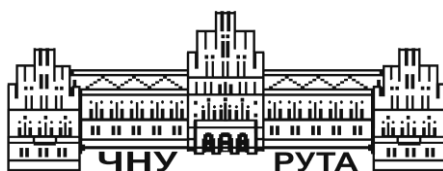


**Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича**

Підлягає поверненню на кафедру

**МЕТРОЛОГІЯ,
СТАНДАРТИЗАЦІЯ
ТА СЕРТИФІКАЦІЯ**

***Методичні рекомендації
до практикуму***



Чернівці
Чернівецький національний
університет
2022

ББК 30.10я7
М 546
УДК 006(076.5)

М546 **Метрологія, стандартизація та сертифікація:** Методичні рекомендації до о практикуму / укл.: Солтис І.В., Лазурка І. І. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2022. – 86 с.

У даній методичній розробці наведено роботи до практикуму для курсів «Основи метрології та інформаційно-виміральної техніки», «Метрологія, стандартизація та сертифікація». Призначений для студентів вищих закладів освіти за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка, 186 Видавництво та поліграфія.

ББК 30.10я7
УДК 006(076.5)

© Чернівецький національний
університет, 2022

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

ПЕРЕВІРКА СПЕКТРОФОТОМЕТРА СФ-10

1. Мета роботи

Засвоїти методи та одержати навички перевірки спектрофотометрів.

2. Завдання до роботи

- 2.1. Вивчити та засвоїти призначення, основні технічні дані, принцип роботи та будову спектрофотометра СФ-10.
- 2.2. Засвоїти правила експлуатації та порядок підготовки приладу до роботи.
- 2.3. Отримати навички роботи на спектрофотометрі.
- 2.4. Провести перевірку спектрофотометра СФ-10.

3. Обладнання та матеріали

Спектрофотометр СФ-10; набір інтерференційний світлофільтрів, фотометр КФК – 3.

4. Опис та інструкція з експлуатації спектрофотометра СФ-10**4.1. Призначення**

Реєструючий спектрофотометр СФ-10 призначений для вимірювання коефіцієнтів пропускання, оптичної густини прозорих і мутних середовищ та коефіцієнтів дифузного відбивання твердих та порошкоподібних речовин у видимій області спектра.

Робочі умови експлуатації спектрофотометра: напруга мережі живлення (220