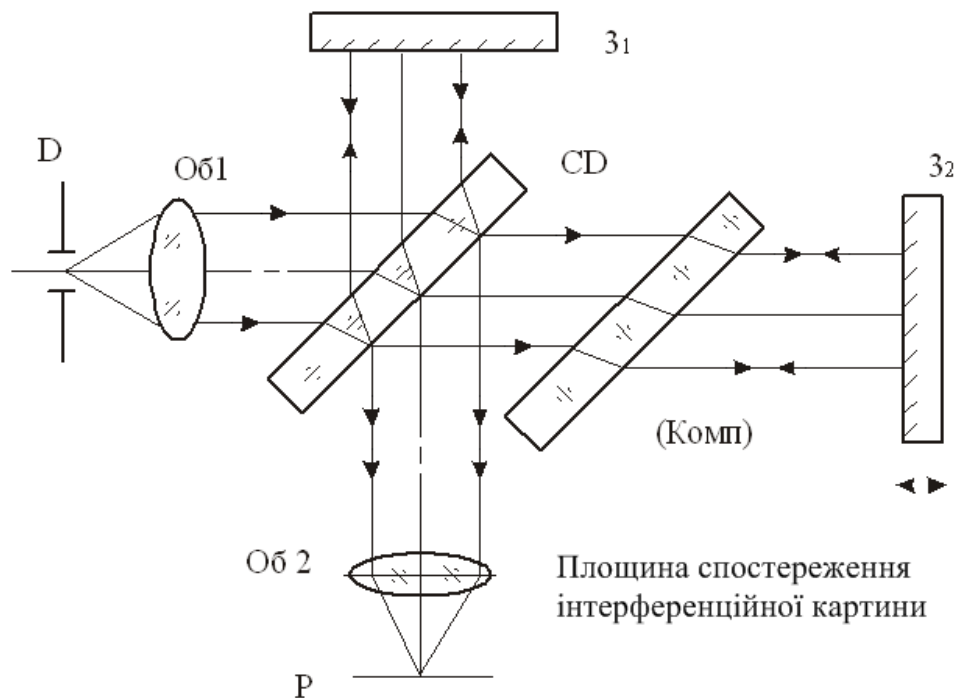


Рис. 3.7 Інтерферометр Майкельсона

декілька змінюється. Польова діафрагма проектується в плоскість дзеркал, тобто пучок променів в гілках інтерферометра з паралельного стає пучком, який сходиться. У зворотному ході променів вони потрапляють в об'єктив, що будує зображення дзеркал і вторинне зображення польової діафрагми в своїй предметній площині, яка є полем інтерференції. Це полерозглядається через окуляр. Таким чином одночасно з

інтерференційною картиною видно поверхні дзеркал, обмежені зображеннями польової діафрагми (рис. 3.9).

Схема інтерферометра Майкельсона покладена в основу багатьох складних інтерферометрів, які застосовуються для високоточних вимірів.

Інтерферометр Цендера-Маха [27]. Конструктивно інтерферометр складається з двох блоків, кожен з яких включає одне напівпрозоре і одне повністю відбиваюче дзеркало. Самі блоки можуть бути рознесені на значну відстань (~1м), що дозволяє досліджувати нагріті об'єкти.

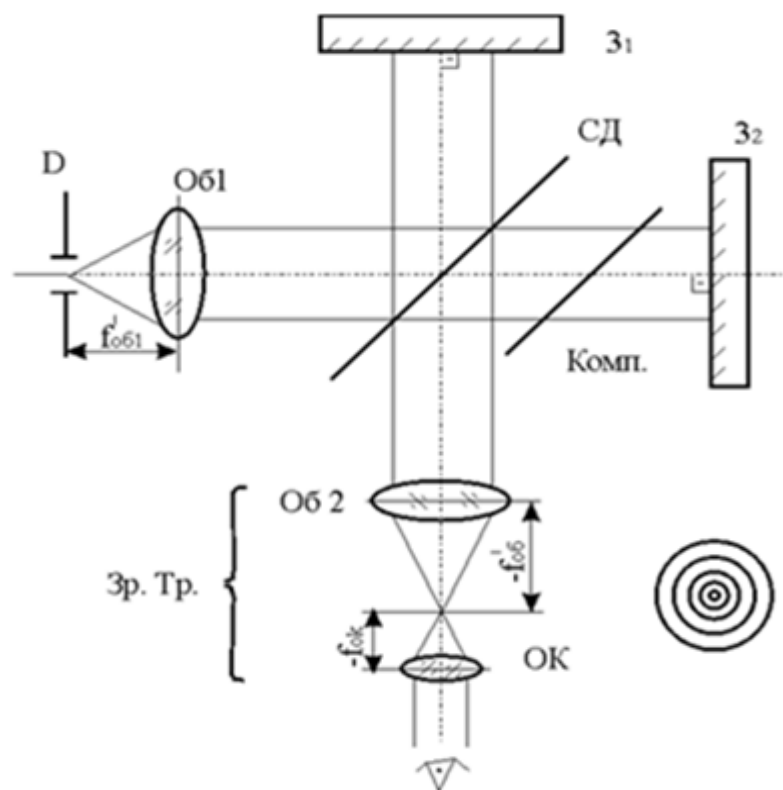


Рис. 3.8 Еквівалентна схема інтерферометра при спостереженні смуг рівного нахилу

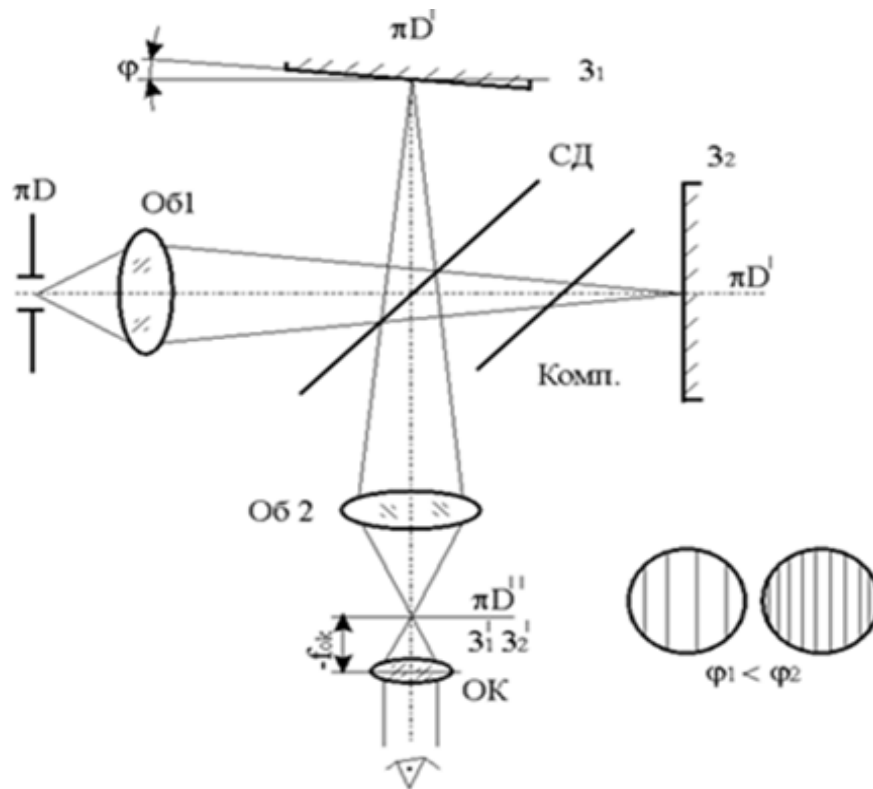


Рис. 3.9 Еквівалентна схема інтерферометра Майкельсона при спостереженні смуг рівної товщини
 Паралельний пучок променів, що входить від джерела в інтерферометр, розділяється напівпрозорим дзеркалом на два пучки, які після віддзеркалення від дзеркал знов з'єднуються напівпрозорим дзеркалом і інтерферують (рис.3.10).

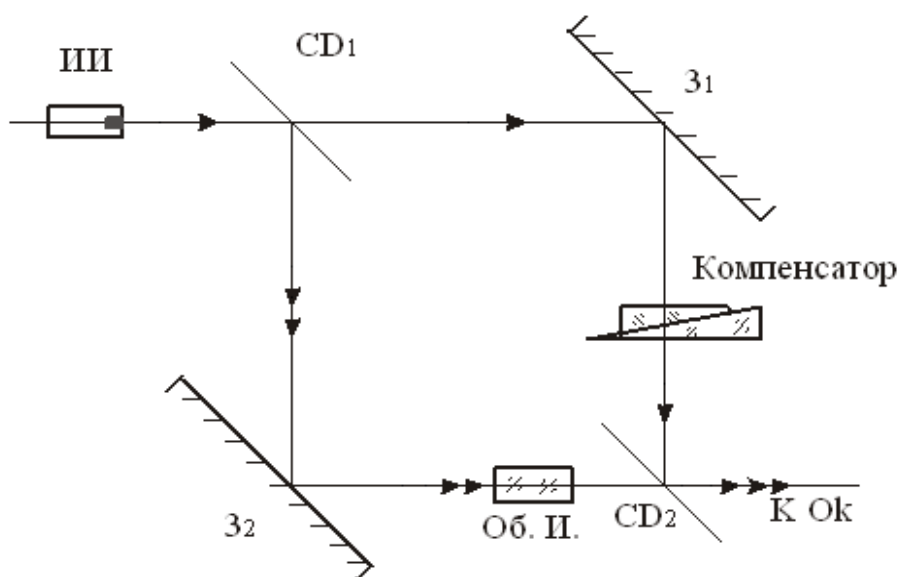


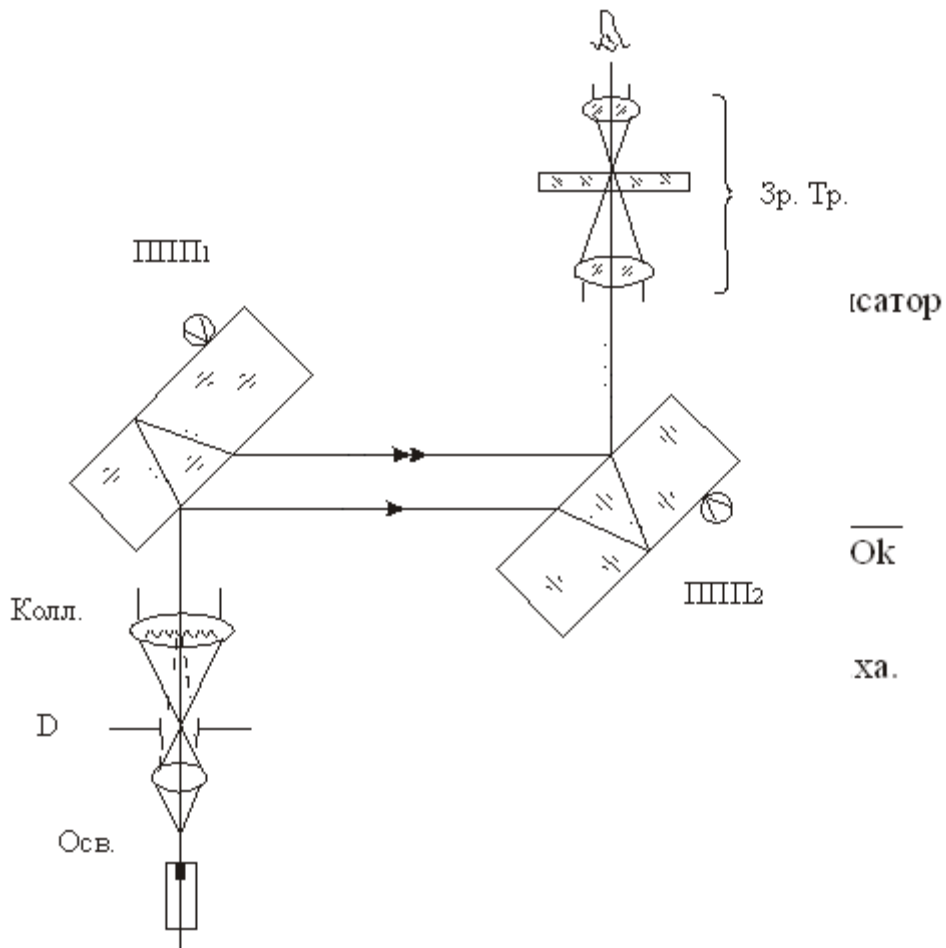
Рис. 3.10 Інтерферометр Цендера-Маха

Якщо в одну з гілок ввести прозорий об'єкт, то по вигляду отриманої інтерференційної картини можна оцінити однорідність і інші якості досліджуваного об'єкту.

Якщо дзеркала встановлені паралельно, то спостерігають інтерференцію рівного нахилу. При установці дзеркал під деяким кутом утворюються смуги рівної товщини. Для вирівнювання довжин оптичних хвиль в гілках інтерферометра в одну з них поміщають клиновий компенсатор.

Інтерферометр використовують для точних вимірів показника заломлення газів і пари, їх щільності і ін.

Інтерферометр Жамена [25]. У схемі інтерферометра використовується дві товсті плоско-паралельні пластини, встановлені паралельно одне-одному. Паралельний пучок променів, що направляється на одну з пластин, розділяється на два пучки, які з'єднуються на іншій пластині і інтерферують. У фокальній площині об'єктиву зорової труби утворюється інтерференційна картина у вигляді смуг рівного нахилу, яка спостерігається через окуляр (рис. 3.11).



Монохроматичність випромінювача [27]. На контраст інтерференційної картини значний вплив робить міра монохроматичності джерела випромінювання.

Біле світло є сукупність некогерентних монохроматичних компонентів, що займають деякий спектральний інтервал. Кожен компонент утворює свою інтерференційну картину, а повна інтенсивність в будь-якій точці поля дорівнює сумі інтенсивностей монохроматичних картин.

Центральні (нульового порядку) максимуми всіх монохроматичних картин збігаються в точці поля з різницею ходу. Із віддаленням від центру, монохроматичні смуги всі більш зміщуються один відносно одного, оскільки ширина смуги пропорційна довжині хвилі $b \sim \lambda$.

В центрі картини розташовується біла (ахроматична) нульова смуга, обмежена з обох боків майже чорними смугами. Далі по обидві сторони від ахроматичної смуги розташовуються кольорові смуги, причому насиченість кольорів зменшується до нуля до сьомої-восьмої смуги.

Цей ефект пояснюється тим, що починаючи з різниці ходу $\Delta \approx 5$ мкм, в кожній точці поля складаються різні кольорові картини, але оскільки їх не менше трьох, і їх кольори рівномірно розташовані по спектру, то результат складання скрізь однаковий – білий колір (рис. 3.12).

Ахроматичну смугу нульового порядку широко використовують як початок відліку. Для оцінки контрасту інтерференційної картини при використанні немонохроматичного випромінювання відзначимо, що темні проміжки між смугами зникнуть, коли максимуми k -того порядку для довжини хвиль $\lambda + \Delta\lambda$ збігаються з максимумами $k+1$ порядку для довжини хвилі λ .

Тому умови втрати контрасту інтерференційної картини унаслідок немонохроматичності випромінювача має вигляд

$$(k + 1)\lambda = k(\lambda + \Delta\lambda),$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{k}.$$

Звідси витікає, що контраст інтерференційної картини погіршується при переході до смуг вищого порядку (рис. 3.12).

Для хорошого спостереження інтерференційної картини необхідно, щоб джерело випромінювання містив малий інтервал довжин хвиль.

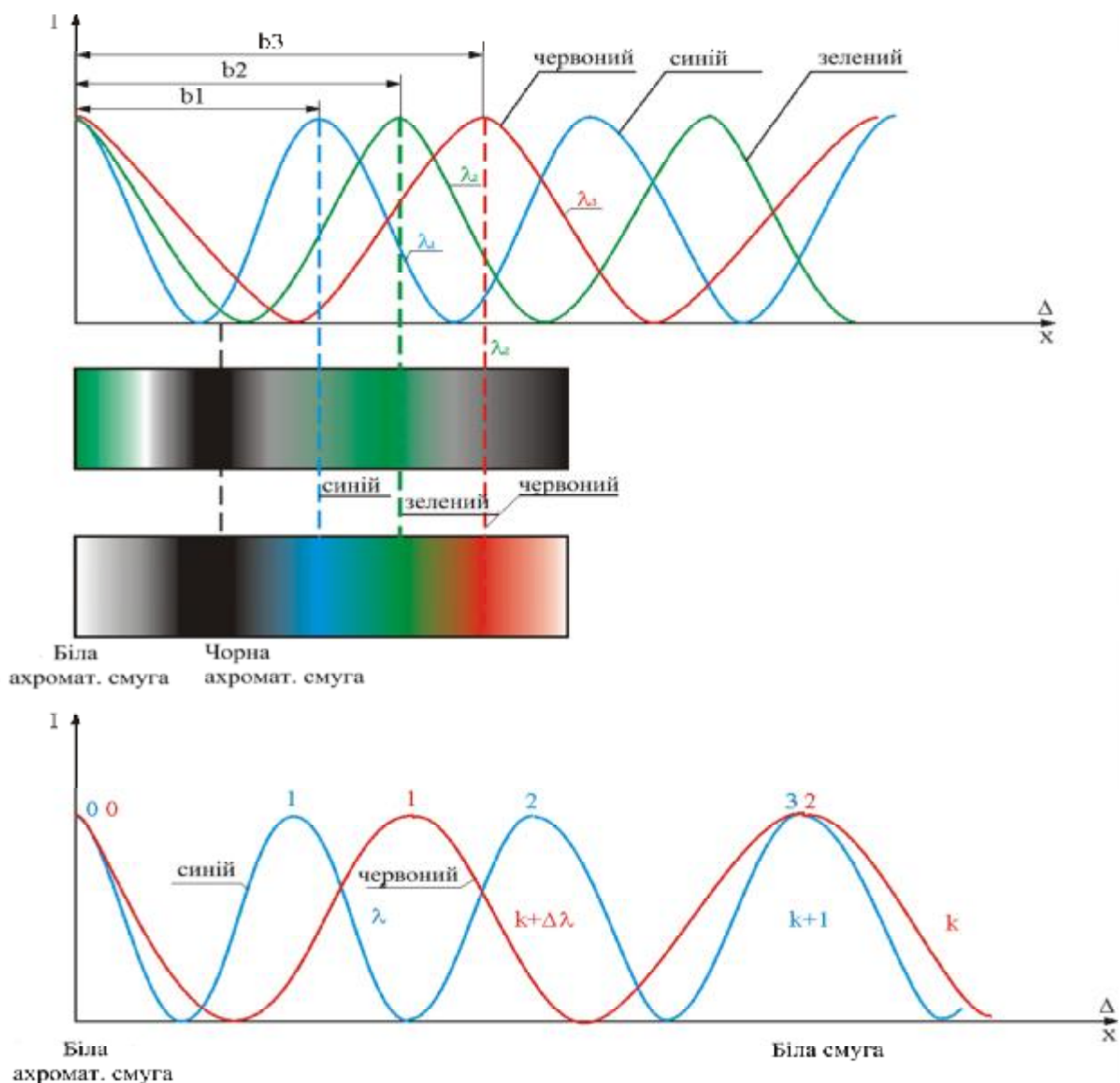


Рис. 3.12 Контраст інтерференційної картини і монохроматичність випромінювача

У простих випадках монохроматичний потік створюють світлофільтрами абсорбції. Кращі результати виходять при використанні інтерференційних світлофільтрів і їх комбінації з джерелами світла з лінійчатим спектром або лазерів.

Фонове засвічення

$$I_{\max} = I_1 + I_2 \pm 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$I_{\min}$$

$$I_1 = I_2 = I \quad I_{\max} = 4I \quad I_{\min} = 0$$

$$I_{\phi} = \rho I$$

У загальному випадку фонове засвічення і корисні пучки некогерентні, тому результуючу освітленість можна знайти простим складанням інтенсивностей[27]

$$I_{c\max} = I_{\max} + I_{\phi} = 4I + \rho I$$

$$I_{c\min} = I_{\min} + I_{\phi} = 0 + \rho I$$

$$k = \frac{4I}{4I + 2\rho I} = \frac{2}{2 + \rho}$$

ρ	k
0	1
2	0,5
4	0,33

Фонові засвічення, сумірні з корисним сигналом, призводять до значного зниження контрасту.

Нерівність інтенсивностей пучків, що інтерферують.

$$I_{\max} = I_1 + I_2 \pm 2\sqrt{I_1 I_2}$$

min

$$I_1 = I \quad I_2 = \rho I$$

$$I_{\max} = I + \rho I + 2\sqrt{I^2 \rho} = I(1 + \rho) + 2I\sqrt{\rho}$$

$$I_{\min} = I + \rho I - 2\sqrt{I^2 \rho} = I(1 + \rho) - 2I\sqrt{\rho}$$

$$k = \frac{4I\sqrt{\rho}}{2I(1 + \rho)} = \frac{2\sqrt{\rho}}{1 + \rho}$$

ρ	k
1	1
2	0,93
4	0,8

У багатьох випадках можна допустити істотну різницю в інтенсивності пучків без великої втрати для контрасту[27]. Немає жодної необхідності отримання рівності $I_1 = I_2$ додатково ускладнюючи вирівнюючими пристроями і без того складні інтерферометри.

Методи реєстрації інтерференційної картини. Інформаційні параметри інтерференційної картини [27]. У загальному випадку параметри інтерференційної картини – форма, контраст, інтенсивність, колір, ширина і напрям смуг і так далі визначаються безліччю чинників, які залежать як від схеми і конструкції інтерферометра, так і від характеристик досліджуваного об'єкту.

У вимірювальних інтерферометрах частина цих чинників або виключається з вимірювальної схеми, або ослабляється їх вплив на результат виміру – застосовується монохроматичне випромінювання з відомою довжиною хвилі, робочим поверхням інтерферометра додається строго певна форма і тому подібне. Це дозволяє використовувати при вимірах лише частину параметрів інтерференційної картини, однозначно пов'язаних з параметрами досліджуваного об'єкту.

У ідеалі один вимірюваний параметр інтерференційної картини (наприклад зсув смуги) повинен відповідати одному змінному параметру досліджуваного об'єкту.

При інтерференційних вимірюваннях найчастіше вирішуються наступні задачі

1. Якісна характеристика досліджуваної поверхні по розташуванню і формі інтерференційних смуг (кілець).
2. Якісна і кількісна характеристика досліджуваної поверхні по кількості і формі інтерференційних смуг (кілець).
3. Кількісна характеристика досліджуваної поверхні або середовища по відхиленню (зсуву) інтерференційної смуги або по зміні її форми.

Чутливість вимірювання різниці ходу [27]. Інтерференційні методи визначення різних величин базуються на вимірі різниці ходу реєструють як зміни інтенсивності світла (рис. 3.13).

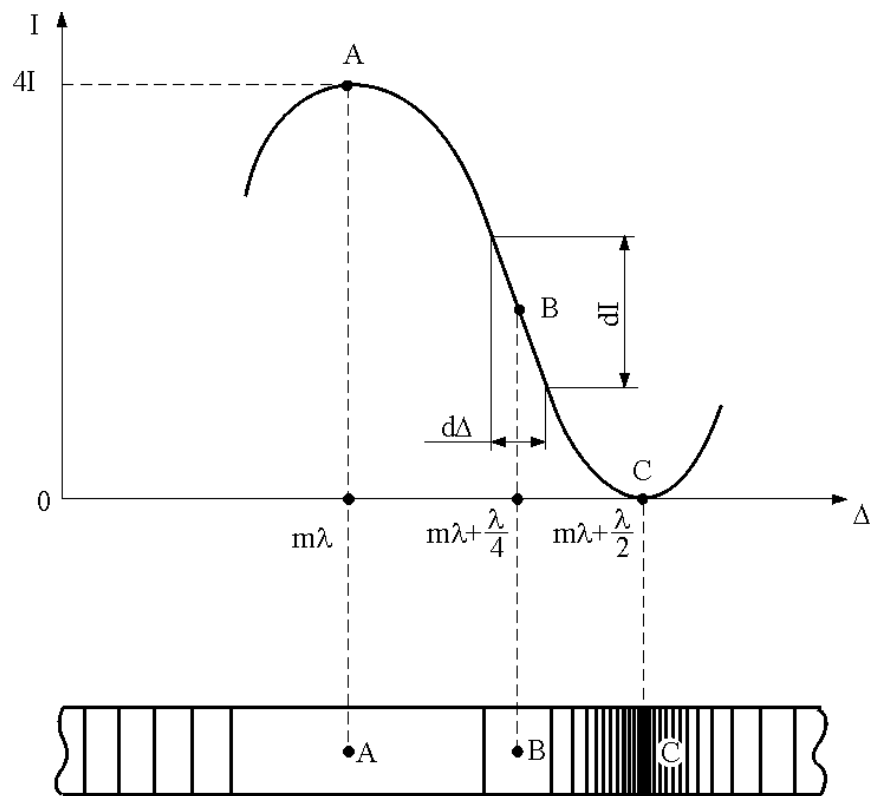


Рис. 3.13 Чутливість виміру різниці ходу

Для двопроменевої інтерференції Інтерференційні методи визначення різних величин базуються на вимірі різниці ходу або її похідних. Зміни різниці ходу реєструються як зміни інтенсивності світла (Рис. 3.13).

Для двопроменевої інтерференції

$$I_p = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta\varphi$$

Якщо $I_1 = I_2 = I$ і враховуючи, що $\delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}$

$$I_p = 4I \cos^2 \pi \frac{\Delta}{\lambda},$$

$$\frac{dI_p}{d\Delta} = 4I \frac{\pi}{\lambda} \sin \frac{2\pi}{\lambda} \Delta.$$

Максимум чутливості відповідає точкам інтерференційного поля з різницею ходу $m\lambda \pm \frac{\lambda}{4}$. Ці точки умовно називають серединами.

Визуальні методи реєстрації [27]. Метод вимірювання зміщення смужок полягає у вимірюванні лінійного зміщення інтерференційних смуг відносно нерухомої візирної лінії чи нерухомої системи смуг, ідентичною рухливій системі (рис. 3.14а).

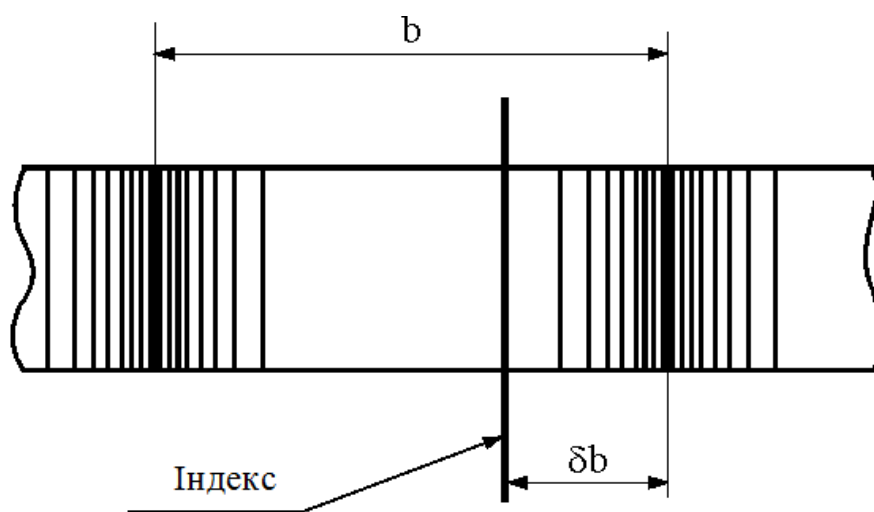


Рис. 3. 14а Методи реєстрації зсуву інтерференційних смуг

Зорове виділення максимуму чи мінімуму світла чи мінімуму світла в смугі базується на контрастній чутливості ока, тобто здатності ока порівнювати яскравості двох об'єктів, які близько розташовані один від одного.

Прийнято вважати, що похибка, яка визначає зміщення смуг складає 0,1 ширини смуги, а відповідна похибка, яка відповідає похибці різниці ходу – $0,1\lambda$, в випадку, якщо видима ширина смуги складає 1-2мм.

В методі вимірювання зміщення смуг немає прямого вимірювання інтенсивності світла, тому похибку $0,1\lambda$ розрахувати не можна.

Цевеличина знайдена в результаті практики інтерференційних вимірювань та прийнята в якості критерію при порівнянні різних методів.

Метод рівномірного поля полягає в реєстрації яскравості рівномірноосвітленого поля, яке отримується при налаштуванні інтерферометра на нескінченно широку смугу. За зміною яскравості судять про зміну різності ходу.

Для підвищення чутливості використовується напівтіньовий пристрій, принцип діякого полягає у створенні двох сусідніх інтерференційних полів, які відрізняються по різності ходу на малу величину 2Δ і наступному урівноваженні яскравості цих полів порівняння. (рис. 3.14б).

В двопроменевих інтерферометрах яскравості полів порівняння розташовуються симетрично відносно точки с. Мала зміна різниці ходу $\delta\Delta$. Чутливість методу складає $(0,02 - 0,05)\lambda$.

Метод чутливості кольору[27] полягає в реєстрації поля при використанні джерела білого кольору.

Із колориметрії відомо, що накладення червоного і фіолетового кольорів дає результуючий пурпурний колір. Він називається чутливим, оскільки при незначній зміні різниці ходу, тональність поля швидко змінюється в бік червоного чи фіолетового кольору. Експериментально встановлено, що методом чутливості кольору виявляється зміна різниці ходу $(0,01 - 0,03)\lambda$.

Фотоелектричні методи. Метод прямого відліку полягає в реєстрації інтенсивності потоку від деякої ділянки інтерференційного поля за допомогою об'єктивного фотометра прямого відліку [27]. Обов'язковим елементом такого фотометра є діафрагма, яка виділяє достатньо малу ділянку поля (рис. 3.15).

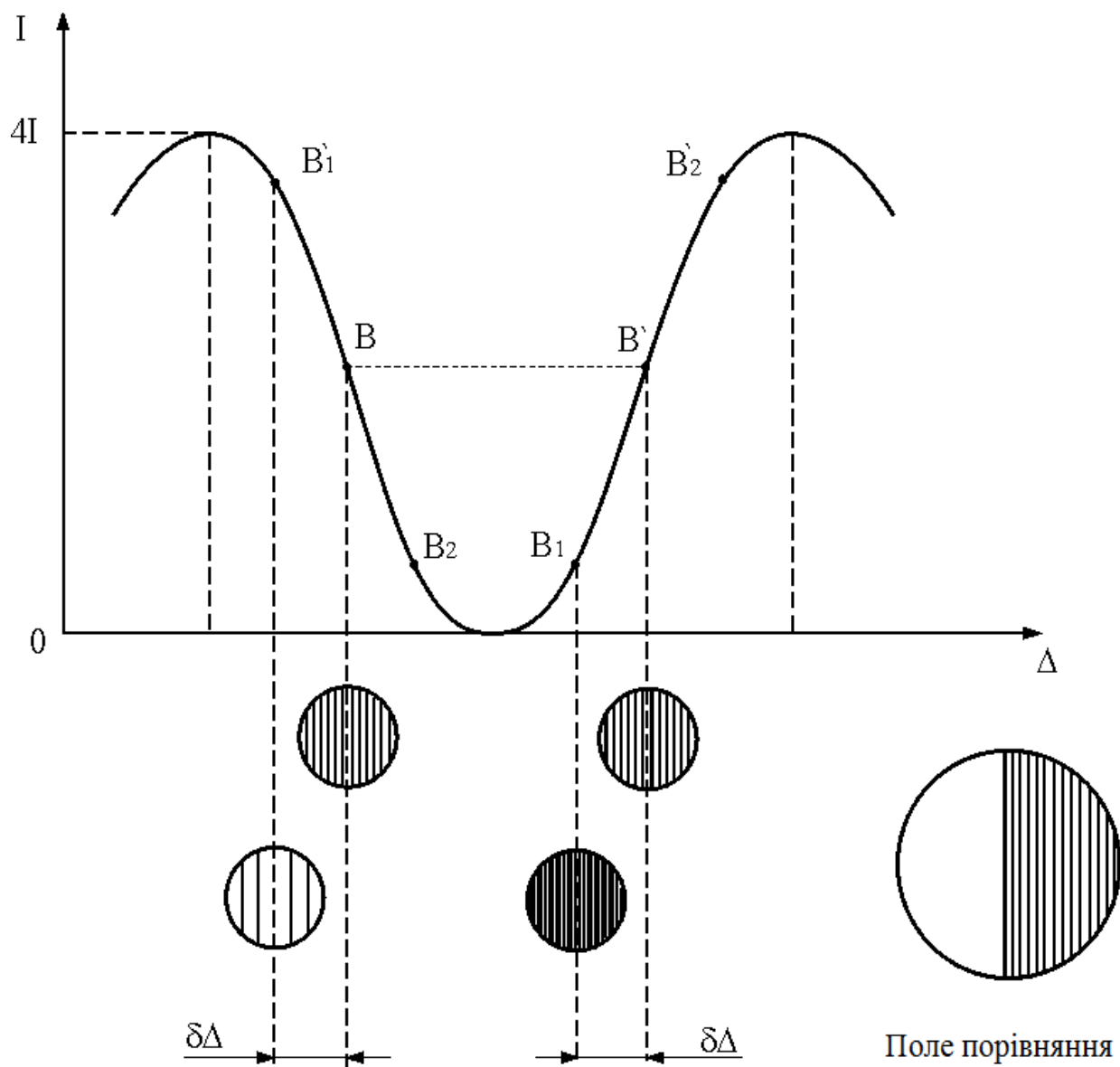


Рис. 3. 146 Методи реєстрації зсуву інтерференційних смуг

Похибка вимірювання світлового потоку в зоні максимальної чутливості не перевищує 1 – 2%, що відповідає похибці вимірювання різниці ходу $(0,02-0,04)\lambda$. Цього достатньо для вирішення більшості інтерференційних завдань, однак слід враховувати, що така точність досягає при жорсткій стабілізації джерела випромінювання, втрат в оптико-електронному тракті та чутливості фотоприймача.

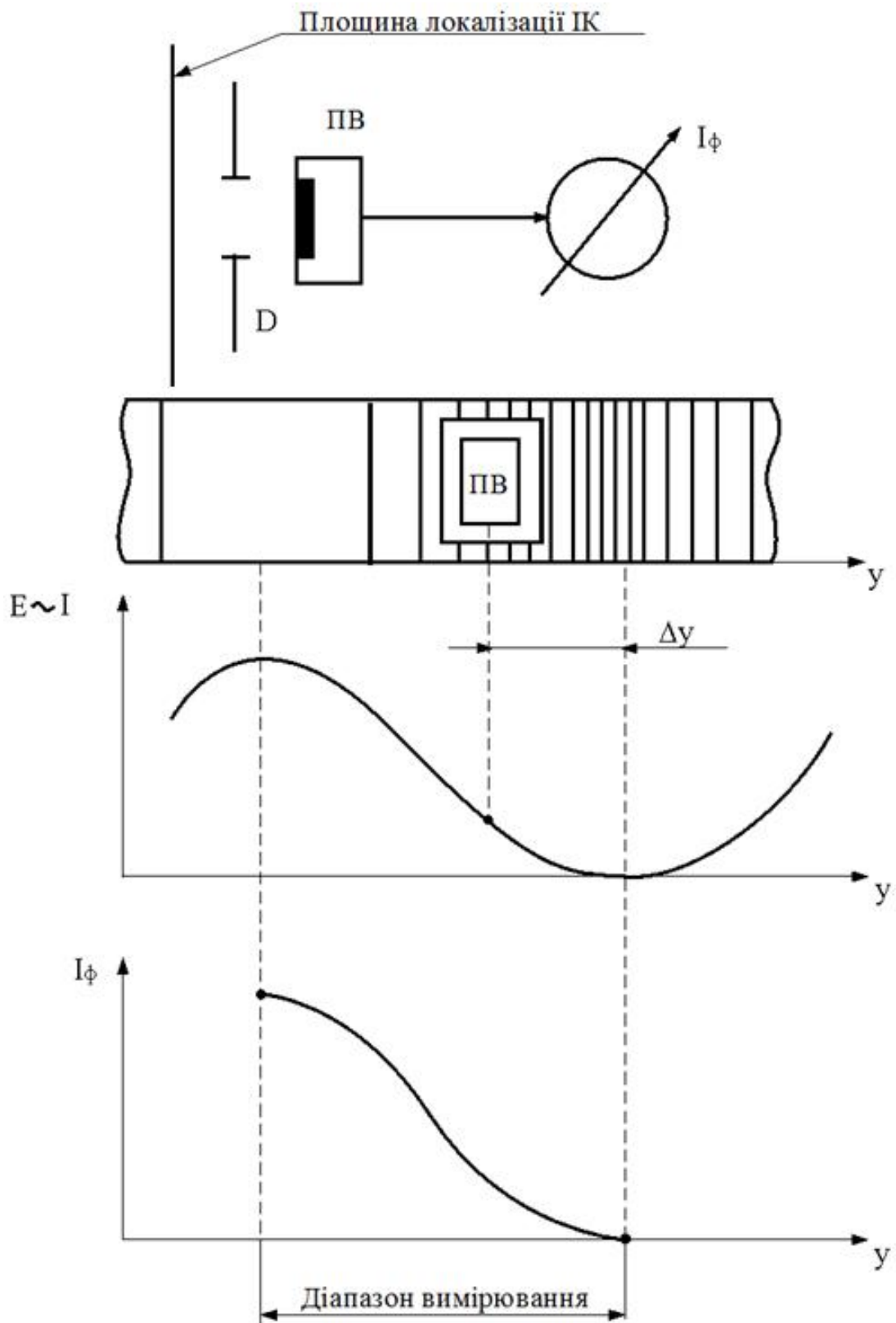


Рис. 3.15 Фотоелектричний метод прямого відліку

Метод диференціальної фотометрії полягає в застосуванні двох приймачів випромінювання, які реєструють світлові потоки від двох

ділянок поля, що зсунуті на деяку фіксовану величину. При диференційному включенні приймачів вимірюється різниця вхідних сигналів і тим самим усувається нестабільність випромінювача і деяких зовнішніх впливів. Основну похибку вносять неідентичність характеристик фотоприймачів та дрейф нуля електронного блоку. Чутливість методу в два рази вища ніж в методі прямого відрізу – $(0,01 - 0,02)\lambda$ (рис. 3.16).

3.1.3 Методи інтерференційних вимірювань

Вимірювання довжин, лінійних та кутових переміщень. Контактний інтерферометр Уверського [27] призначений для відносних вимірювань довжин кінцевих мір 3-го – 4-го розрядів та зовнішніх розмірів різних виробів

Похибка вимірювання світлового потоку в зоні максимальної методом порівняння їх з кінцевою мірою. Інтерферометр можна також застосовувати для вимірювання малих переміщень.

Інтерферометр побудований по принциповій схемі інтерферометра Майкельсона. Світлоділильна пластина не має спеціального напівпрозорого покриття, тому обидві її поверхні можуть служити світлоділками. Для використання лише нижньої поверхні, вона обмежується щільною шириною не більше товщини пластини, а верхня поверхня розмежовується світлопоглинальною ширмою.

Компенсуюча пластина встановлена під малим кутом до світлоділильної пластини, щоб введенням допоміжної різниці ходу в складомогтися чорної ахроматичної смуги і симетричного розташування кольорових смуг (рис. 3.17).

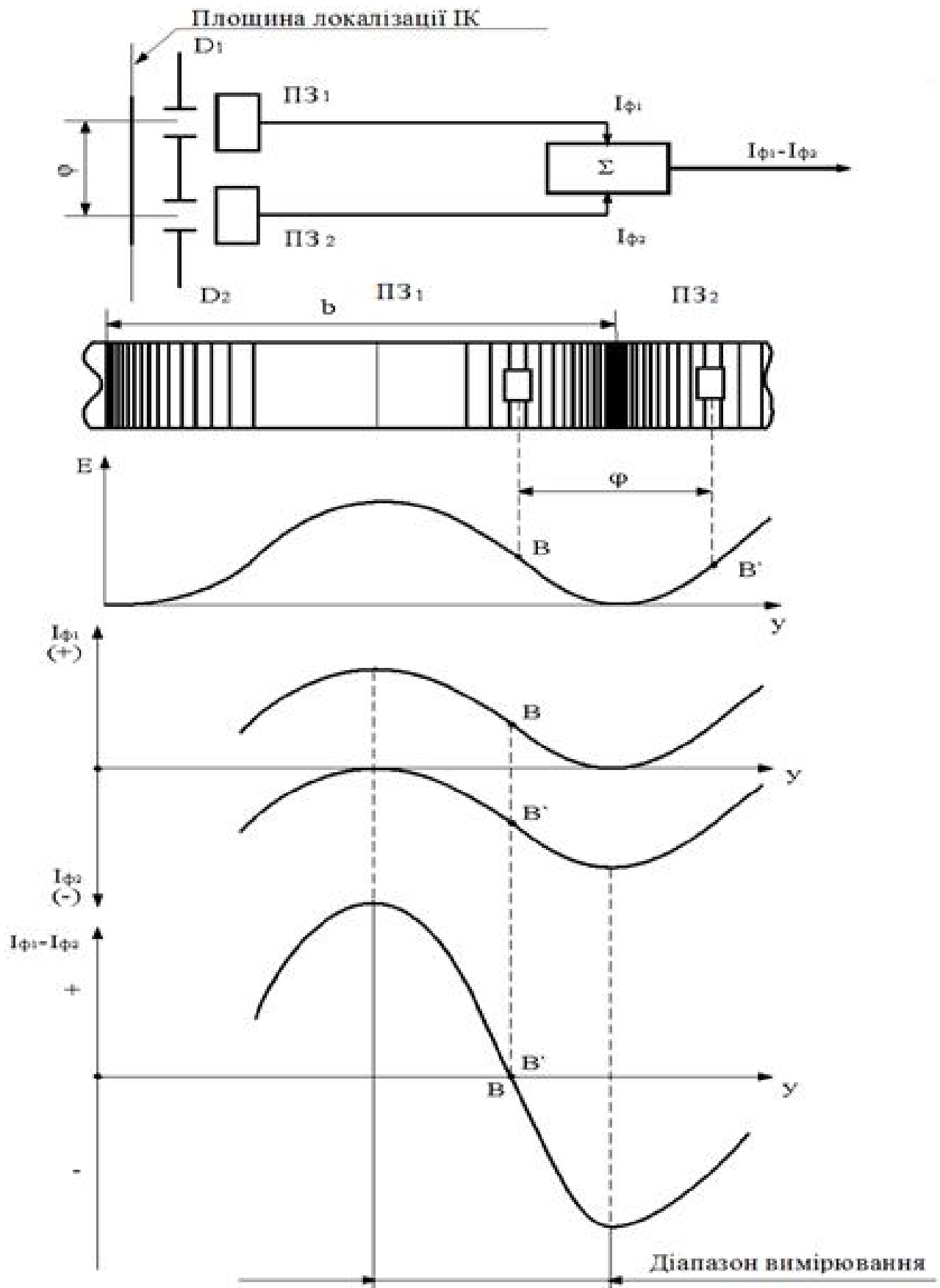


Рис. 3.16 Метод диференційної фотометрії

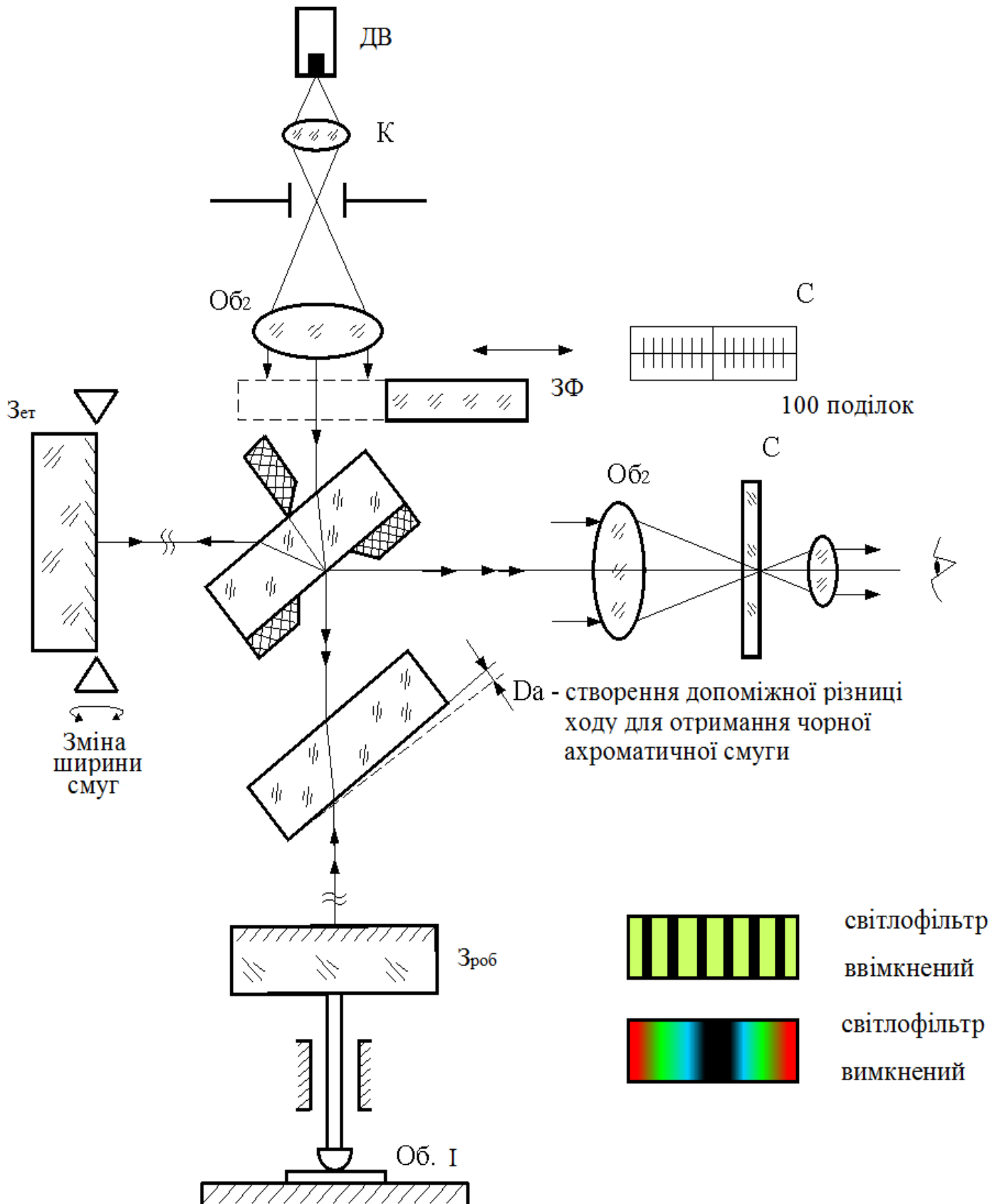


Рис. 3. 17 Інтерферометр Уверського

Смуги рівної товщини локалізуються в площині сітки, яка оптично сполучена з дзеркалами та спостерігаються в окуляр. Еталонне дзеркало можна нахилити відносно вертикальної та горизонтальної осей і тим самим змінювати ширину та нахил смуг. Робоче дзеркало розташоване на вимірювальному стержні та переміщуються разом з ним по оптичній осі. При цьому в полі зору зміщується картина смуг. Ахроматична смуга виконує роль індексу, по якому введеться відлік відносно нерухомої шкали. Шкала має 100 поділок. Ціна поділок шкали змінна і залежить від ширини та залежить від ширини інтерференційних смуг. Ціна інтерференційних смуг не залежить від їх ширини та дорівнює $0,5\lambda$. Зазвичай налаштовують інтерферометр на ціну поділки шкали, що дорівнює 0,05; 0,1; 0,2 мкм.

Мінімальна гранична похибка контактних інтерферометрів 0,03 мкм.

Вимірювання та контроль форми поверхонь. Інтерферометри для контролю площини [27] побудовані по принциповій схемі інтерферометра Фізо. Інтерферуючі промені відбиваються від нижньої еталонної площини з легка клиноподібної пластини та від верхньої контролюючої площини пластини.

Клиновидність еталонної пластини необхідна для того, щоб пучок променів відбитий від її верхньої поверхні, не попадав в систему спостереження і не зменшував контрасту смуг.

Такий шлях виключення дії потрібної поверхні контрольованої пластини на придатний. Рекомендується змащувати її вазеліном з сажою і тим самим зменшуючи відбиття світла.

Інтерферометри для контролю сфер [9, 11-14, 23, 27] будують також по схемі Фізо. Однак повітряна пластина, в якій локалізовані полоси рівної товщини, обмежена тут двома сферами, тому освітлювати її потрібно пучками променів, що або сходяться, або розходяться по нормалі до поверхонь. (рис. 3.18).

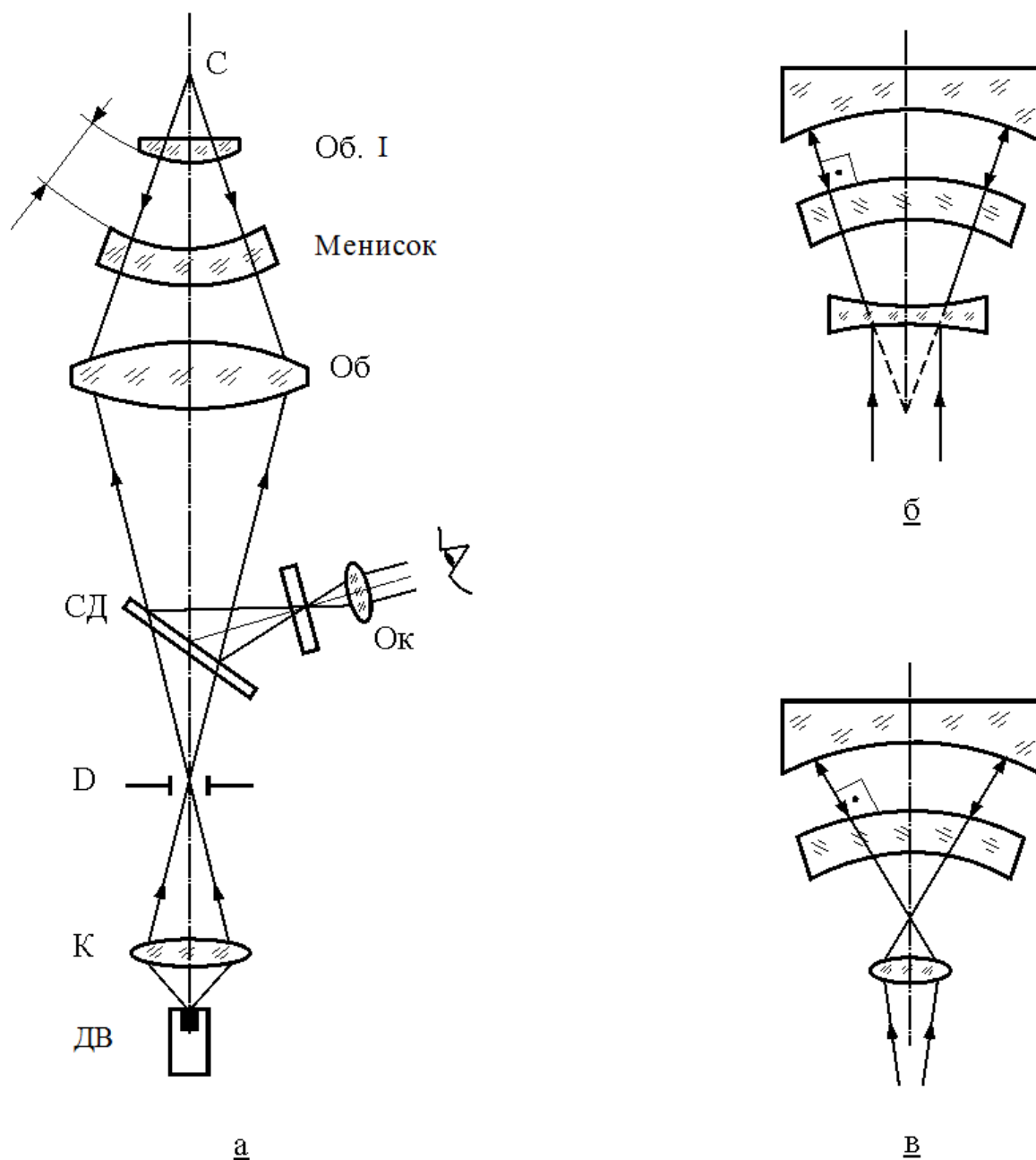


Рис. 3. 18 Інтерферометр для контролю сфер

Це відбувається в тому випадку, якщо центри кривизни контрольованої і еталонної поверхонь співпадають. Товщина повітряного зазору постійна і в ньому локалізується нескінченно широка смуга.

Еталонна пластина має форму мениска для того, щоб пучок променів відбитий від її неробочої області, не потрапляв в систему спостереження.

Для спостереження місцевих відхилень форми рекомендується переміщенням контрольованої поверхні пере налаштувати інтерферометр на спостереження смуг, які близькі до прямих і по їх викривленню оцінювати відхилення форми. В цьому випадку похибка не буде перевищувати 0,1 смуги.

Для контролю ввігнутих сфер застосовують об'єктив з від'ємною фокусною відстанню, який дає гомоцентричний пучок, що розходиться і метисок з еталонною випуклою сферою (Рис. 3.18б).

При контролі ввігнутих сфер малих радіусів кривизни об'єктив з від'ємною фокусною відстанню замінюють мікроб'єктивом з додатньою фокусною відстанню та великою апертурою.

Інтерферометри для контролю асферичних поверхонь побудовані по схемі інтерферометра Майкельсона, в одну з гілок якого включена автоколемаційна система з контрольованою асферичною поверхнею [23, 27].

В склад автоколемаційної схеми входить також допоміжне плоске або сферичне дзеркало, центр кривизни якого суміщується з одним із геометричних фокусів контрольованої поверхні. З другим фокусом поверхні суміщується точкове джерело світла чи його зображення.

Криві поверхні другого порядку мають пару анабераційних точок, які є геометричними фокусами цих кривих (рис. 3.19).

Для сфери обидві анабераційні точки співпадають з її центром кривизни.

Для еліпсоїда, утвореного обертанням еліпса навколо його великої осі, анабераційні точки розташовані по одну сторону від поверхні і на кінцевій відстані одна від одної.

Для гіперболоїда, утвореного обертанням гіперболи навколо осі, яка проходить через її вершину, анабераційні точки розташовані по різні сторони від поверхні і на кінцевій відстані одна від одної.

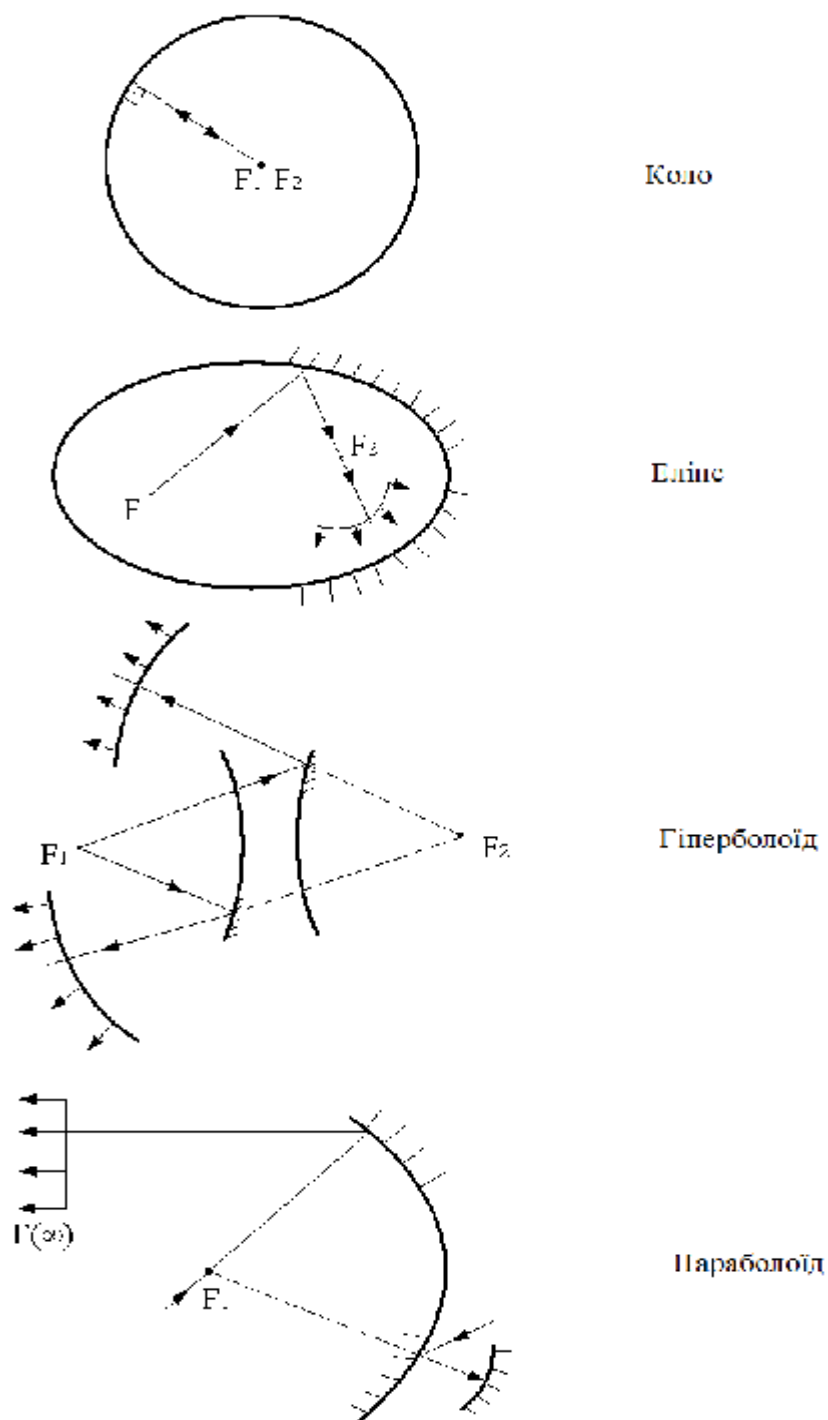


Рис. 3. 19 Анабераційні точки поверхонь другого порядку

Для параболоїда, утвореного обертанням параболи навколо осі, одна анабераційна точка знаходиться в оптичному фокусі, а інша – на нескінченності.

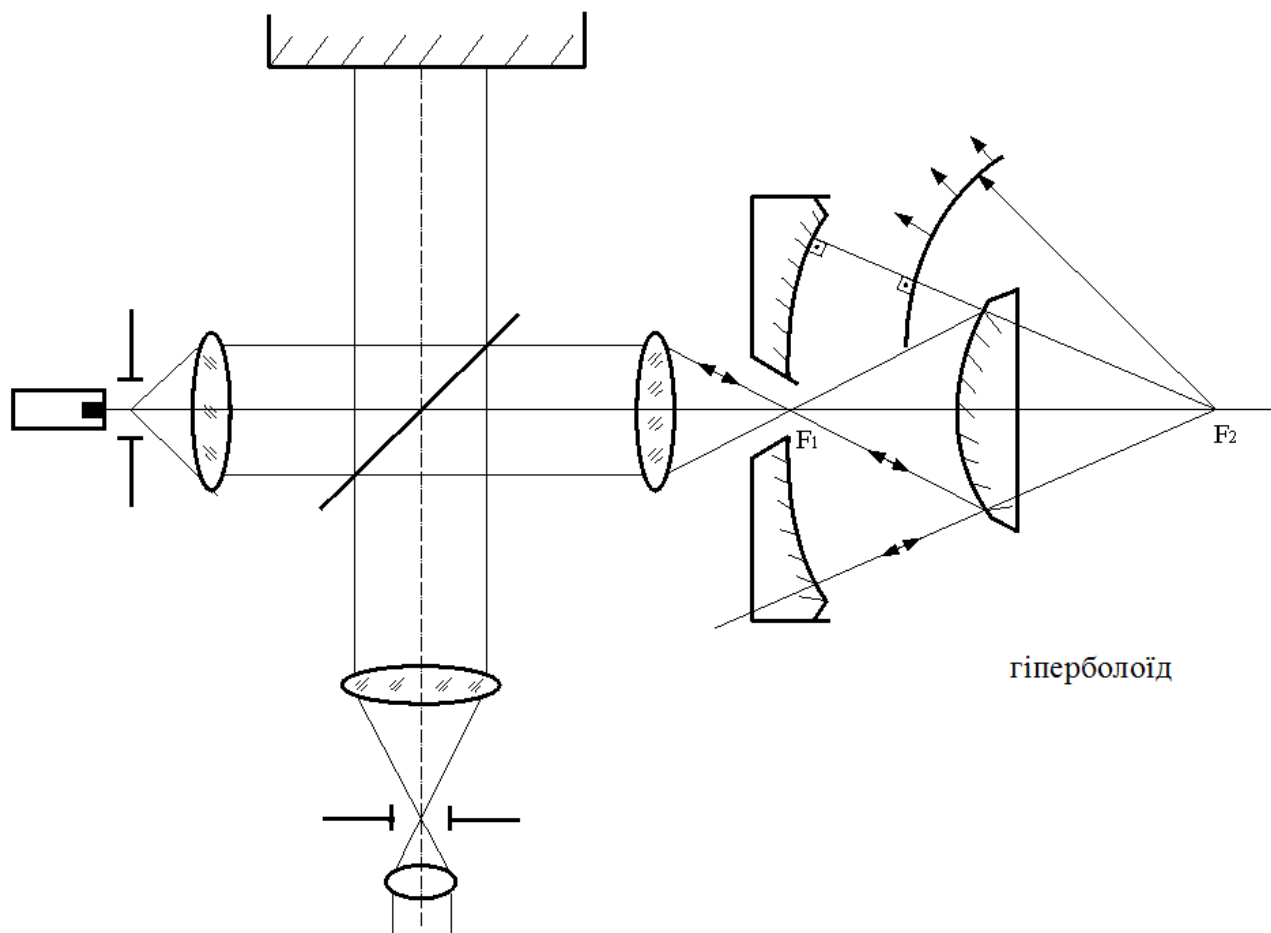
Анабераційні точки являються оптично спряженими лише для поверхонь, які відбиваються.

Якщо поверхня обертання другого порядку має ідеальну форму, а точкове джерело світла розташоване точно в одному із геометричних фокусів, то відбиті від поверхні промені утворюють сферичний хвильовий фронт, центр кривизнякого співпадає з другим геометричним фокусом. Контроль поверхні зводиться до дослідження хвильового фронту (визначенню його відхилення від сферичної форми) після повернення пучка променів із автоколемаційної системи в робочу частину інтерферометра. Об'єктив робочої частини перетворює сферичний фронт в плоский. Плоска хвиля із робочої частини інтерферує з плоскою еталонною хвилею і утворюється картина смуг рівної товщини. З виду цих смуг судять про якість сферичної поверхні (рис. 3.20) [11, 12, 27].

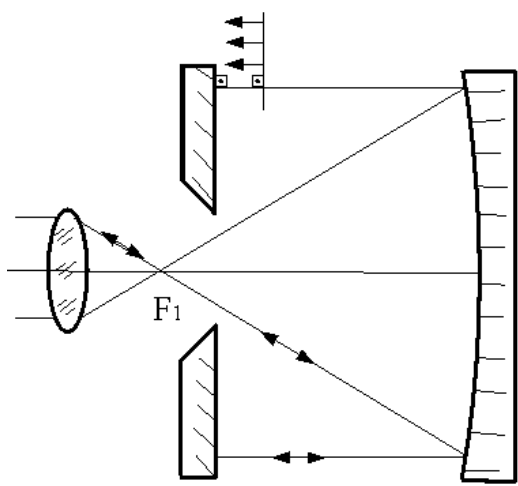
Однак деформація хвильового фронту може виникнути як в результаті похибок виготовлення самої поверхні, так і в результаті розфокувань, причому при аналізі інтерференційної картини відрізнити ці похибки дуже важко.

Інтерферометри для вимірювання висоти мікронерівностей. Інтерферометри, призначені для вимірювання висоти мікронерівностей або слідів обробки на поверхнях малої шорсткості, називаються мікроінтерферометрами [27].

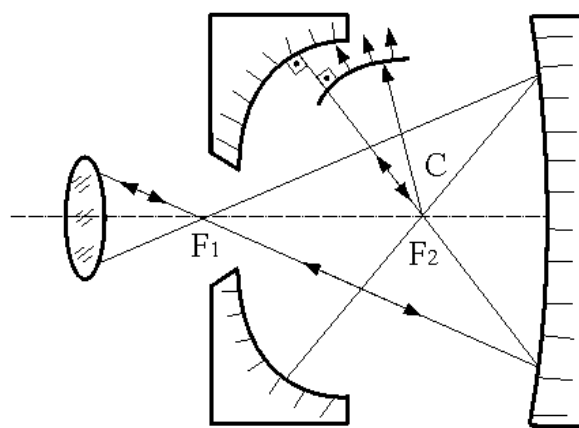
Вимірювання висоти мікронерівностей здійснюється по викривленню смуг рівної товщини, але інтерферометр повинен володіти при цьому великим збільшенням і високою роздільною здатністю, тому мікроінтерферометр представляє собою поєднання інтерферометра типу Майкельсона (рідше Фізо) і мікроскопа.



Інтерферометр
Майкельсона



параболоїд



еліпсоїд

Рис. 3.20 Контроль асферичних поверхонь

Мікроінтерферометр Лінника [23, 25] побудований по схемі Майкельсона містить в кожній гілці мікрооб'єктиви, які дають дійсні зображення польової діафрагми відповідно на поверхні, що перевіряється, і на плоскому еталонному дзеркалі.

У зворотному ході променів, в площині сітки окулярного мікрометра будується зображення поверхні, що перевіряється, і локалізованих на ній смуг рівної товщини. Тут також спостерігається і зображення еталонного дзеркала, але воно звичайно настільки якісне, що не заважає спостереженню основної картини (рис. 3.21).

Форма інтерференційних смуг відтворює у великому масштабі профіль контрольованої ділянки поверхні. Ширину і напрям смуг можна змінювати, зміщуючи об'єктив еталонного каналу перпендикулярно оптичній осі і повертаючи його в зміщеному положенні навколо нерухомої оптичної осі. В результаті інтерференційні смуги встановлюють перпендикулярно слідам обробки.

Викривлення смуг вимірюють окуляр-мікрометром:

$$\delta h = 0,5\lambda \frac{\delta b}{b} \quad (1.8)$$

де λ – середня довжина хвилі ділянки спектру, що використовується; δb – викривлені смуги; b – ширина смуги.

Схема Захар`євського-Міро [25] містить один об'єктив, який нагвинчується на тубус металографічного мікроскопа. На фронтальній лінзі об'єктиву нанесена дзеркальна пляма. Інтерференційні смуги рівної товщини спостерігаються в клині, утвореному поверхнею, що перевіряється, і зображенням плями, що отримується в напівпрозорій площині світлоділильної пластини. Мікроінтерферометр працює при малих збільшеннях (рис. 3.22).

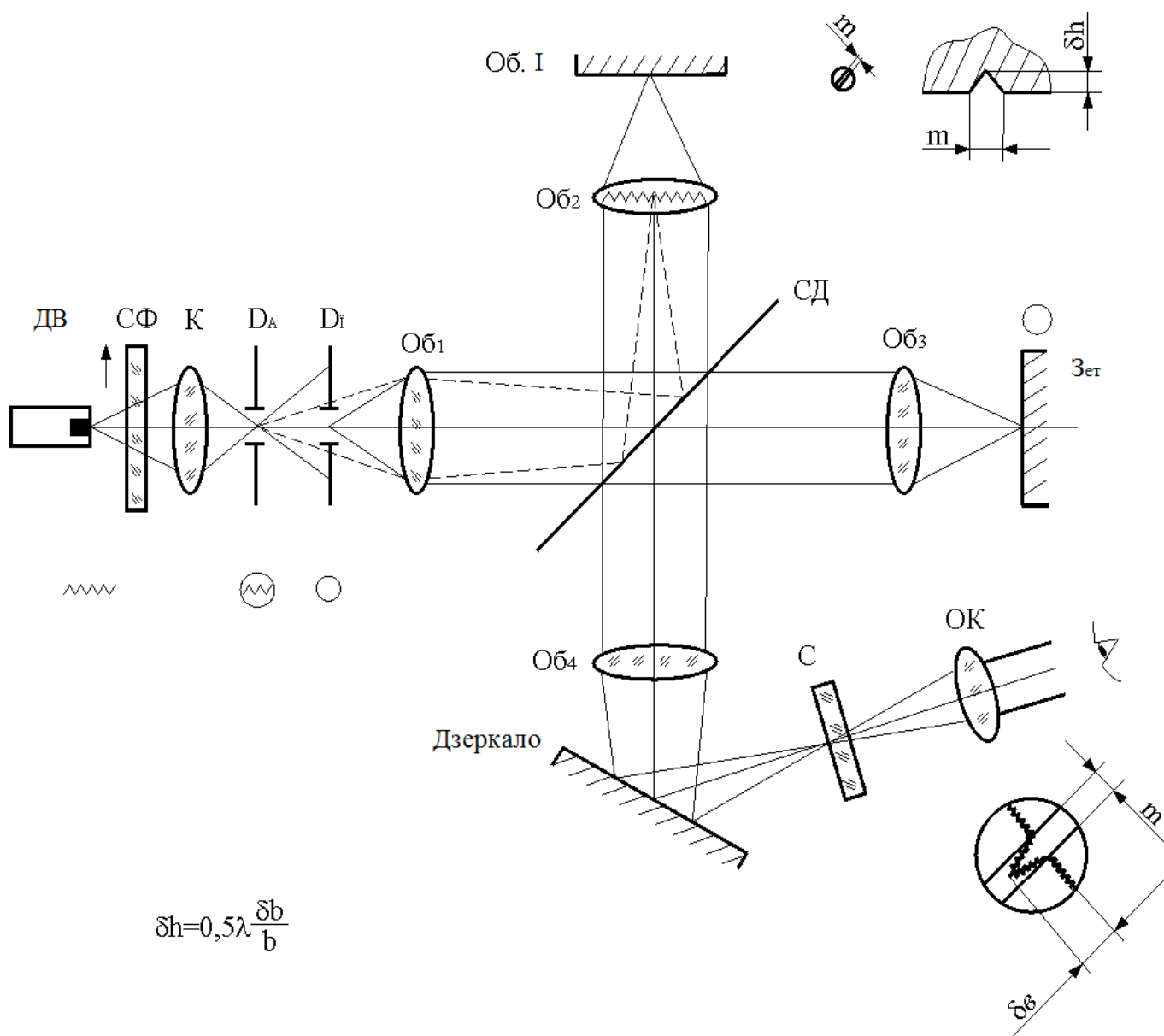


Рис. 3.21 Мікроінтерферометр Лінника

Вимірювання параметрів оптичних покриттів. Інтерферометрія в білому світлі [17]. Один з найбільш простих інтерференційних способів оцінки товщини прозорих шарів, полягає у використанні інтерференції білого світла при послідовному проходженні світловим пучком досліджуваного шару і стандартного тонкостінного зразка відомої товщини.

При віддзеркаленні пучка білого світла від зразкового шару виконується умова утворення інтерференційних максимумів для дискретних довжин хвиль ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_p$).

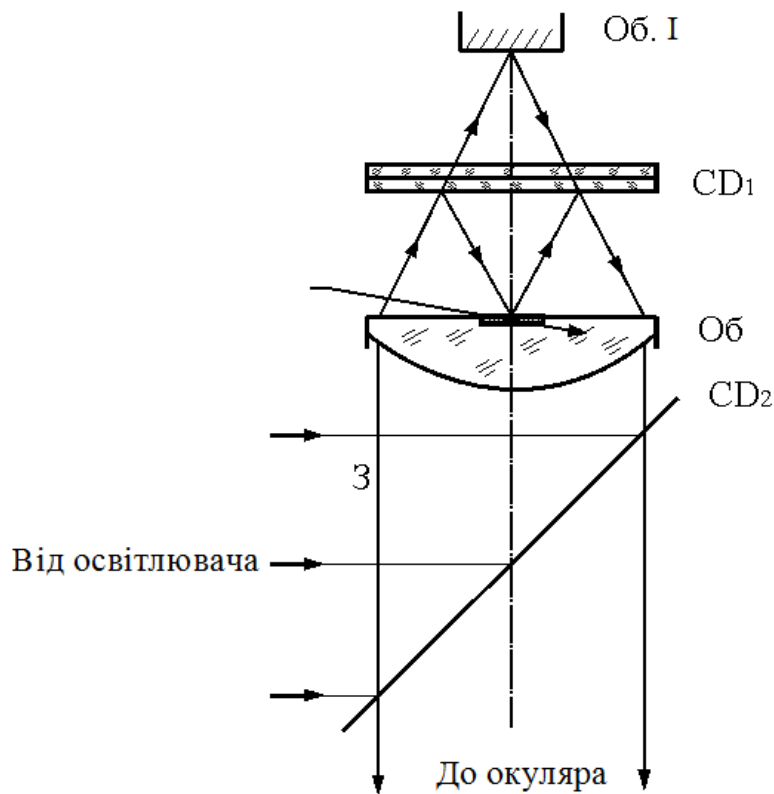
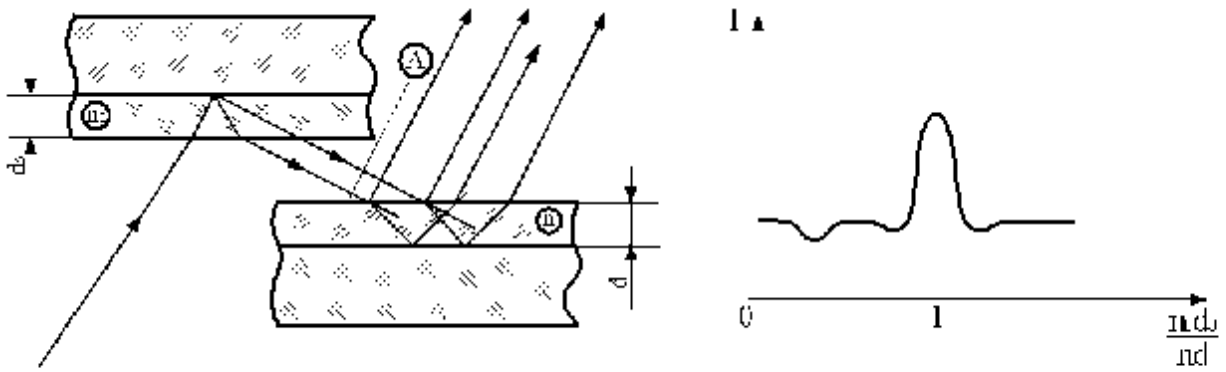


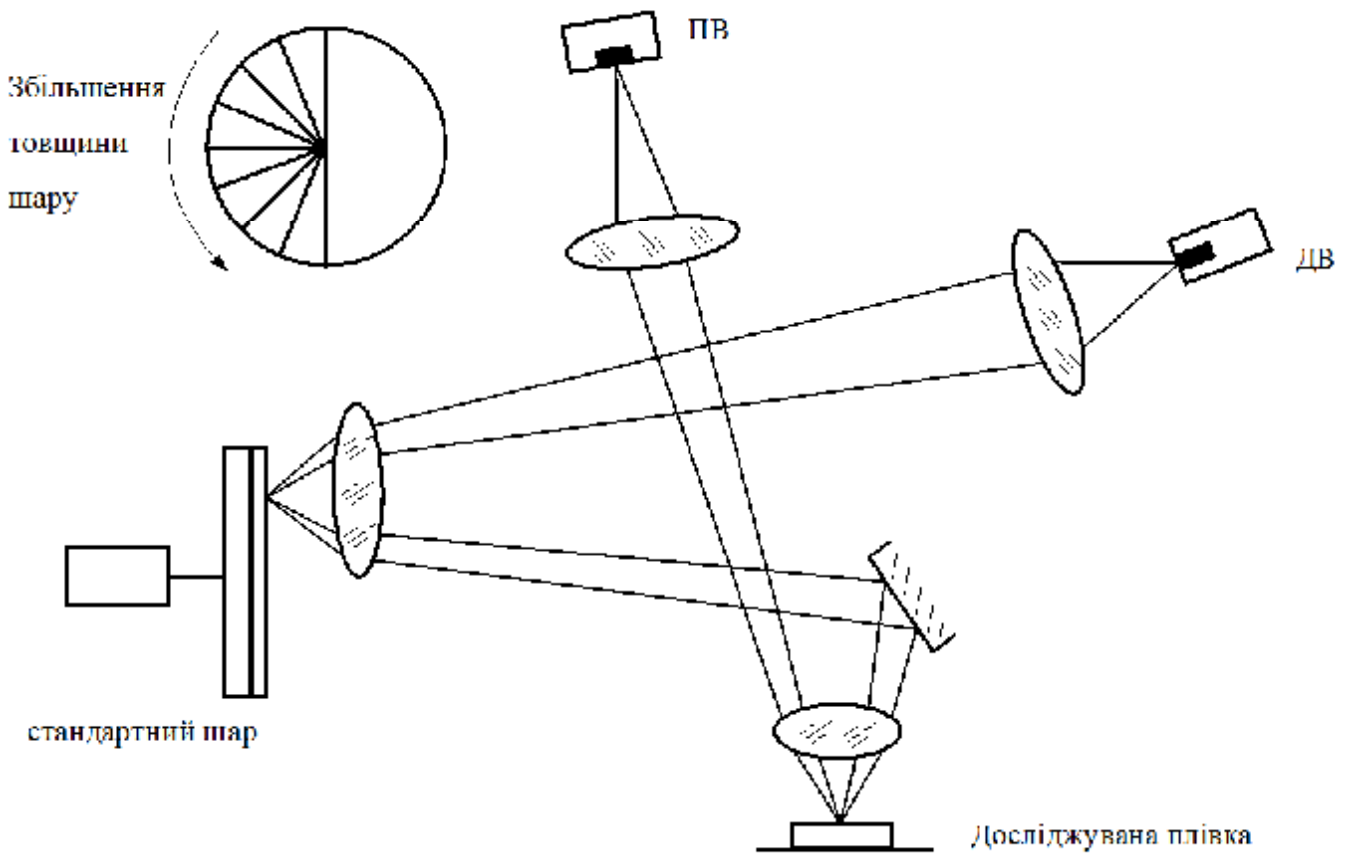
Рис. 3.22 Мікроінтерферометр Захар'євського-Міро

Якщо оптична товщина досліджуваного (nd) і зразкового (n_0d_0) шарів співпадають, то інтенсивність світлового пучка після проходження обох шарів є максимальною. Як стандартний зразок застосований кремнієвий диск з секторними шарами SiO_2 , товщина яких змінюється від нуля по лінійному закону (рис. 3.23).

Пристрій забезпечує вимірювання товщини шарів з похибкою 1% в діапазоні від 500 до 10 000 нм.



а



б

Рис. 3.23 Інтерференція в білому світлі

Двопроменева інтерферометрія [17]. Товщина прозорих і непрозорих покриттів може бути виміряна на інтерферометрі типу Фізо по зсуву смуг,

що виникають в зазорі між поверхнею підкладки з покриттям і зразковою поверхнею.

Досліджуваний шар наносять на одну половину поверхні підкладки. Потім на підкладку з шаром накладають прозору оптичну деталь із зразковою поверхнею так, щоб головний перетин, який виникає між поверхнями повітряного клину був паралельним до лінії, яка розділяє чисту поверхню підкладки і поверхню досліджуваного шару (рис. 3.24).

При освітленні повітряного зазору квазімонохроматичним світлом виникають дві зміщені відносно одна одної системи інтерференційних смуг, перпендикулярні лінії розподілу. Одна система смуг утворюється при відображенні світлових променів від зразкової поверхні і чистої підкладки, а друга – від зразкової поверхні і зовнішньої поверхні шару.

Товщину шару d обчислюють по формулі:

$$d = \frac{\Delta b \lambda}{b \cdot 2},$$

де b – ширина смуг; Δb – зміщення смуг.

Якщо товщина шару перевищує $\lambda/2$, то даний спосіб може привести до грубої похибки, так як він не дозволяє виявити зміщення смуг, яке дорівнює цілому числу b . Тому в даному випадку при нанесенні шару потрібно забезпечити не сходинок, а скошений край. Тоді відповідні інтерференційні смуги не мають розриву, що дозволяє правильно виміряти їх зміщення. Похибка методу порядку 3 нм (рис. 3.24.б).

По суті такий же спосіб реалізується за допомогою інтерферометра Майкельсона, якщо одно із дзеркал частково покрите досліджуваним шаром. При використанні джерела білого світла по інтерференційній смузі нульового порядку можна правильно визначити величину зміщення

інтерференційних смуг як менших $\lambda/2$, так і тих, які перевищують цю величину (рис. 3.25).

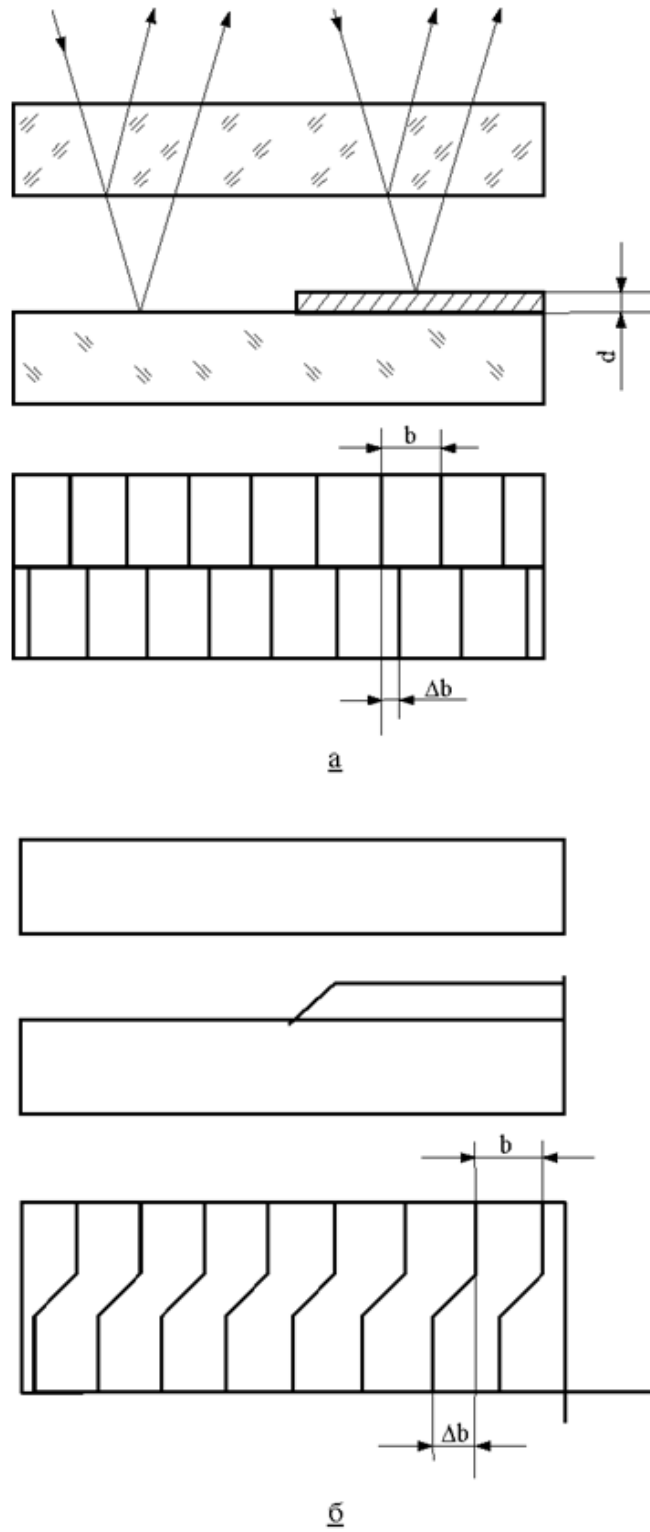


Рис. 3.24 Двопроменева інтерференція

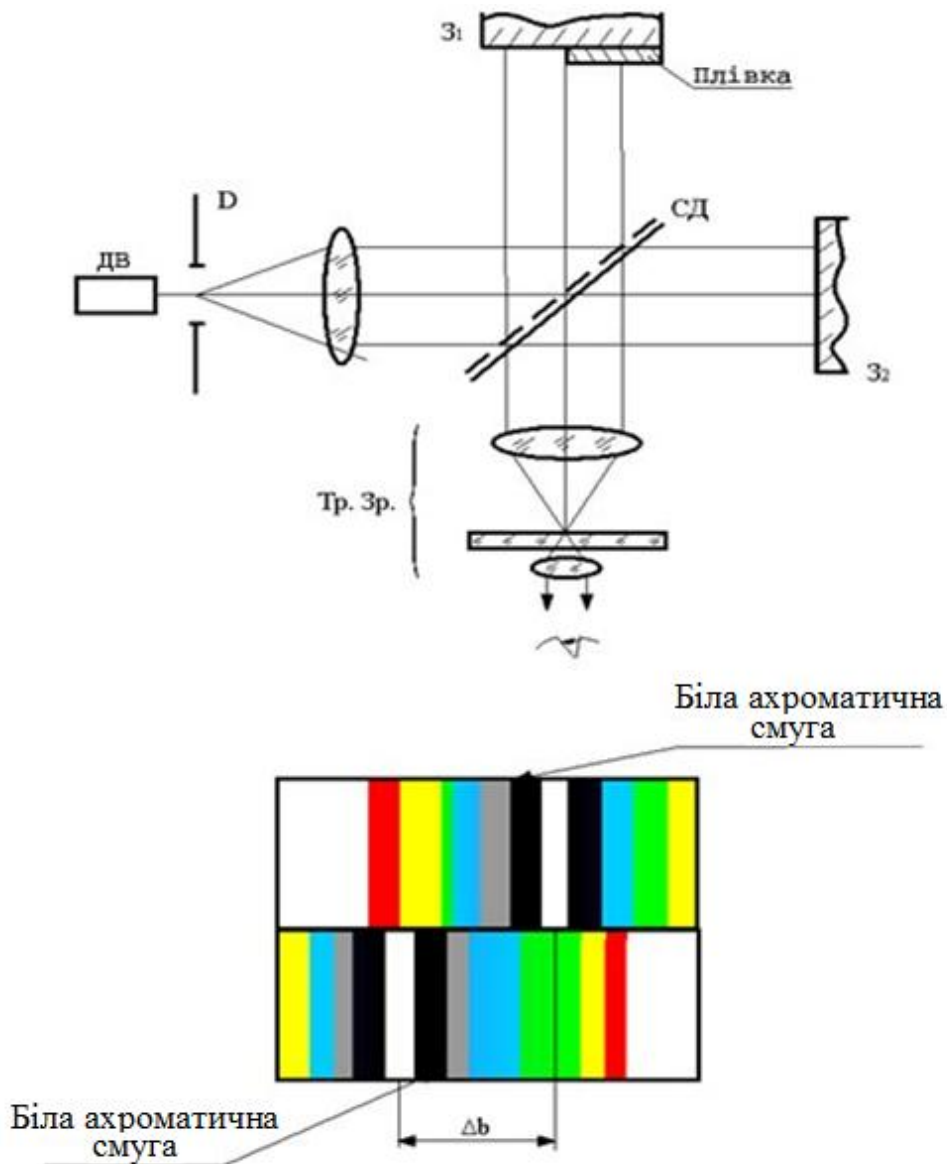


Рис. 3.25 Двопроменева інтерференція в інтерферометрі Майкельсона

Якщо шар, що нанесений на дзеркало, є прозорим, то світлова хвиля двічі проходить через нього і зміна оптичного шляху дорівнює $2d(n - 1)$. Товщину шару обчислюють за формулою:

$$d = \frac{\Delta b}{b} \frac{\lambda}{2(n - 1)}.$$

Для вимірювання товщини шарів можна також використовувати серійні мікроінтерферометри типу МІ-4.

Багатопротенева інтерферометрія [17]. Підвищення точності вимірювання товщини шарів можна забезпечити застосуванням багатопротеневих інтерференційних смуг. Для отримання таких смуг на поверхні підкладки, яка частково покрита досліджуваним шаром, а також на зразкову поверхню пробного скла наносять високо відбиваючі шари, товщина яких значно менша за товщину досліджуваного шару. Сходінка або канавка в шарі при визначенні його товщини виконуються дряпанням, травленням або маскуванням в процесі нанесення шару. В якості високо відбиваючих шарів частіше за інших використовують шари срібла товщиною не більше 100 нм (рис. 3.26).

Підвищення точності вимірювання пов'язано з тим, що багатопротеневі інтерференційні смуги в порівнянні з двопротеневими мають значно вищу різкість F , яку знаходять по формулі:

$$F = 2\pi/\epsilon,$$

де ϵ –напівширина інтерференційного екстремуму.

При високому коефіцієнті відбивання поверхонь, наприклад 0,9, різкість смуг досягає 30, а напівширина зменшується більше ніж на порядок в порівнянні з двопротеневою інтерференцією. Завдяки цьому забезпечується проста можливість координат смуг з більш високою точністю. При товщині шарів в діапазоні 2-2000 нм, товщина може бути виміряна з похибкою менше 1 нм. Реалізація вимірювань з використанням багатопротеневих інтерференційних смуг можлива на вимірювальному мікроскопі при введенні скляної пластини із зразковою високо відбиваючою поверхнею і відповідної оправи, яка забезпечує невеликі нахили пластини в будь-якому напрямленні.

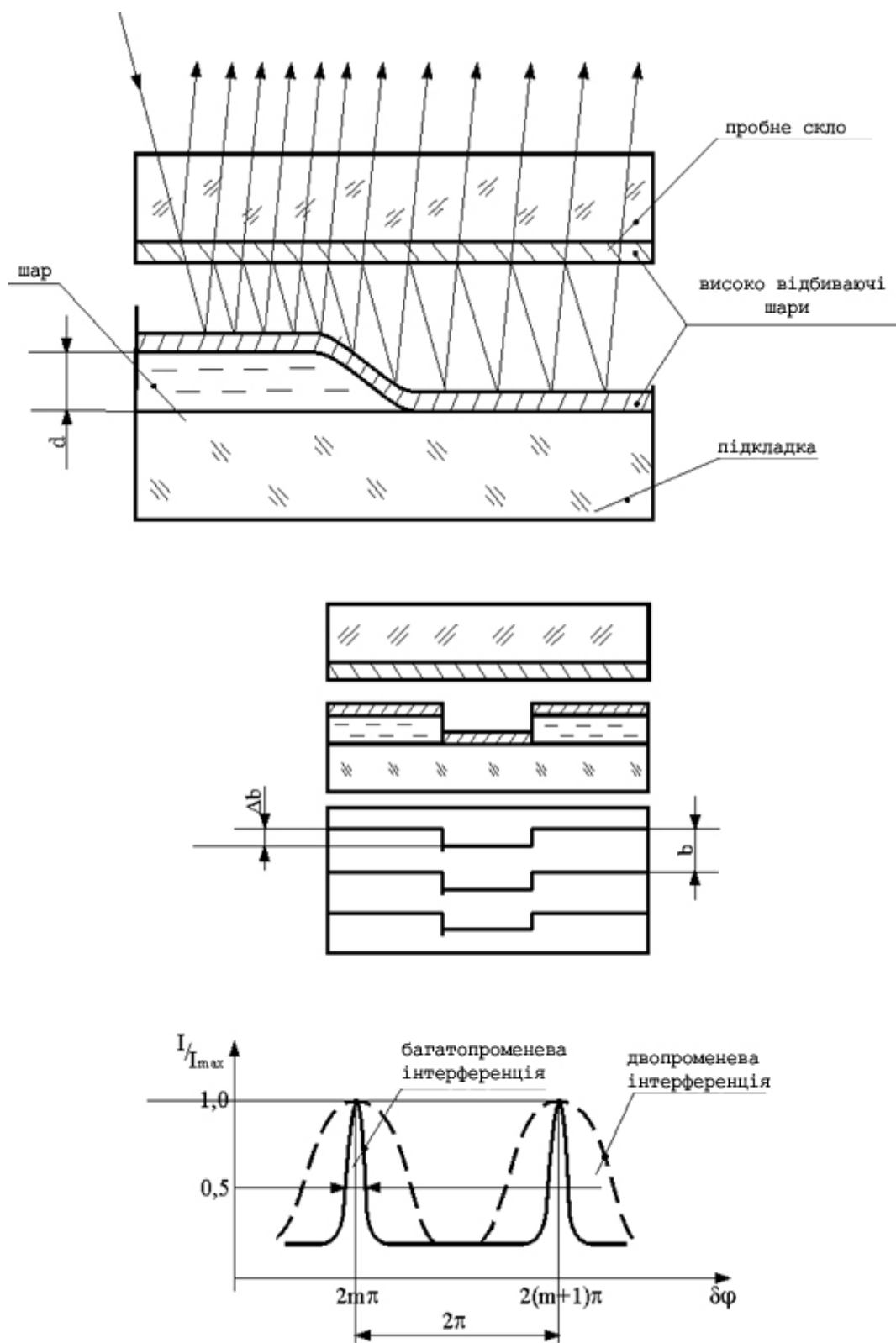


Рис. 3.26 Багатопронена інтерференція

Вимірювання показника заломлення. Показники заломлення і дисперсію можна виміряти будь-яким інтерферометром. Проте краще

застосовувати двопроменеві інтерферометри Жамена і Цендера-Маха, в яких вимірюється різниця показників заломлення двох речовин, які поміщені на шляху двох інтерференційних світлових пучків (рис. 3.27).

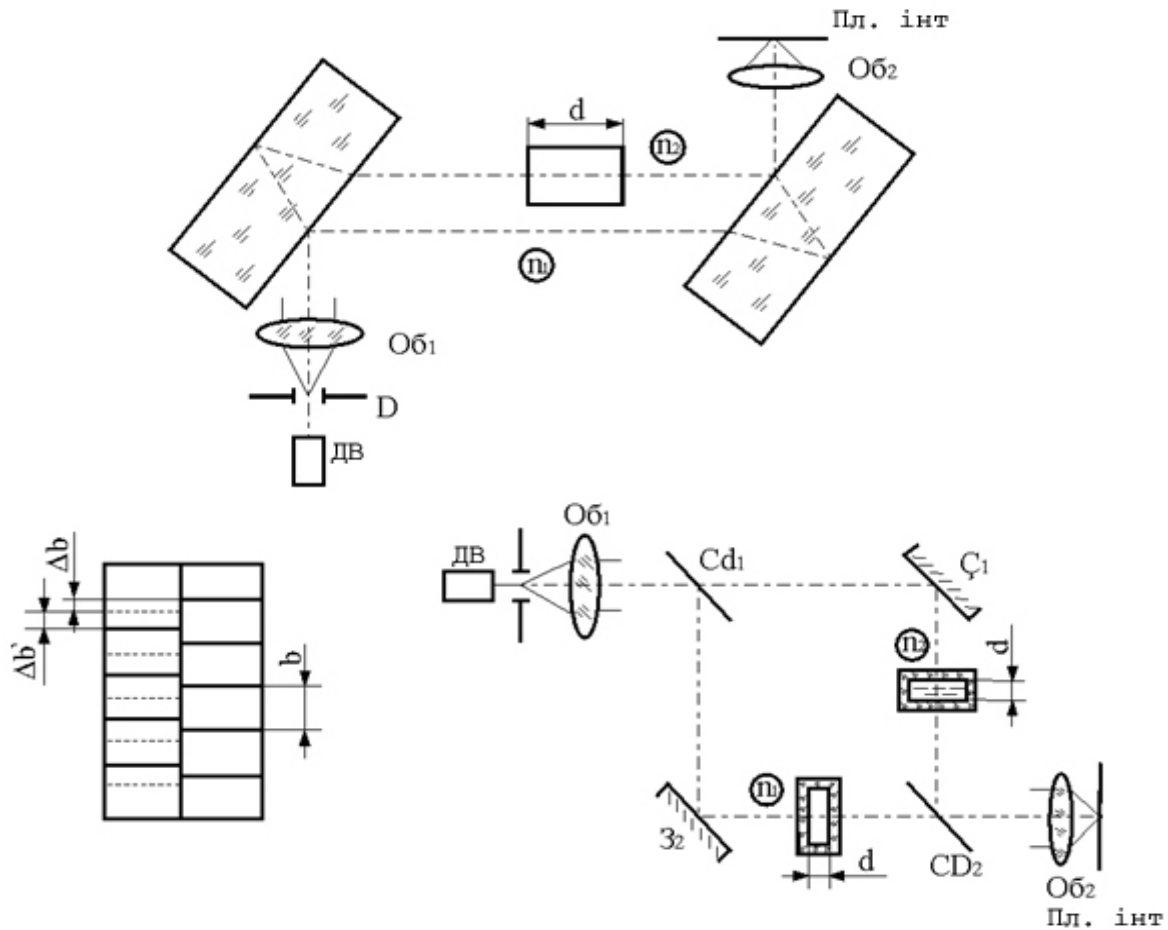


Рис. 3.27 Зміна показника заломлення на інтерферометрі

Якщо на шляху одного з інтерференційних пучків між пластинами інтерферометрів помістити шари речовини товщиною d з показником заломлення n_2 , то інтерференційна картина зміститься внаслідок різниці ходу:

$$\Delta b' = d(n_2 - n_1),$$

де n_1 – показник заломлення повітря.

Вимірюючи це зміщення, можна знайти значення n_2

$$\Delta b = dn_2 - dn_1,$$

$$n_2 = \frac{\Delta b + dn_1}{d}.$$

Вимірювання хвильових абераций. Інтерферометр Тваймана-Гріна

[6]. Під хвильовими аберациями розуміють відхилення деформованого фронту хвилі досліджуваною системою від ідеальної сфери.

Найбільшого поширення набув інтерференційний метод вимірювання хвильових абераций, який дозволяє безпосередньо визначити хвильові аберации досліджуваної системи.

Суть методу полягає у визначенні різниці ходу променів між ідеальною хвилею і реальною, деформованою аберацией контрольованої системи (рис. 3.28а).

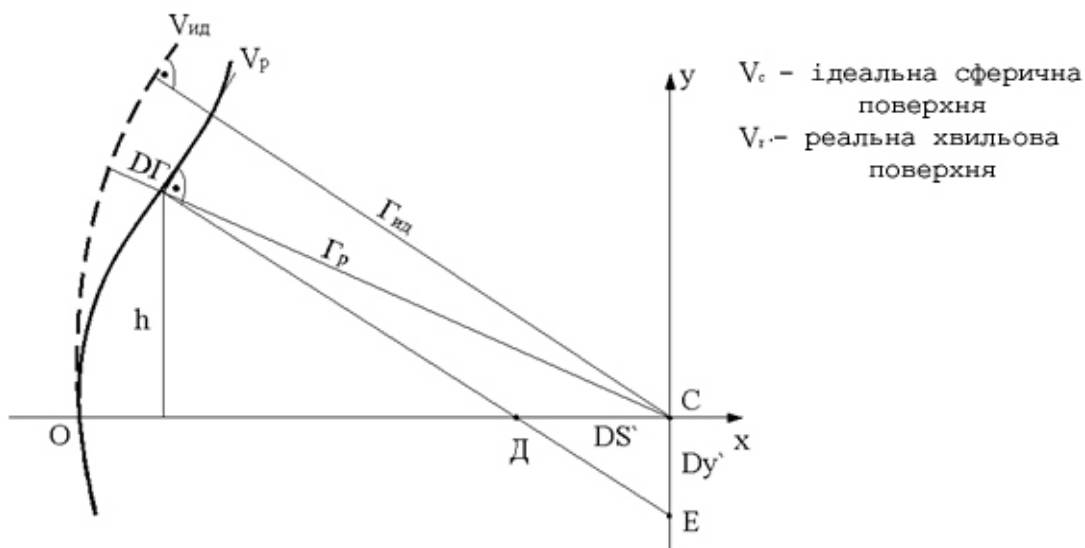


Рис. 3.28а Зв'язок хвильової і сферичної абераций

Якщо контрольована система ідеальна, і її задній фокус точно співпадає з центром кривизни сферичного дзеркала, то плоский хвильовий фронт відбивання, що прямує в контрольований об'єктив, від сферичного дзеркала залишається плоским, внаслідок чого інтерференційна картина буде представляти рівну світлу або темну пляму (рис. 3.28б).

При нахилі еталонного дзеркала або при зміщенні фокусу досліджуваної системи від центру сферичного дзеркала в поперечному

напрямі в полі інтерферометра буде спостерігатись ряд інтерференційних смуг. Відхилення цих смуг від прямолінійності і слугує мірою оцінки якості ОС.

При зміщенні сферичного дзеркала в подовжньому напрямі в полі будуть видні інтерференційні кільця. Число кілець і їх форма є критерієм оцінки якості об'єктиву. Переміщенням сферичного дзеркала добиваються здобуття мінімального числа кілець. Це положення відповідатиме хвильовій аберації в ПНУ.

Хвильову аберацию вимірюють наступним чином [6].

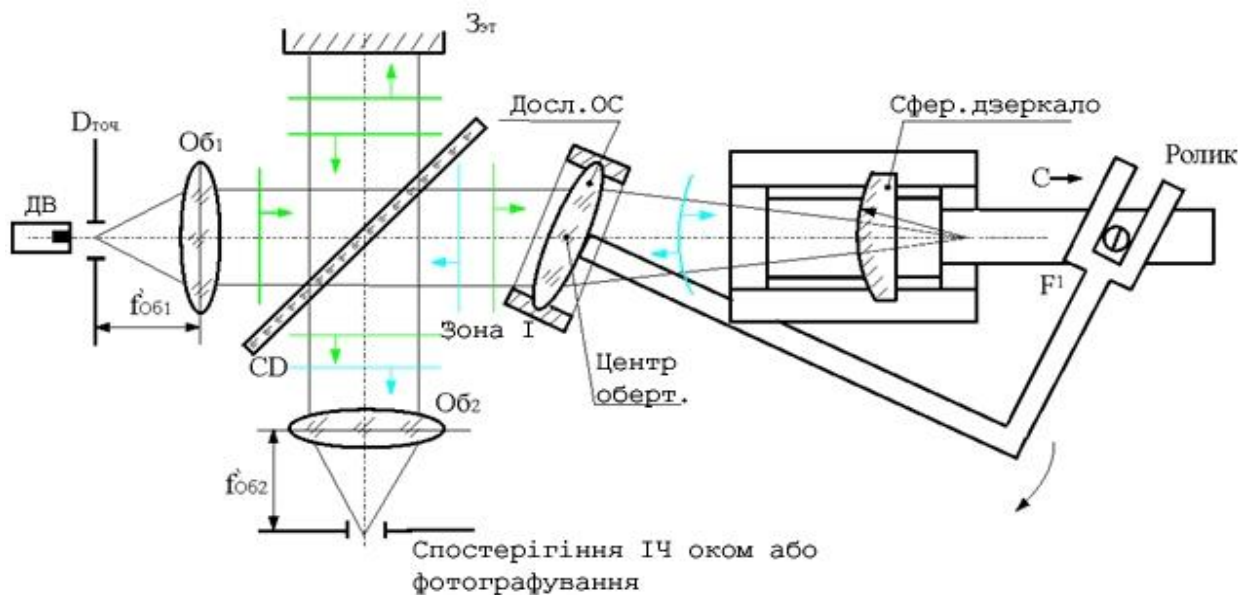


Рис. 3.286 Інтерферометр Тваймана-Гріна

Отримавши інтерференційну картину в площині, близькій до ПНУ, вимірюють радіуси кілець G . Потім, враховуючи що перехід від одного однойменного світлого або темного кільця до іншого відповідає зміні хвильової аберації на $\lambda/2$ і що радіуси кілець пропорційні квадратному кореню з цілих чисел, будують графік хвильової аберації. По осі абсцис відкладають номер кілець N і відповідні ним довжини хвиль, а по осі ординат – квадрати радіусів кілець $-r^2$ (рис. 3.29).

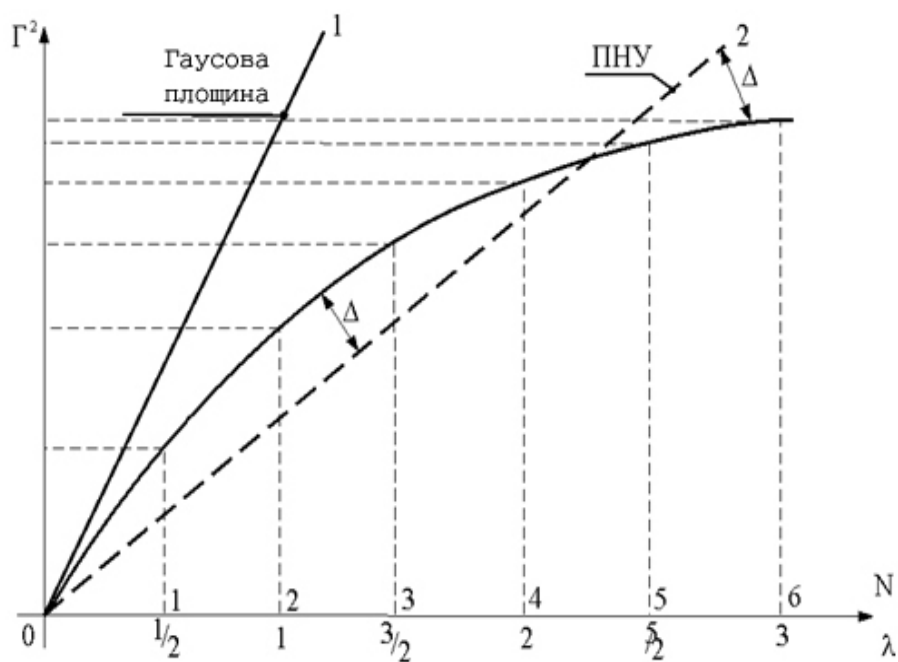


Рис. 3.29 Графік хвильової аберації

Для знаходження хвильової аберації в площині Гаусана графіку проводять пряму 1, дотичну до побудованої кривої на початку координат. Відхилення кривої від прямої характеризує хвильову аберацію в різних зонах площини Гауса. Для знаходження аберацій в ПНУ, проводять пряму 2 так, щоб максимальні відхилення Δ кривої від неї були рівні по величині і протилежні по знаку.

За допомогою інтерферометра Тваймана-Гріна перевіряють також хвильові аберації для різних кутів поля ОС. При цьому для забезпечення перевірки в тій же площині установки, що і для центру поля, при повороті ОС, що перевіряється, сферичне дзеркало переміщається так, що його центр весь час збігається з фокальною площиною контрольованої ОС.

Хвильові аберації визначають також і для різних монохроматичних джерел випромінювання.

3.2 Рефрактометричні вимірювання

Рефрактометричні вимірювання засновані на визначенні показника заломлення твердих, рідких і газоподібних середовищ [17, 25].

Відомості про показник заломлення і його залежність від довжини хвилі випромінювання мають велике значення для оптичного приладобудування (n_e , n_F , n_C).

Показник заломлення залежить від складу і щільності середовища, температури і т.п., тому рефрактометричні вимірювання широко застосовують для визначення структури речовини, складу і ступеню однорідності різних сумішей, дослідження дифузії, вимірювання концентрації, щільності і т.д.

Показник заломлення є однією з небагатьох фізичних величин, які можна виміряти з дуже високою точністю порівняно простими рефрактометричними методами (поріг чутливості 10^{-4} – 10^{-5} і нижче), тому його часто використовують в якості характерного параметру речовини, необхідного для його ідентифікації.

3.2.1 Теоретичні основи рефрактомерії

Показник заломлення [25]. У відповідність із законом заломлення, ставлення синусів кутів падіння ϵ заломлення ϵ' для всіх кутів є постійною величиною (рис. 3.30):

$$\frac{\sin \epsilon}{\sin \epsilon'} = n_{21}.$$

Постійна n_{21} називається відносним показником заломлення.

Показник заломлення пов'язаний з швидкістю розповсюдження світлових хвиль V_1 і V_2 в двох середовищах:

$$n = \frac{V_1}{V_2}$$

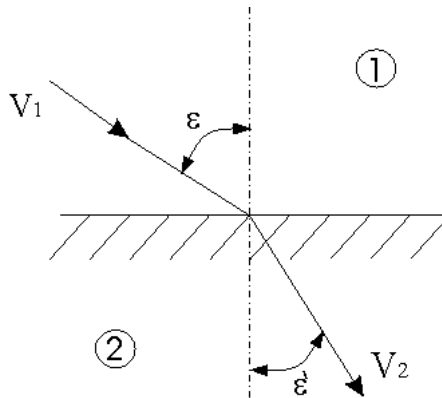


Рис. 3.30 Показник заломлення

Показник заломлення речовини по відношенню до вакууму називається абсолютним і дорівнює відношенню швидкості світла в вакуумі до швидкості в речовині:

$$n = \frac{c}{V} n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

Показник заломлення визначається природою речовини і перед усім здатністю електронних оболонок атомів і молекул поляризуватися під дією електромагнітних хвиль світла. Він залежить також від зовнішніх умов тиску і температури. Тому показники заломлення можна порівнювати, якщо вони виміряні при одних і тих же умовах.

Так як поляризація залежить від довжини світлової хвилі, яка взаємодіє з речовиною, то і показник заломлення також залежить від довжини хвилі. Ця залежність називається дисперсією. У рефрактометрії часто використовуються стандартні довжини хвиль [25] натрію ($\lambda_D = 589,3$ нм), гелію ($\lambda_d = 667,8$ нм), ртуті ($\lambda_e = 546,1$ нм) і водню ($\lambda_F = 486,1$ нм) та інші.

Кристалічні тіла мають подвійне променезаломлення і характеризуються двома граничними чи великим числом показників

заломлення, величини яких залежать від напрямку поширення світла і його поляризації.

3.2.2 Вимірювання абсолютних показників заломлення

Метод кута найменшого відхилення [25]. При вимірюванні за цим методом необхідно із досліджуваного скла виготовити двогранну призму з заломлюючим кутом $\theta \approx 60^\circ$ для $n < 1,65$, $\theta \approx 50^\circ$ для $n = 1,65$ **К** $1,75$, $\theta \approx 40^\circ$ для $n > 1,75$ (допускається відхилення $\theta \pm 2^\circ$) обидві діючі грані призми повинні бути відполіровані з точністю $\frac{1}{4}$ інтерференційної смуги.

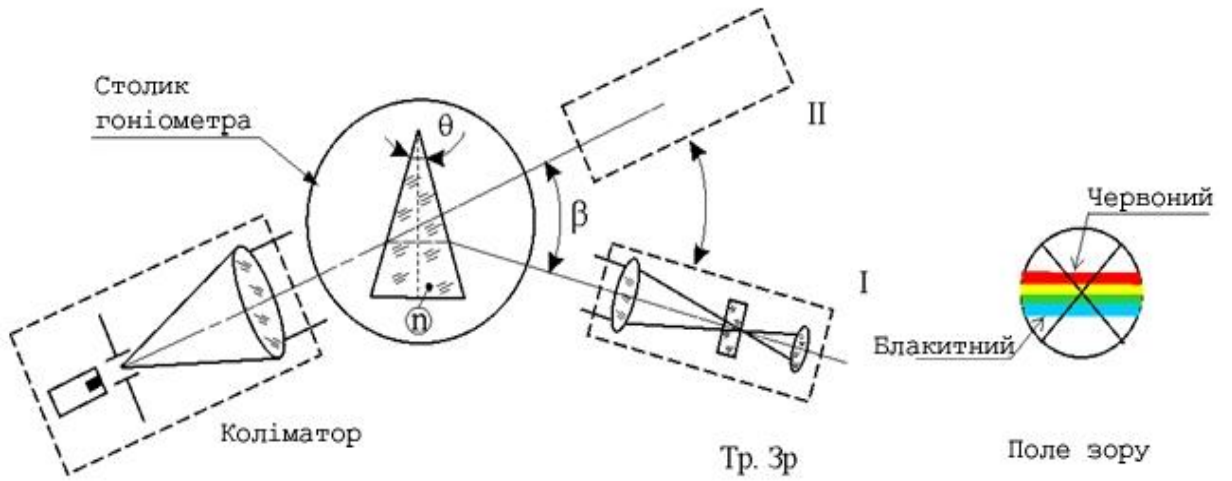
Суть методу полягає в тому, що призму встановлюють в особливе становище по відношенню до падаючого на неї паралельного пучка променів призмою мав мінімальне значення з усіх можливих кутів відхилення для даної призми. Це відбудеться в тому випадку, якщо промені усередині призми пройдуть перпендикулярно бісектрисі заломлюючого кута призми θ .

Кути θ і β вимірюються на гоніометрі. Для вимірювання кута β призму встановлюють на столику гоніометра так, щоб пучки, які падають на її грань і заломлюються в ній займали половину вхідної зіниці зорової труби (рис. 3.31) [17].

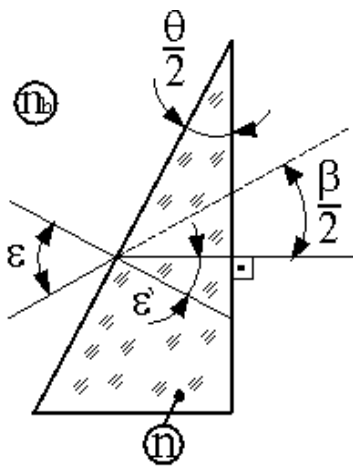
В якості джерела світла використовуються газорозрядні трубки, що дають лінійний спектр. Необхідна спектральна лінія виділяється інтерференційним світлофільтром.

Автоколімаційний метод [25]. Для вимірювання по цьому методу, із досліджуваного скла виготовляється прямокутна призма, яка встановлюється на столику гоніометра (рис. 3.32 [17]).

а)



б)



$$n_{\text{п}} \sin \varepsilon = n \sin \varepsilon'$$

$$\varepsilon' = \frac{\theta}{2}, \quad \varepsilon = \varepsilon' + \frac{\beta}{2} = \frac{\theta + \beta}{2},$$

$$\sin \frac{\theta + \beta}{2} = n \sin \frac{\theta}{2}$$

$$n = \frac{\sin \frac{\theta + \beta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad (2.1)$$

Рис. 3.31 Метод кута найменшого відхилення

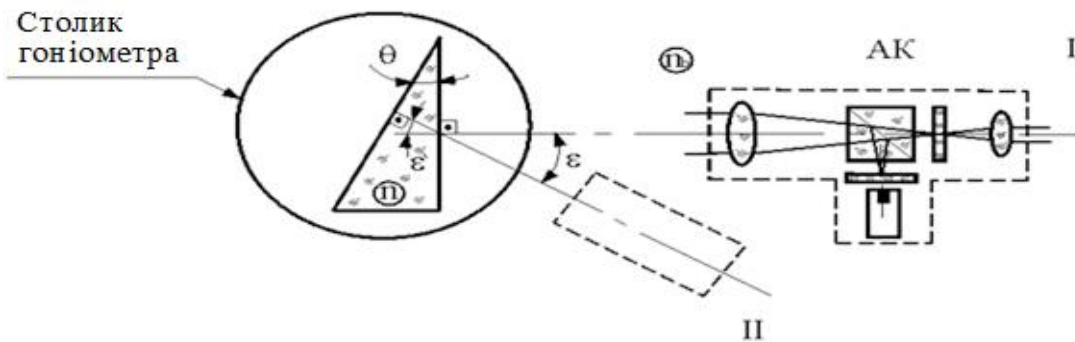


Рис. 3.32 Автоколімаційний метод

$$n_{\text{п}} \sin \varepsilon = n \sin \varepsilon'$$

$$\varepsilon' = \theta$$

$$n = \frac{\sin \varepsilon}{\sin \theta}$$

Вимірювання виконуються тільки за допомогою автоколіматора, який встановлюється в два положення:

I – перпендикулярно до однієї з катетних граней (перший відлік);

II – перпендикулярно гіпотенузній грані (другий відлік).

Із різниці цих відліків знаходиться кут ε . Заломлений кут θ знаходиться звичайним способом на гоніометрі [9].

В якості випромінювачів використовуються джерела з лінійним спектром.

3.2.3 Метод системи призм

Вимірювання відносних показників заломлення [25]. Часто необхідно вимірювати не абсолютні значення показників заломлення, а їх різницю по відношенню до якого-небудь еталону.

Такі завдання зустрічаються при дослідженні рідин і їх можна вирішувати з допомогою рефрактометричних пристроїв, в яких світло заломлюється в декількох призмах.

Найпростішою є двопризменна система, яка являє собою комбінацію двох суміжних призм, що утворюють разом плоскопаралельну пластинку. Методи з кількома призмами ефективні, якщо різниця показників заломлення речовин призм мала.

При цьому відхилення променів системою призм буде прямо пропорційно різниці їх показників заломлення, що значно спрощує відліковий пристрій при достатньо високій їх чутливості і точності. Визначення кута відхилення в таких пристроях зводиться до геометричних

вимірювань зміщень зображень щілини коліматора, які отримують в фокальній площині вихідного об'єктива (рис.2.3.).

3.2.4 Методи граничного кута

Ці методи засновані на використанні явища повного внутрішнього відбивання, яке виникає в тих випадках, коли промені світла виходять із середовища більш щільного в менш повне (рис. 3.33).

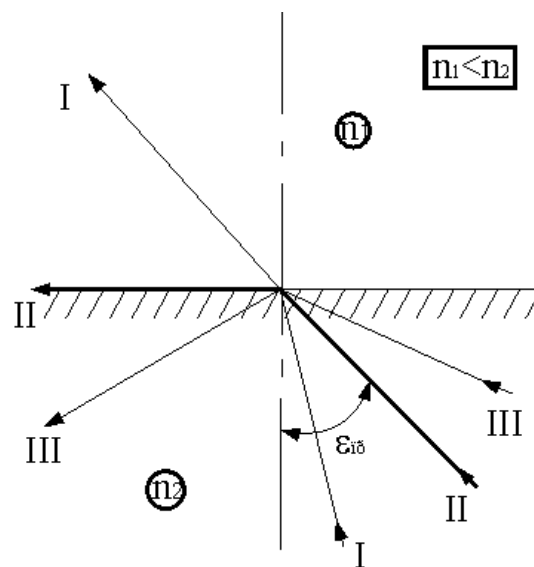


Рис. 3.33 Повне внутрішнє відбивання

Заломлені промені, які відповідають тим, які ковзають (II), називаються граничними, а відповідний їм кут заломлення – граничним [25]

$$\sin \epsilon_{\text{гр}} = \frac{n_1}{n_2}$$

Отримаємо вираз, який пов'язує величину заломленого кута з показником заломлення системи двох призм (рис. 3.34) [17].

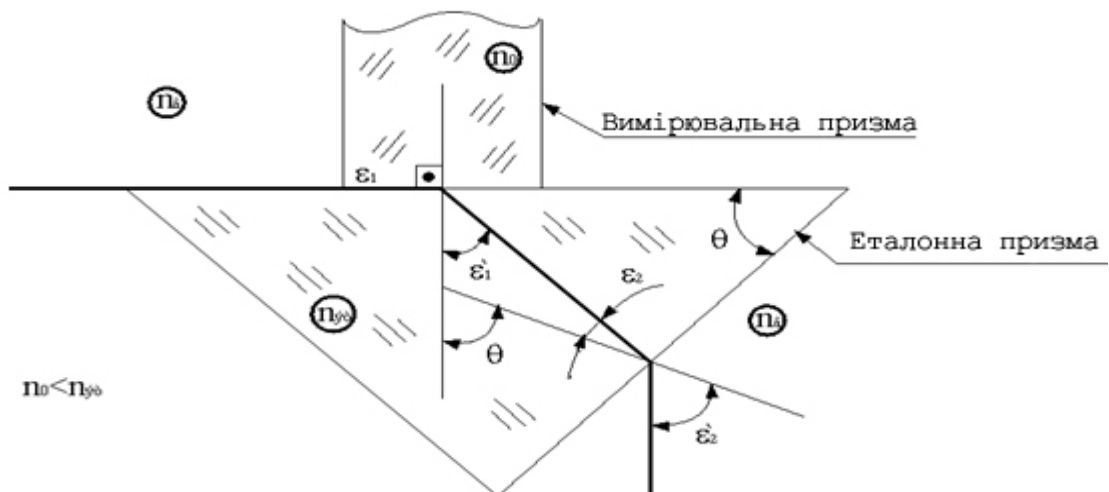


Рис. 3.34 Метод граничного кута

$$n_0 \sin 90^\circ = n_{\text{эТ}} \sin \varepsilon_1' \quad \Rightarrow \quad n_0 = n_{\text{эТ}} \sin \varepsilon_1'$$

$$\varepsilon_1' = 180^\circ - \varepsilon_2 - (180^\circ - \theta) = \theta - \varepsilon_2$$

$$\sin \varepsilon_1' = \sin(\theta - \varepsilon_2) = \sin \theta \cos \varepsilon_2 - \cos \theta \sin \varepsilon_2$$

$$n_{\text{эТ}} \sin \varepsilon_2 = n_{\text{п}} \sin \varepsilon_2' \quad n_{\text{п}} = 1$$

$$\sin \varepsilon_2 = \frac{\sin \varepsilon_2'}{n_{\text{эТ}}}$$

$$\cos \varepsilon_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \varepsilon_2} = \sqrt{1 - \frac{1 - \sin^2 \varepsilon_2'}{n_{\text{эТ}}^2}}$$

$$n = n_{\text{эТ}} \left(\sin \theta \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varepsilon_2'}{n_{\text{эТ}}^2}} - \cos \theta \frac{\sin \varepsilon_2'}{n_{\text{эТ}}} \right)$$

$$\theta = 90^\circ$$

$$n_0 = n_{\text{эТ}} \sqrt{\frac{n_{\text{эТ}}^2 - \sin^2 \varepsilon_2'}{n_{\text{эТ}}^2}} = \boxed{\sqrt{n_{\text{эТ}}^2 - \sin^2 \varepsilon_2'}} \quad (3.3)$$

Таким чином для знаходження n_0 необхідно і достатньо виміряти лише один параметр – кут ε_2' , так як n_0 і θ є константи приладу згідно з (3.3).

У рефрактометрах типу Пульфріха [1, 9, 28] світло від джерела лінійного спектра за допомогою освітлювальної системи прямує вздовж горизонтальної межі вимірювальної призми. На цю грань встановлюється зразок, що має дві плоскі взаємно перпендикулярні межі з точністю до $10'$. Оптичний контакт між образом і призмою забезпечується тонким шаром рідини з показником заломлення $n_0 < n_{\text{ж}} < n_{\text{т}}$ (рис. 3.35).

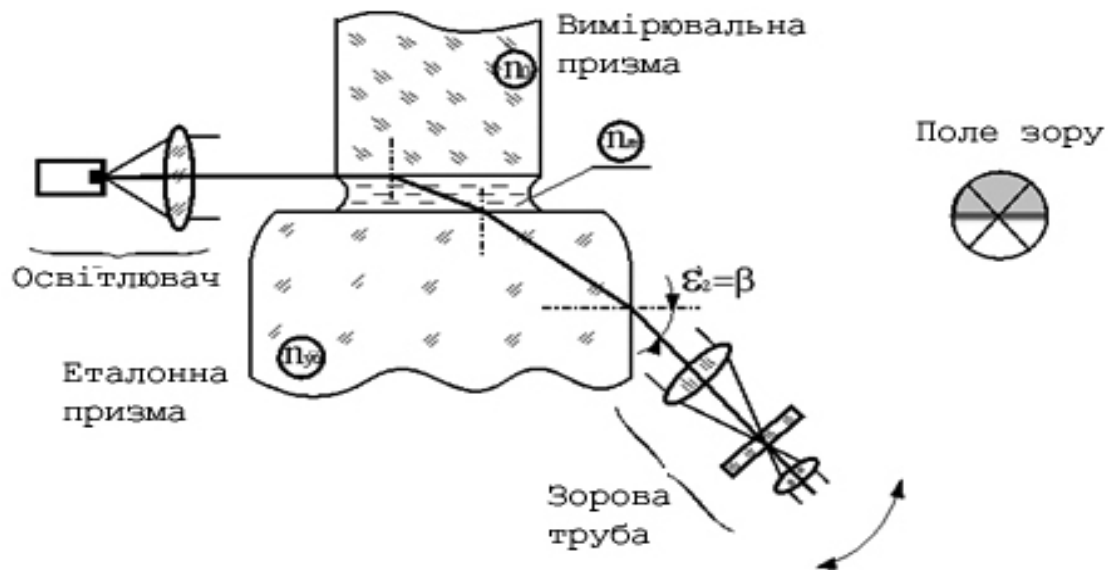


Рис. 3.35 Рефрактометр Пульфріха

Границя світлотіні розглядається через зорову трубу, яка повертається щодо вимірювальної призми. Величина граничного кута β відраховується по лімбу, жорстко пов'язаного із зоровою трубою. Для контролю правильності установки призми і отримання нульового відліку зорова труба перебудовується в автоколіматор.

Для дослідження показників заломлення рідин до поверхні вимірювальної призми приклеюється кювета, в яку наливають досліджувану рідину (рис. 3.36).

Рефрактометри типу Пульфріха використовуються також для вимірювання показників заломлення порошків і анізотропних кристалів, які вміщуються на вимірювальну призму.

Для зручності вимірювання показника заломлення анізотропного кристала еталонне середовище виготовляється у вигляді напівсфери.



Рис. 3.36 Рефрактометр Пульфріха – вимірювання показника заломлення рідини

Рефрактометри типу Аббе використовуються для вимірювання показника заломлення рідини [25, 26, 28].

Прилад має вимірювальну призму, зроблену з важкого флінта і має величину заломлення кута близько 60° . Сорт скла і кути освітлювальної призми значення не мають. Освітлювальна призма пов'язана з шарніром і може відводиться від вимірювальної (рис. 3.37).

Крапля досліджуваної рідини поміщається на гипотенузну грань вимірювальної призми і притискається освітлювальною призмою так, щоб між призмами залишився тонкий шар рідини. Світло від джерела проходить крізь освітлювальну призму і, поступаючи в рідину, заломлення на робочій грані вимірювальної призми і на грані, що граничить з повітрям, і потрапляє в зорову трубу.

При розглянутому способі освітлення неможливо отримати пучки, що строго ковзають уздовж вхідної грані вимірювальної призми. Проте оскільки шар рідини дуже тонкий, то з достатньою точністю можна вважати, що в області межі світлотіні виходять граничні промені. Гипотенузна грань освітлювальної призми зазвичай матується. Це

необхідно для того, щоб при спостереженні межі світла і тіні в полі зору не потрапляли предмети, що знаходяться поблизу джерела.

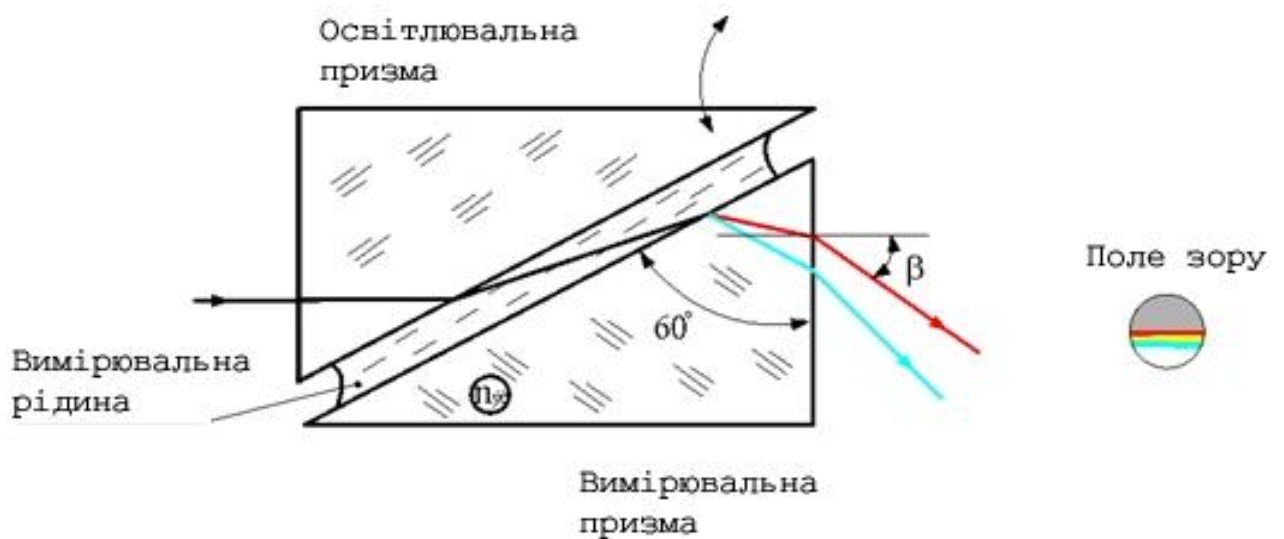


Рис. 3.37 Рефрактометр Аббе

У рефрактометрі Аббе зазвичай є компенсатор дисперсії, що дозволяє використовувати для вимірювань біле світло. Компенсатор дисперсії складається з двох призм прямого бачення (призм Амічі). Призми підібрані так, що жовті промені проходять крізь систему без вимірювання напрямку. Світло великих довжин хвиль відхиляється в один бік, а менших – в протилежну по відношенню до жовтих променів (рис. 3.38).

Призми повертаються відносно осі в протилежні сторони. Сумарна кутова дисперсія змінюється, так як складається з дисперсії обох призм. Вона пробігатиме всі значення в інтервалі від максимальної додатної величини до відповідної від'ємної. При повній компенсації межа світлотіні стає безбарвною і її положення співпадає з положенням межі, утвореної жовтим світлом.

3.2.5 Імерсійні методи

Імерсійні методи засновані на використанні явища зникнення видимих контурів скла, зануреного в рідину [26]. Це відбувається на тій довжині хвилі монохроматичного випромінювання, для якої показники заломлення рідини і скла однакові.

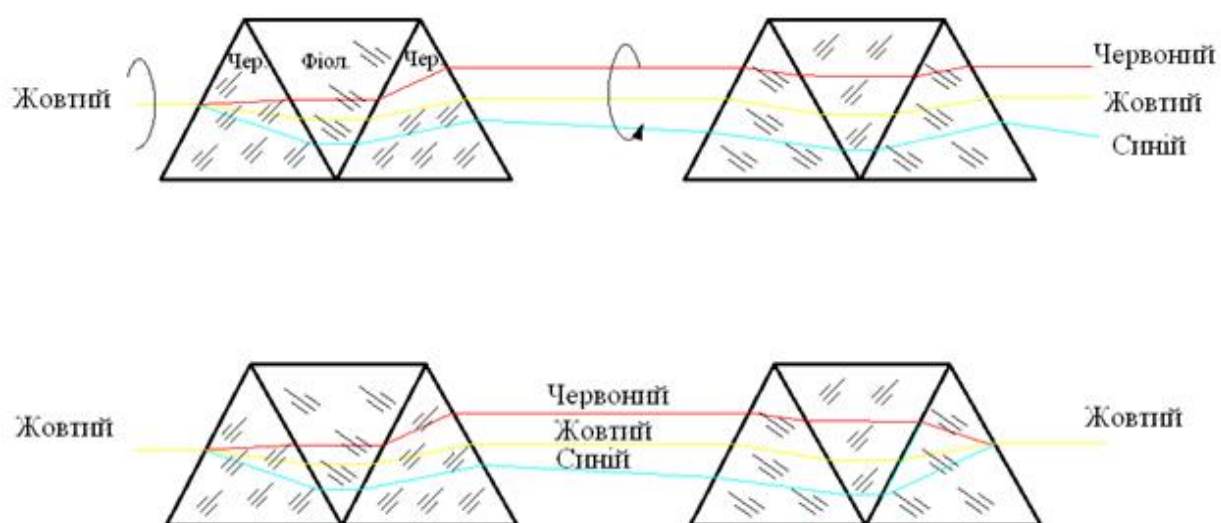


Рис. 3.38 Компенсатор дисперсії

Імерсійні методи не вимагають спеціального виготовлених зразків і дозволяють вимірювати показник заломлення невеликих осколків скла (рис. 3.39)[17].

Еталоном служить пластина, показник заломлення якої близький до показника заломлення досліджуваного зразка. Показник заломлення імерсійної рідини приблизно рівний показнику заломлення випробовуваного скла.

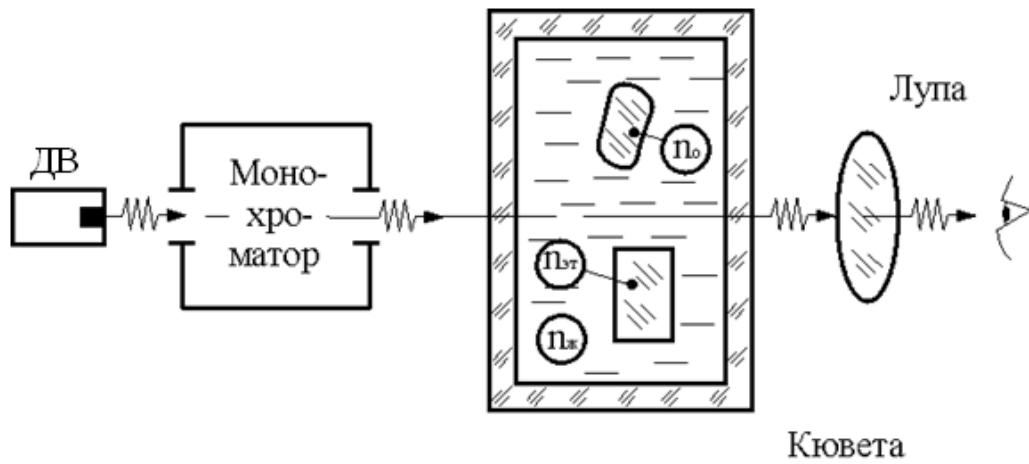


Рис. 3.39 Імерсійні методи

Дисперсія рідини завжди більше дисперсії звичайного скла. Тому, якщо криві дисперсії еталону і зразка достатньо близькі один до одного, то завжди можна підібрати таку імерсійну рідину, що крива дисперсії рідини перетинатиме обидві криві еталону і зразка у видимій області спектру, а перетин кривих рідини і зразка відбудеться поблизу заданої довжини хвилі (рис. 3.40).

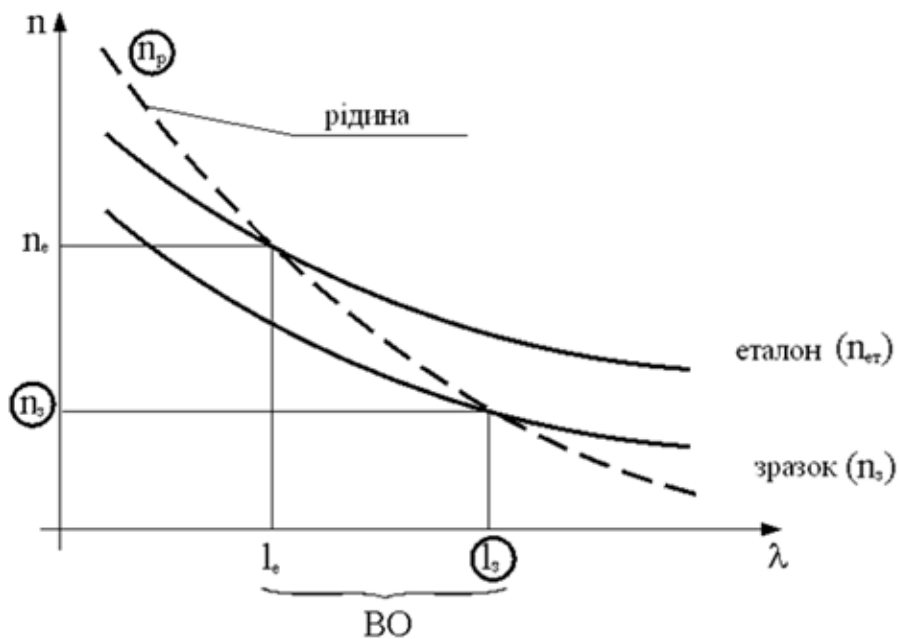


Рис. 3.40 Криві дисперсії

Якщо для якої-небудь довжини хвилі λ_e показник заломлення рідини і еталону однакові, то для променів цієї довжини хвилі рідини і еталон є оптично однорідне середовище. Аналогічна картина спостерігається для зразка на довжині хвилі λ_3 - контури скла «зникають».

Криві дисперсії рідини і еталону повинні бути визначені заздалегідь одним з відомих способів.

Власне процес вимірювання зводиться до визначення моменту "зникнення" зразка в імерсійній рідині при зміні довжини випромінювання, що пройшло через монохроматор [17]. По відомій дисперсії рідини визначає показник заломлення зразка на довжині хвилі λ_3 . На довжині хвилі I_e проводять "зникнення" дисперсії рідини до дисперсії еталону, яка володіє значно великою стабільністю.

3.3 Поляризаційні вимірювання

Область застосування. Стан поляризації світла при його взаємодії з речовиною відображає внутрішню структуру речовини, тому поляризаційні вимірювання широко використовуються при дослідженні оптичних властивостей, складу і структури речовини.

Поляризатори застосовуються як системи послаблення світла у фотометричних дослідженнях, інтерференційних приладах з фазовим контрастом, при дослідженні кристалів і напруги в прозорих середовищах.

3.3.1 Методи отримання і властивості поляризованого випромінювання

За станом поляризації світлові пучки можна розділити на природні, частково поляризовані, лінійно поляризовані і еліптично поляризовані [29].

Окремим випадком еліптично поляризованого світла є світло, поляризоване по колу.

Оскільки світло являє собою поперечні електромагнітні хвилі, в яких світловим вектором являється електричний вектор, то природне світло можна представити у вигляді набору електромагнітних хвиль однакової амплітуди, але з різною орієнтацією електричних векторів в просторі. Якщо природне світло пропускати через поляризатор, що обертається навколо осі, то інтенсивність світла, що пройшло, буде постійна при будь-якому положенні поляризатора (рис.3.41).

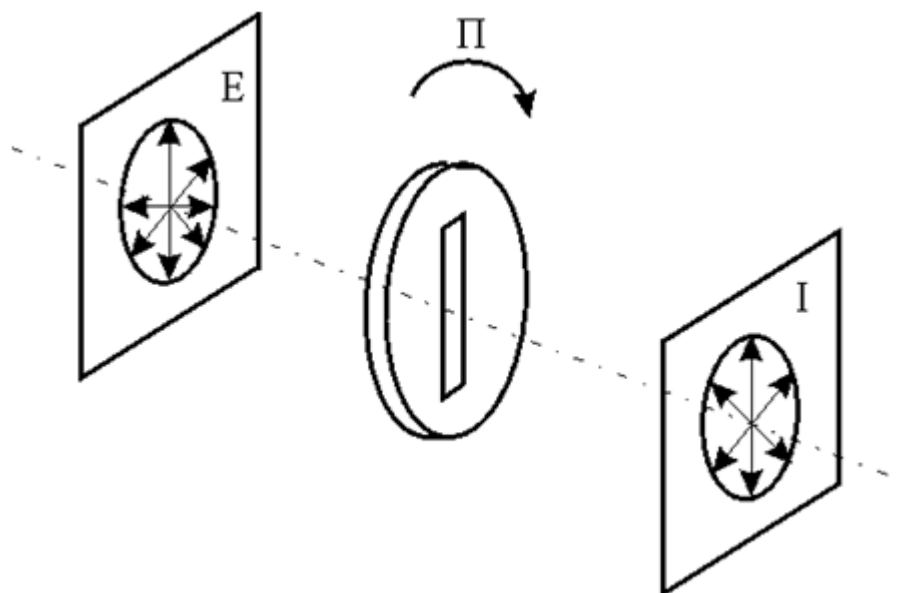


Рис. 3.41 Проходження природнього світла через поляризатор

Частково поляризоване світло відрізняється від природного тим, що амплітуда його не однакова в різних напрямках, що лежать в площині, перпендикулярних променю. Якщо частково поляризоване світло пропускати через поляризатор, що обертається, то інтенсивність світла, що пройшло, буде періодично змінюватись (рис. 3.42).

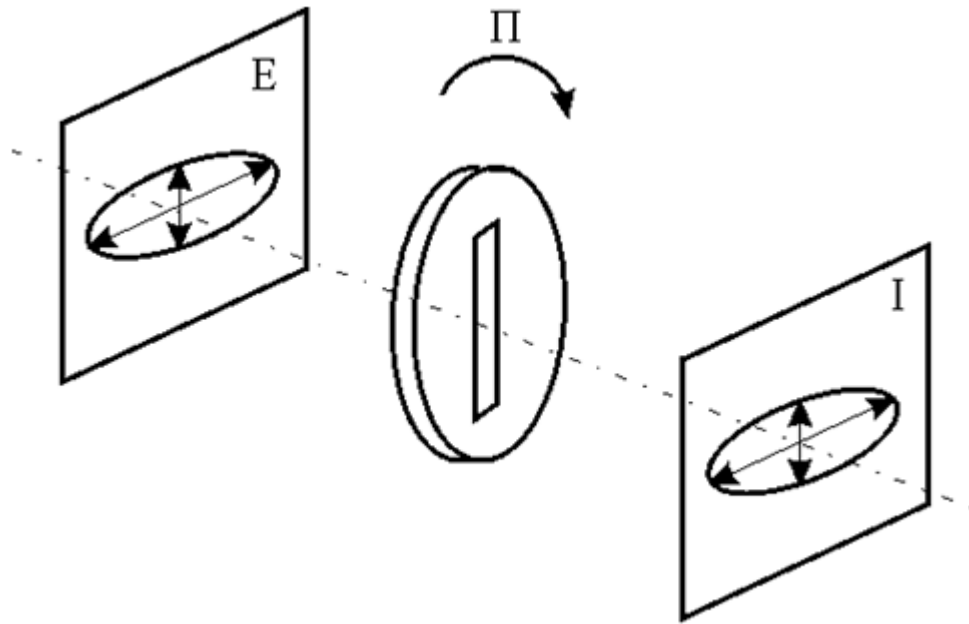


Рис. 3.42 Проходження частково поляризованого світла через поляризатор

Частково поляризоване світло характеризується ступенем поляризації [29]

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (3.4)$$

де I_{max} і I_{min} – максимальна і мінімальна інтенсивності світла, пропущеного поляризатором, що обертається.

З формули (3.4) витікає, що ступінь поляризації природного світла рівний 0, оскільки $I_{max} = I_{min}$.

Лінійно-поляризоване світло являє собою набір електромагнітних хвиль з однаковою орієнтацією електричних векторів в просторі. При проходженні лінійно-поляризованого світла через поляризатор, що обертається, спостерігається періодичний перехід від максимальної інтенсивності до повного гасіння світла. Ступінь поляризації лінійного поляризованого світла рівний 1 (рис. 3.43).

Еліптично поляризоване світло являє собою електромагнітні хвилі з таким станом поляризації, при якому електричний вектор описує еліпс, що

лежить в площині, перпендикулярній напрямку розповсюдженню пучка. Окремим випадком еліптично поляризованого світла є світло, поляризоване по колу.

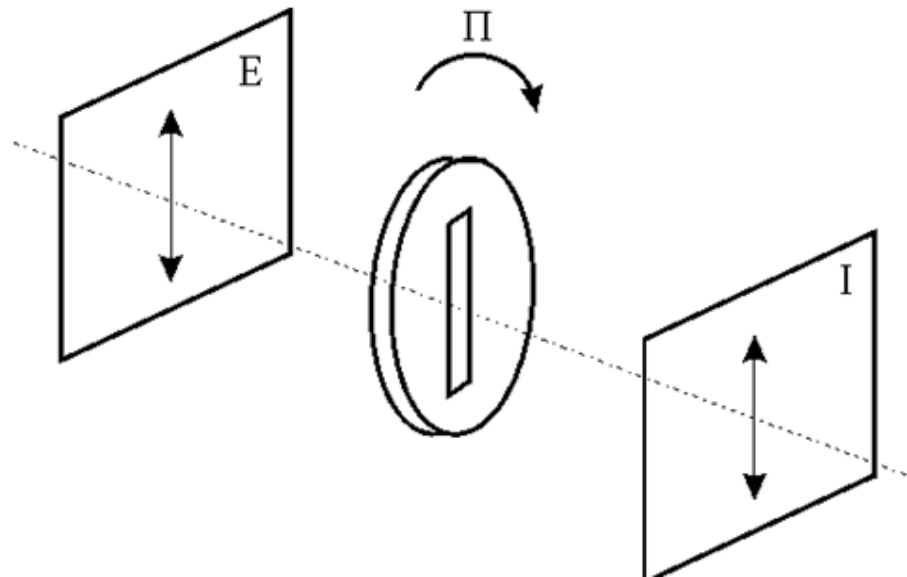


Рис. 3.43 Дослідження поляризованого світла

Якщо еліптично поляризоване світло досліджувати за допомогою поляризатора, що обертається, то, як і у випадку частково-поляризованого світла, спостерігається періодичне вимірювання інтенсивності від максимального значення до мінімального [29]. Кругова поляризація в цьому випадку нічим не буде відрізнятися від природного світла і відрізнити її від природного світла за допомогою одного поляризатора не можна. Для цього досліджуване світло необхідно заздалегідь пропустити через компенсатор, який компенсуватиме зсув фаз між двома взаємно-перпендикулярними складовими електричного вектора еліптично поляризованого світла і перетворить його на лінійно-поляризований (рис.3.44).

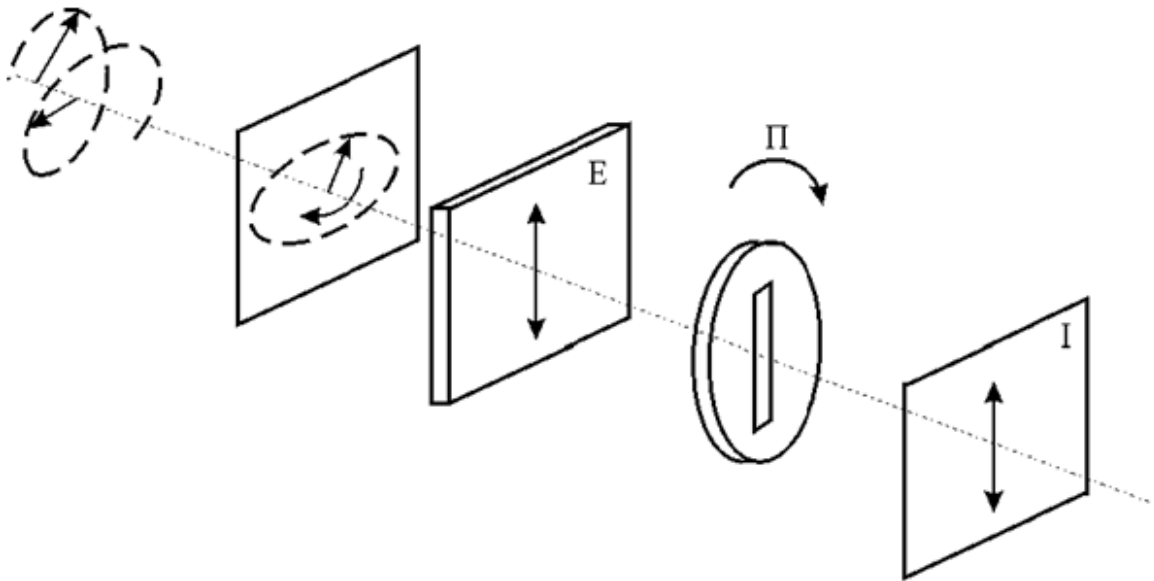


Рис. 3.44 Дослідження поляризованого світла

3.3.2 Аналіз обертання площини поляризації. Вимірювання концентрації розчинів

Явище обертання площини поляризації полягає в тому, що при проходженні лінійно-поляризованого світла через деякі речовини, що називаються оптично активними, відбувається поворот коливань електричного вектора.

Це явище використовують для визначення концентрації розчинів деяких речовин (цукру, нікотину, камфори і ін.).

Кут повороту Φ площини поляризації для розчинів залежить від концентрації активної речовини в розчині [18, 25]

$$\varphi = \alpha c d ,$$

де α – коефіцієнт, що залежить від температури, довжини хвилі і природи розчину; c – концентрація активної речовини; d – товщина шару рідини.

Прилади, які визначають концентрацію через поворот площини поляризації називають поляриметрами (рис. 3.45).

У простому випадку аналізатор А схрещений з поляризатором П і світло через установку за відсутності досліджуваної речовини не проходить. Якщо між поляризатором і аналізатором встановити оптично активну речовину, то поле зору стане просвітленим. Щоб знову повністю погасити світло системою, необхідно повернути аналізатор на кут Φ , рівний куту обертання площини поляризації і пропорційний концентрації c .

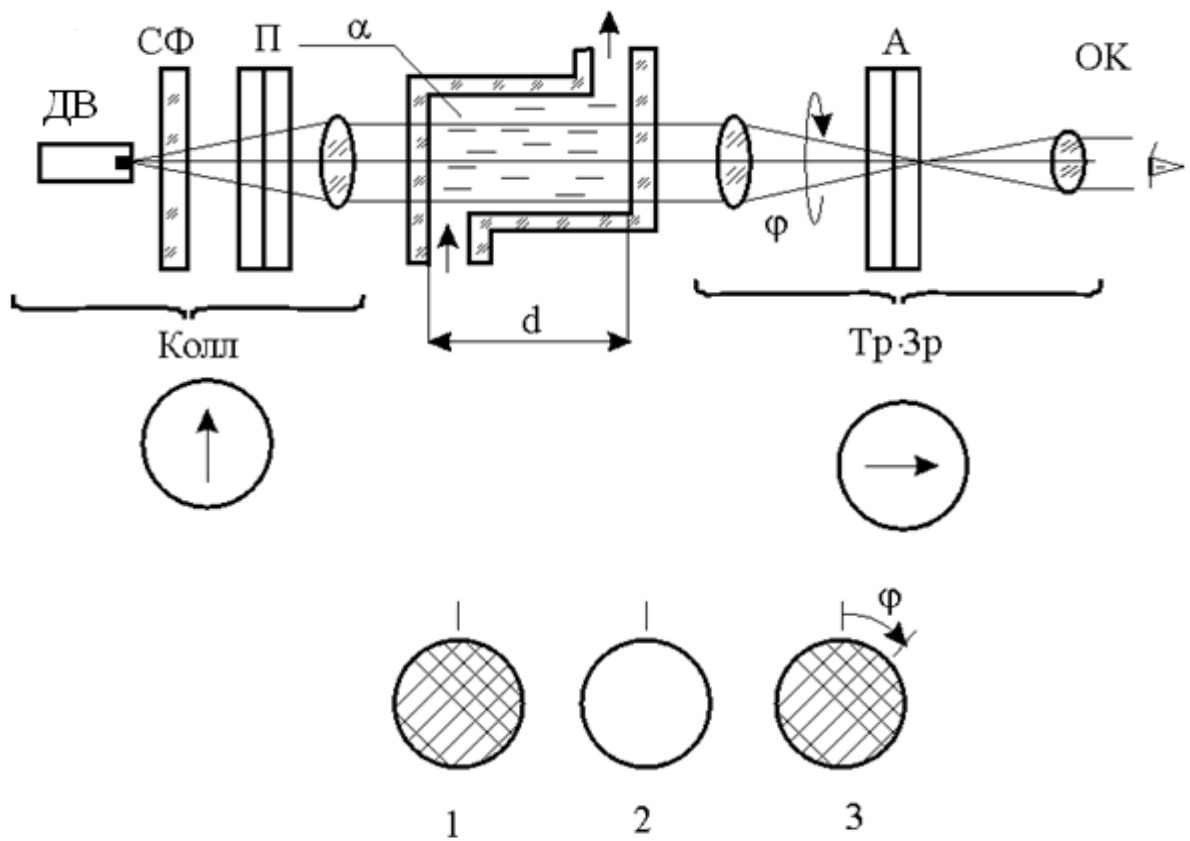


Рис. 3.45 Поляриметр

$$\varphi = \alpha c d ,$$

$$c = \frac{\varphi}{\alpha d}, \quad \alpha, d = const$$

3.3.3 Аналіз подвійного променезаломлення. Вимірювання внутрішніх напруг

Внутрішні напруги в прозорих і слабозабарвлених матеріалах призводять до появи подвійного променезаломлення, яке, у свою чергу, викликає різницю ходу звичайного і незвичайного променів.

Оцінка цих напруг проводиться полярископом–поляриметром [27] двома способами:

1. Приблизною оцінкою по інтерференційному забарвленню картини, що спостерігається;
2. Кількісною оцінкою різниці ходу звичайного і незвичайного променів за допомогою компенсатора Сенармона (рис. 3.46).

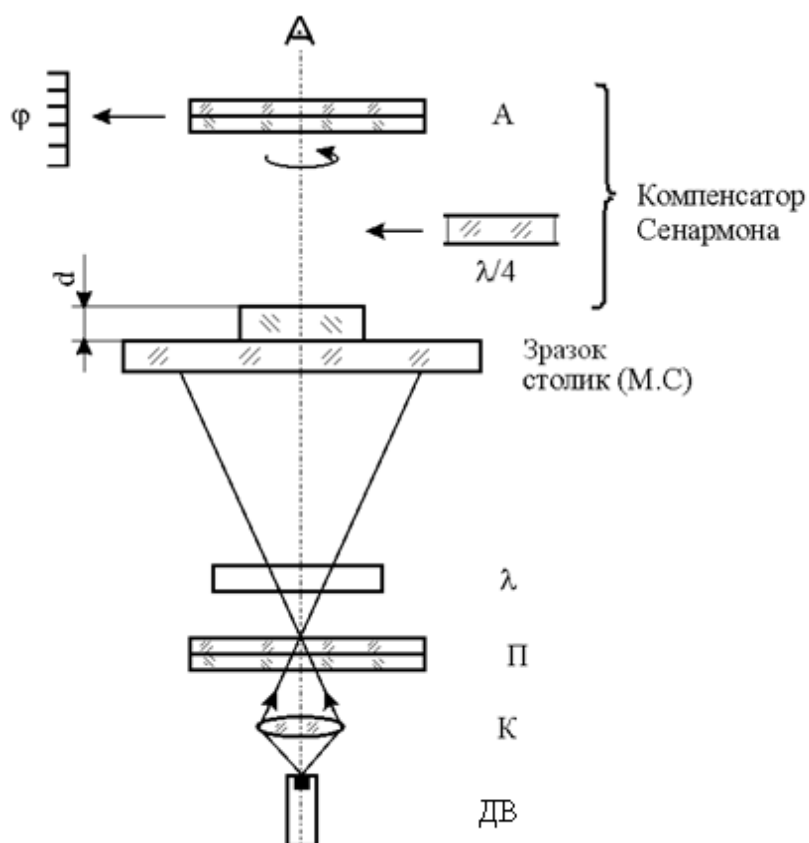


Рис. 3.6 Вимірювання внутрішніх напруг

$$\Delta = (n_o - n_e)d \quad \rightarrow \quad n_o - n_e = \frac{\Delta}{d}$$

В якості полярископа прилад працює наступним чином.

Світло від випромінювача проходить конденсор, пластину λ і матове скло, на якому розташований досліджуваний зразок, в якому поляризоване світло випробовує подвійне променезаломлення.

Площини коливань звичайного і незвичайного променів взаємно перпендикулярні. Коливання зсунуті по фазі в залежності від значень напруг і довжини ходу в досліджуваному зразку. Аналізатор зводить коливання звичайного і незвичайного променів в одну площину. В результаті їх взаємодії відбувається інтерференція світла і забарвлення поля зору. Ступінь забарвлення залежить від різниці ходу, яку отримали промені в даному зразку.

Пластина λ вносить різницю ходу променів і встановлена так, що напрям коливань пластини складає 45° з напрямом коливань електричного вектора поляризатора. При цьому в полі приладу спостерігається чутливе пурпурно-фіолетове забарвлення. Навіть незначну зміну різниці ходу викликає різкий зсув кольору поля в синю або червону область. За кольором поля визначають різницю ходу і величину напруги в зразку.

При роботі в якості поляриметра в оптичну схему вводять пластину $\lambda/4$. Її дія полягає в перетворенні еліптично поляризованого світла, що вийшло з досліджуваного зразка в лінійно поляризований. Лінійно поляризоване світло гаситься аналізатором. Кількісну оцінку різниці ходу, що вноситься зразком, проводять за допомогою компенсатора Сенармона (пластина $\lambda/4$ у поєднанні з аналізатором, що обертається) за шкалою, по якій визначається кут повороту аналізатора.

3.3.4 Поляризаційна мікроскопія

Поляризаційна мікроскопія являється одним з основних методів дослідження прозорих і не прозорих об'єктів, тобто таких, у яких оптичні властивості неоднакові по різних напрямках. Анізотропія може бути природною і штучною. Знаючи анізотропію препарату, можна судити про його структуру і фізико-хімічні властивості. Поляризаційна мікроскопія дозволяє проводити якісну і кількісну оцінку гірських порід, мінералів, кристалів, біологічних і інших об'єктів.

Поляризаційний мікроскоп [27] відрізняється від звичайного тим, що в хід променів у ньому вводиться поляризатор, аналізатор і компенсатори. В більшості випадків при дослідженні анізотропії спостерігають інтерференцію поляризованих променів.

Застосовують два основні способи спостереження: ортоскопічний і коноскопичний (рис. 3.47).

При ортоскопічному спостереженні досліджуваний об'єкт освітлюють паралельним пучком поляризованих променів. Лінійно поляризоване світло отримують за допомогою поляризатора. Зображення об'єктів проектується у фокальну площину окуляра. Картина інтерференції поляризованих променів, що спостерігається, локалізована в площині об'єкту.

При коноскопичному ході променів апертурна діафрагма відкривається і об'єкт освітлюють пучками поляризованих променів, які сильно сходяться. Інтерференція в цьому випадку локалізована картина виникає в задній фокальній площині об'єктиву. Спостереження ведуть за допомогою лінзи Бертрана, яка проектує вихідну зіницю об'єктиву у фокальну площину окуляра, встановлюють діафрагму, що обмежує певні ділянки зображення об'єкту.

При дослідженні кристалів вид картини залежить від орієнтації кристала, його типу (одновісний або двовісний), від значення подвійного променезаломлення і товщини кристала.

Коноскопічне спостереження дозволяє наочно оцінити орієнтацію кристалів. Інтерференційні картини, що виникають при коноскопічному дослідженні кристалів, називають коноскопічними фігурами.

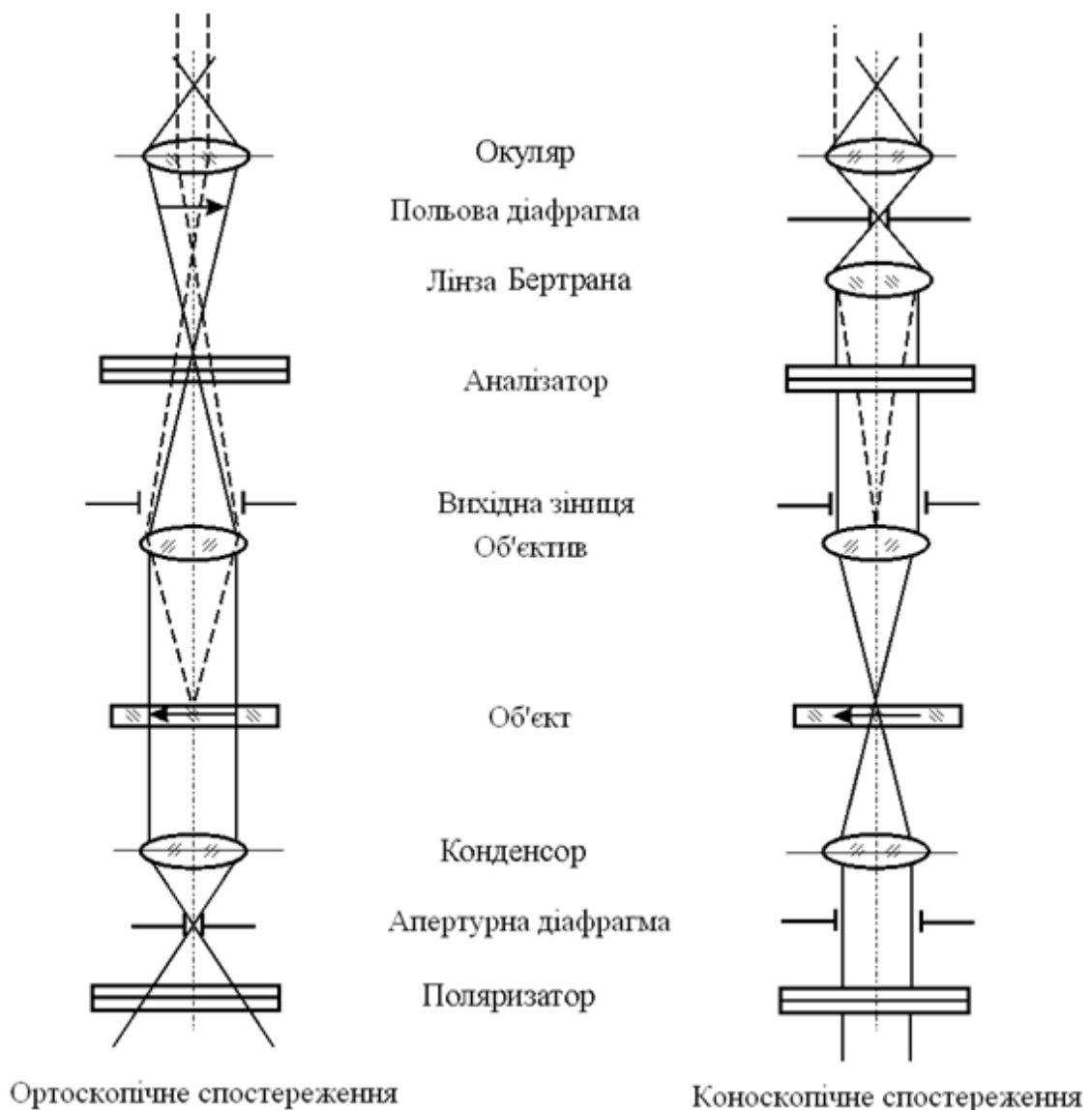


Рис. 3.47 Поляризаційна мікроскопія

3.4 Дифракційні вимірювання

Область застосування. Дифракційні вимірювання застосовують при контролі оптичних поверхонь і при дослідженні якості оптичних систем. Вони володіють наочністю і простотою реалізації, проте забезпечують невисоку точність вимірювань.

3.4.1 Контроль увігнутих сферичних поверхонь по дифракційному зображенню точки

Метод заснований на порівнянні спостережуваного дифракційного зображення точкової діафрагми з її теоретичним виводом.

Використовується мікроскоп з автоколімаційним окуляром [17].

Наочна площина мікроскопа, в якій знаходиться дійсне зображення точкової діафрагми, поєднується з центром кривизни увігнутої сферичної поверхні (рис. 3.48).

Якщо контрольована поверхня має ідеальною форму, то відбиті промені утворюють гомоцентричний пучок, а зображення точкової діафрагми матиме вид кружка Ері: різко обкреслений, яскравий центральний диск, а також різко обмежене, але набагато менш яскраве світле кільце. За гарних умов спостерігається також друге і третє кільця.

Якщо поверхня має зональні похибки, симетричні відносно осі, то це викличе перерозподілі енергії в дифракційних кільцях.

Астигматизм викликає еліптичних кілець.

Контроль плоских поверхонь можна здійснити за допомогою сферичної увігнутої поверхні високої якості і великої апертури.

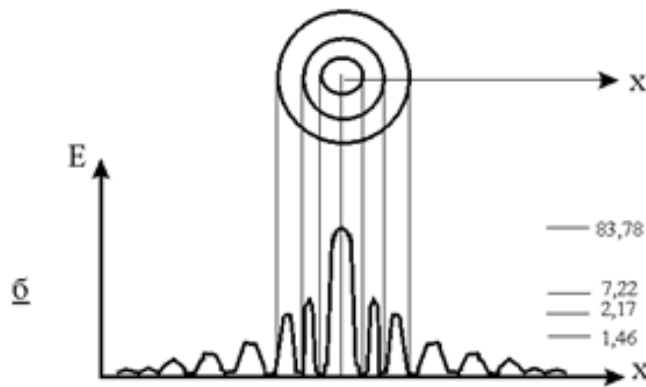
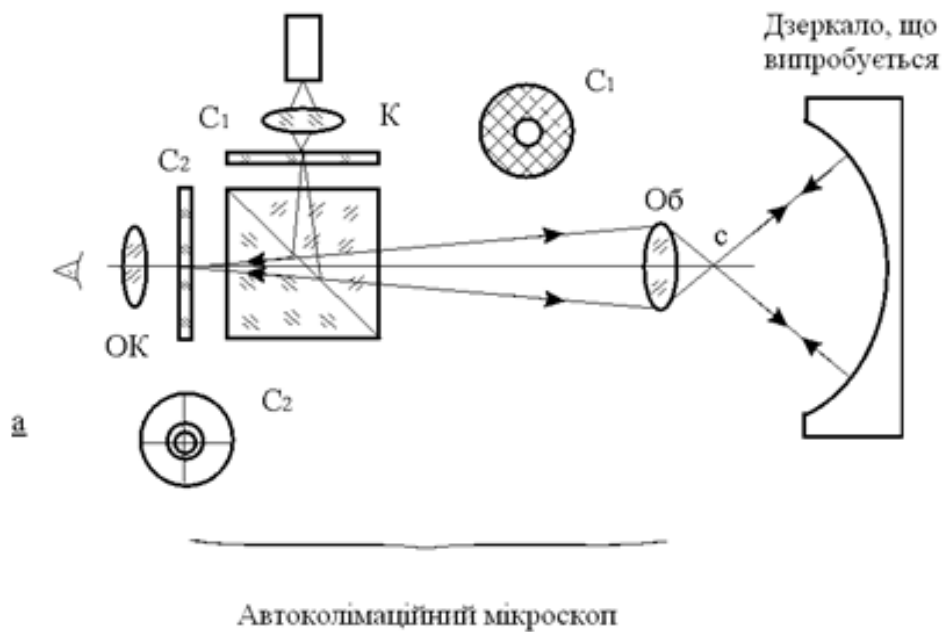


Рис. 3.48 Контроль увігнутих сферичних поверхонь

3.4.2 Дослідження якості оптичних систем дифракційними методами

Метод Лінника[17]– забезпечує можливість вимірювання поперечної сферичної аберації і коми в зображенні точки на оптичній вісі, поздовжній сферичній аберації для точок поза оптичною віссю(рис. 3.49).

Метод заснований на використанні явища дифракції. Положення точок фокусу фіксує шляхом поєднання смуг дифракційних картин, що утворюються при проходженні променів через вузькі отвори спеціальної діафрагми.

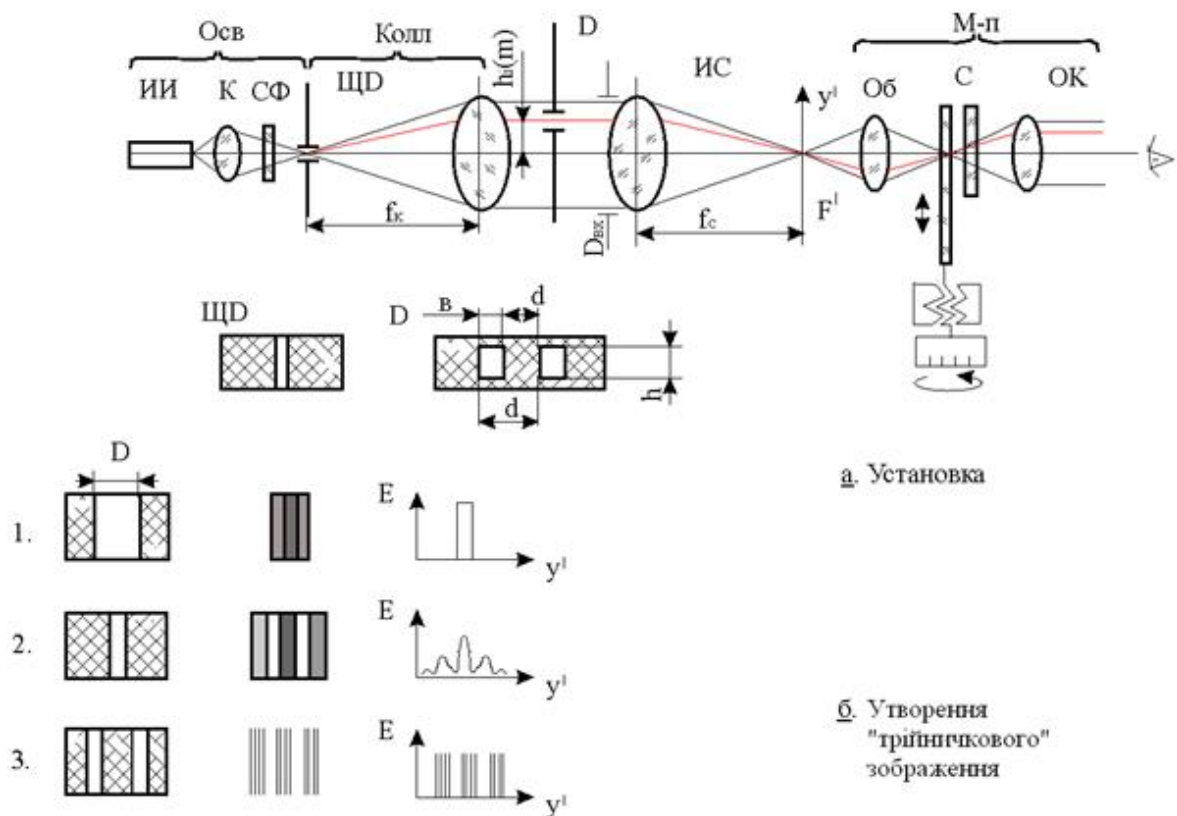


Рис. 3.49 Метод Лінника

Ширина прямокутного отвору в діафрагмі істотно позначається на вигляд зображення щілини, встановленої у фокальній площині коліматора. Якщо її узяти великою, то зображення щілини виходить достатньо вузьким і чітким, проте такий отвір виділяє дуже велику площу із зони контрольованої системи і вимірювання аберації стануть невизначеними.

Із зменшенням ширини прямокутного отвору починають виявлятися дифракційні явища, внаслідок чого з'являється замість одного декілька зображень щілини: центральне, найбільш яскраве і симетрично від нього бічні, меншої інтенсивності. Практично око бачить так звану триїничкову картину, що складається з трьох зображень щілини: центрального, що відповідає нульовому дифракційному максимуму і двох бічних, що відповідають першим максимумам дифракційної картини.

Для підвищення точності, вузький пучок променів виділяють двома прямокутними отворами. Застосування парних отворів призводить до утворення всередині кожного максимуму ще декількох дуже чітких максимумів, що в значній мірі полегшує наведення і підвищує точність вимірювань.

Вимірювання поперечної сферичної аберації проводять, пересуваючи парну прямокутну діафрагму перпендикулярно оптичній вісі випробовуваної системи і через мікроскоп спостерігають за зображенням щілини коліматора. За наявності аберації зображення щілини зміщуватиметься в напрямі, перпендикулярному до вісі установки. Цей зсув вимірюють окуляр-мікрометром.

На графіку поперечної сферичної аберації по вісі абсцис відкладають величину зсуву зображення щілини $\Delta y'$, а по вісі ординат – відносні величини розташування зони падіння променів на випробовувану систему $-\frac{h}{D}$, що дозволяє порівняти графік аберацій оптичних систем, що відрізняються один від одного розмірами вхідних зіниць (рис. 3.50).

Вид графіка залежить від площини, в якій виконуються вимірювання. У гаусовій площині зображення щілини не буде зміщуватись відносно перехрестя окуляр-мікрометра, інакше спостерігається зсув зображення щілини.

Для поєднання площини предметів мікроскопа з гаусовою площиною контрольованої системи, мікроскоп переміщують вздовж його вісі.

Остаточну перевірку правильності фокусування мікроскопа на гаусову площину здійснюють по вигляду графіка поперечної сферичної аберації [17]. Якщо дотична до графіка сферичної аберації в його центральній частині співпадає з віссю ординат, то вимірювання були проведені в гаусовій площині. При вимірюванні аберації в не

гаусовій площині проводять дотичну до графіка аберації в центральній його частині і аберації відраховують відносно цієї дотичної. Зсув площини вимірювання характеризується нахилом кривої аберації.

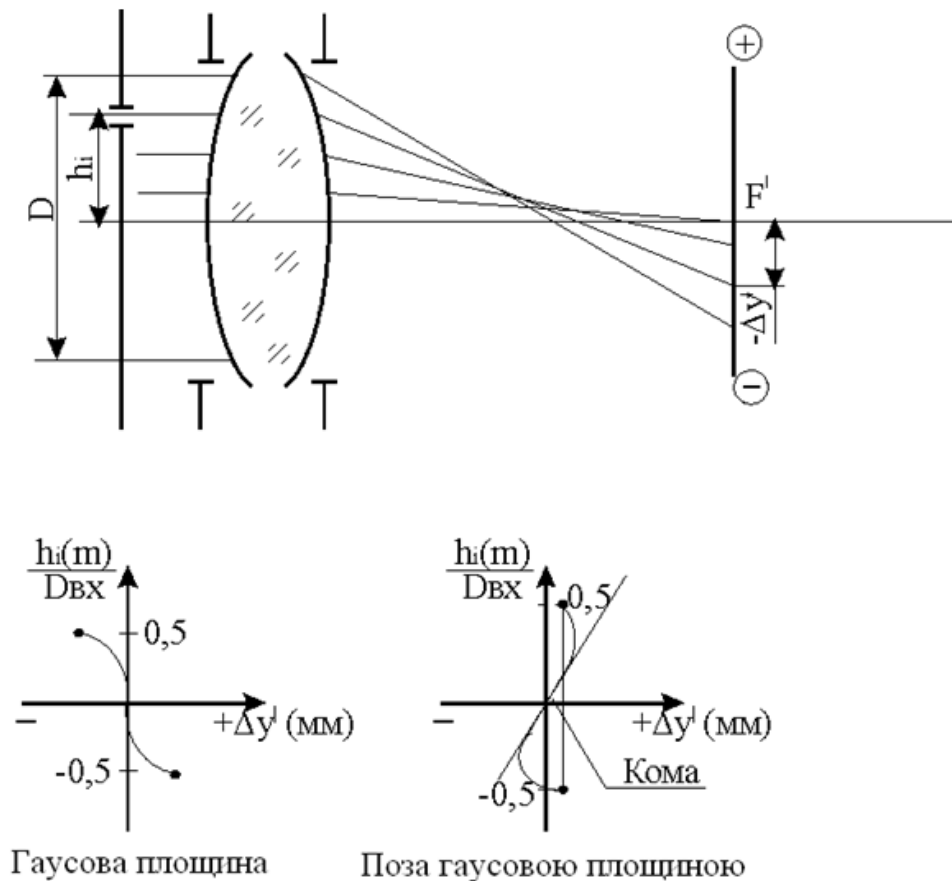


Рис. 3.50 Поперечна сферична аберація

Для визначення коми сполучають крайні точки кривої поперечної аберації прямою лінією; відстань К, що відсікається цією прямою на вісі абсцис, характеризує кому.

Для знаходження поперечної сферичної аберації для точки поза віссю зберігають ту ж схему, проте використовують систему повертають на лаві на кути, що цікавлять дослідника.

Поздовжню сферичну аберацію вимірюють як різницю поздовжніх перефокусувань мікроскопа на зображенні щілинної діафрагми, але при цьому відкривають відразу по два симетричних відносно вісі парних

отвори. Аберация вимірюється як різниця перефокусувань мікроскопа при вимірюванні висоти входу променів у випробовувану систему ($\frac{h}{D}$) (рис. 3.51).

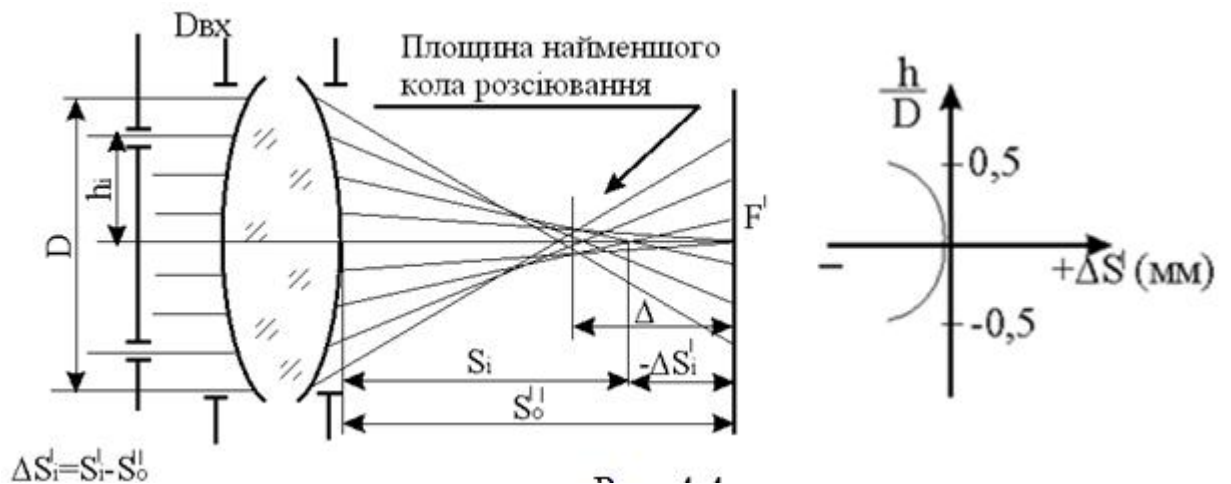


Рис. 3.51 Повздовжня сферична аберация

Оскільки при переході до осьових зон, різко зростає глибина фокусування (кути між променями, що перетинаються, стають малими) і наведення мікроскопа виходить невизначеним, то точки графіка, що відповідають малим зонам, знаходяться екстраполяванням.

Вимірювання поперечної і поздовжньої сферичних абераций виконуються в більшості для $\lambda = 589,3$ нм (лінія D) шляхом використання інтерференційного світлофільтру.

Вимірювання хроматичної аберации виконують так само, як поздовжньої сферичної, але при цьому відкривають тільки одну зону ($m=0,7\gamma$) і в процесі вимірювань змінюють світлофільтри. Прийнято проводити вимірювання для ліній C, D, E, F (рис. 3.52).

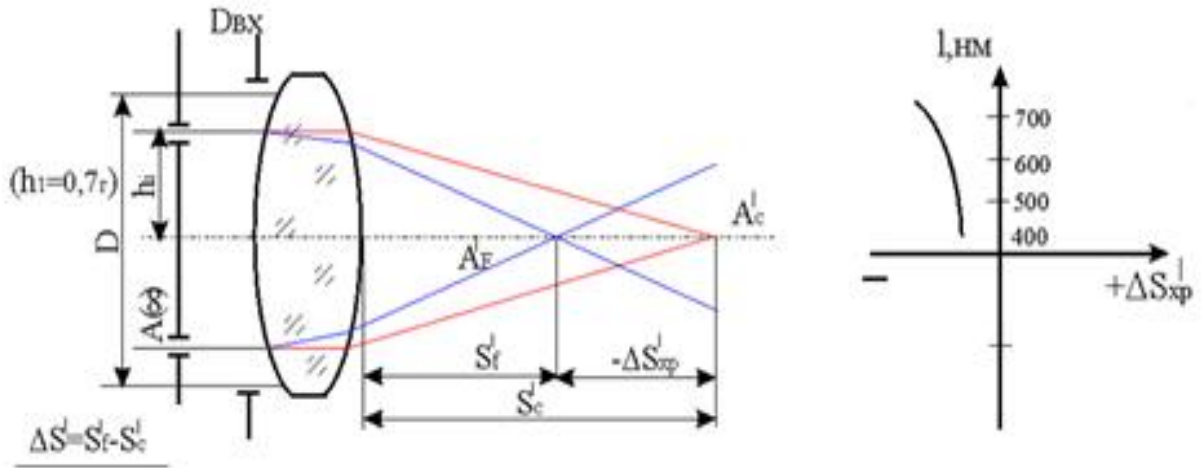


Рис. 3.52 Хроматична аберация

За результатами вимірювань будують графік: по вісі абсцис відкладають зсуви мікроскопа, а по осі ординат – довжини хвиль.

3.5 Контрольні запитання та завдання

1. Від чого залежить контраст інтерференційної картини?
2. За яких умов в інтерферометрі Майкельсона спостерігаються смуги рівного нахилу та смуги рівної товщини? Які зміни в оптичній схемі при цьому відбуваються?
3. Назвіть відомі вам інтерферометри. Які інформаційні параметри інтерференційної картини в них використовуються?
4. Обґрунтуйте переваги багатопроменевої інтерферометрії порівняно з двопроменевою.
5. Опишіть методику визначення хвильових аберацій.
6. Назвіть стандартні довжини хвиль, що застосовуються у рефрактометрії.
7. Опишіть суть методу найменшого відхилення та авто колімаційного методу. За допомогою якого приладу він реалізується?
8. Назвіть рефрактометри, що використовуються для вимірювання показника заломлення рідини. Опишіть принцип дії одного з них.
9. Яке явище лежить в основі визначення концентрації розчинів? Які прилади для цього використовуються?
10. Опишіть принцип кількісного та якісного визначення внутрішніх напруг прозорих об'єктів за допомогою полярископа-поляриметра.
11. Обґрунтуйте особливості коноскопичного та отоскопичного методів спостереження в поляризаційному мікроскопі.
12. Опишіть суть методу Лінника.

Література

1. Оптические измерения: учеб. пособие / А. Н. Андреев, Е. В. Гаврилов, Г. Г. Ишанин, В. К. Кирилловский, В. Т. Прокопенко, К. А. Томский, А. Б. Шерешев. – М.: Университетская книга; Логос, 2012. – 416с.
2. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Часть 1. Введение и общие вопросы. Точность оптических измерений: учеб. пособие / В. К. Кирилловский. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2003. – 47 с.
3. Основы метрологии, стандартизации и сертификации: учеб. пособие / М. Я. Марусина, В. Л. Ткалич, Е. А. Воронцов, Н. Д. Скалецкая. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009 – 164 с.
4. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений: справ. пособие / К.Г. Рего. – К.:Техніка, 1987. – 128с.
5. Ткалич В. Л. Обработка результатов технических измерений: учебное пособие / В. Л. Ткалич, Р. Я. Лабковская. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2011. – 72 с.
6. Афанасьев В.А. Оптические измерения / В.А.Афанасьев.– [3-еизд.]. – М.: Высшая школа, 1981. – 229с.
7. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З.Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192с.
8. Агемян Т.А. Основы теории ошибок / Т.А.Агемян.– [2-еизд.]. – М.: Наука, 1972. – 172с.
9. Кирилловский В. К. Оптические измерения: учебное пособие по лабораторному практикуму / В. К. Кирилловский, Т. В. Точилина. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009 – 117 с.

10. Око людини та офтальмологічні прилади: навч. посібник / В. М. Сокурєнко, Г. С. Тимчик, І. Г. Чиж. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 264 с.
11. Лабораторные оптические приборы / Г. И. Федотов [и др.]; под ред. Л. А. Новицкого. – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с.
12. Оптико-механические приборы: учебник для техникумов / С. В. Кулагин, А. С. Гоменюк, В. Н. Дикарев, В. Е. Зубарев, Е. Н. Лебедев, Г. М. Мосягин. – [2-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 352.
13. Оптические приборы в машиностроении. Справочник / М. И. Апенко, И. П. Араев, В. А. Афанасьев, Г. В. Дурейко, Н. П. Заказнов, Д. А. Романов, В. С. Усов. – М.: Машиностроение, 1974. – 238 с.
14. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Часть 3. Функциональная схема прибора оптических измерений. Типовые узлы. Оптические измерения геометрических параметров: учеб. пособие / В. К. Кирилловский. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – 67 с.
15. Оптические измерения: учебник для вузов по специальностям оптико-электронные приборы и технология оптического приборостроения / Г. В. Креопалова, Н. Л. Лазарева, Д. Т. Пуряев. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
16. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст. [и др.]; под ред. Ю. Г. Якушеникова. – М.: Машиностроение, 1987. – 480 с.
17. Кривовяз Л. М. Практика оптической измерительной лаборатории / Л. М. Кривовяз, Д. Т. Пуряев, М. А. Знаменская. – М.: Машиностроение, 1974. – 332 с.
18. Фукс-Рабинович Л. И. Оптико-электронные приборы: учеб. пособие для оптико-механических и приборостроительных техникумов / Л. И. Фукс-Рабинович, М. В. Епифанов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 362 с.

19. Фотоэлектрические преобразователи информации. Л.Н.Преснухин, В.Ф.Шаньгин, С.А.Майоров, И. В. Меськин. – М.: Машиностроение, 1974. – 375 с.
20. Капичин И.И. Оптико-электронные углоизмерительные системы / И. И. Капичин. – К.: Техніка, 1986. – 144 с.
21. Муаровые растровые датчики положения и их применение / Л.Н.Преснухин, В.Ф.Шаньгин, Ю. А. Шаталов. – М.: Машиностроение, 1969. – 203 с.
22. Бернштейн А.С. Фотоэлектрические измерительные микроскопы / А.С.Бернштейн, Ш.Р.Джохадзе, Н.И.Перова. – М.: Машиностроение, 1976. – 128 с.
23. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение / Ю.В.Коломийцов – Л.: Машиностроение, 1976. – 296 с.
24. Скоков И.В. Оптические интерферометры / И. В. Скоков. – М.: Машиностроение, 1979. – 128 с.
25. Оптические измерения / А. М. Борбат, И. С. Горбань, Б. А. Охрименко, П. А. Суббота-Мельник, И. А. Шайкевич, А. А. Шишловский. – К.: Техніка, 1967. – 421 с.
26. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии / Б.В.Иоффе. – [3-е изд.]. – Л.: Химия. 1983. – 352 с.
27. Оптико-электронные приборы для научных исследований: учеб. Пособие / Л.А.Новицкий, А. С. Гоменюк, В. Е. Зубарев, А. М. Хорохоров. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
28. Отражательная рефрактометрия / М.В.Лейкин, Б.И.Молочников, В. Н.Морозов, Э. С. Шакарян. – Л.: Машиностроение, 1983. – 223 с.
29. Жевандров Н.Д. Поляризация света / Н. Д. Жевандров. – М.: Наука, 1969. – 192 с.

Додаток

Розподіл Стьюдента

$n-1 \backslash \beta$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
1	0.158	0.325	0.510	0.727	1	1.376	1.963
2	142	289	445	617	0.816	1.061	1.336
3	137	277	424	584	765	0.978	1.250
4	134	271	414	569	741	941	1.190
5	132	267	408	559	727	920	1.156
6	131	265	404	553	718	906	1.134
7	130	263	402	549	711	896	1.119
8	130	262	399	546	706	889	1.108
9	129	261	398	543	703	883	1.100
10	129	260	397	542	700	879	1.093
11	129	260	396	540	697	876	1.088
12	128	259	395	539	695	873	1.083
13	128	259	394	538	694	870	1.079
14	128	258	393	537	692	868	1.076
15	128	258	393	536	691	866	1.074
16	128	258	392	535	690	865	1.071
17	128	257	392	534	689	863	1.069
18	127	257	392	534	688	862	1.067
19	127	257	391	533	688	861	1.066
20	127	257	391	533	687	860	1.064
21	127	257	391	532	686	859	1.063
22	127	256	390	532	686	858	1.061
23	127	256	390	532	685	858	1.060
24	127	256	390	531	685	857	1.059
25	127	256	390	531	684	856	1.058
26	127	256	390	531	684	856	1.058
27	127	256	389	531	684	855	1.057
28	127	256	389	530	683	855	1.056
29	127	256	389	530	683	854	1.055
30	127	256	389	530	683	854	1.055
40	126	255	388	529	681	851	1.050
60	126	254	387	527	679	848	1.046
120	126	254	386	526	677	845	1.041
∞	0.126	0.253	0.385	0.524	0.674	0.842	1.036
$n-1 \backslash \beta$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

Розподіл Стьюдента
(продовження)

0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999	β / $n-1$
3.08	6.31	12.17	31.8	63.7	636.6	1
1.886	2.92	4.30	6.96	9.92	31.6	2
1.638	2.35	3.18	4.54	5.84	12.94	3
1.533	2.13	2.77	3.75	4.60	8.61	4
1.476	2.02	2.57	3.36	4.03	6.86	5
1.440	1.943	2.45	3.14	3.71	5.96	6
1.415	1.895	2.36	3.00	3.50	5.40	7
1.697	1.860	2.31	2.90	3.36	5.04	8
1.383	1.833	2.26	2.82	3.25	4.78	9
1.372	1.812	2.23	2.76	3.17	4.59	10
1.363	1.796	2.20	2.72	3.11	4.49	11
1.356	1.782	2.18	2.68	3.06	4.32	12
1.350	1.771	2.16	2.65	3.01	4.22	13
1.345	1.761	2.14	2.62	2.98	4.14	14
1.341	1.753	2.13	2.60	2.95	4.07	15
1.337	1.746	2.12	2.58	2.92	4.02	16
1.333	1.740	2.11	2.57	2.90	3.96	17
1.330	1.734	2.10	2.55	2.88	3.92	18
1.328	1.729	2.09	2.54	2.86	3.88	19
1.325	1.725	2.09	2.53	2.84	3.85	20
1.323	1.721	2.08	2.52	2.83	3.82	21
1.321	1.717	2.07	2.51	2.82	3.79	22
1.319	1.714	2.07	2.50	2.81	3.77	23
1.318	1.711	2.06	2.49	2.80	3.74	24
1.316	1.708	2.06	2.48	2.79	3.72	25
1.315	1.706	2.06	2.48	2.78	3.71	26
1.314	1.703	2.05	2.47	2.77	3.69	27
1.313	1.701	2.05	2.47	2.76	3.67	28
1.311	1.699	2.04	2.46	2.76	3.66	29
1.310	1.697	2.04	2.46	2.75	3.65	30
1.303	1.684	2.02	2.42	2.70	3.55	40
1.296	1.671	2.00	2.39	2.66	3.46	60
1.289	1.658	1.980	2.36	2.62	3.37	120
1.282	1.645	1.960	2.33	2.58	3.29	∞
0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999	β / $n-1$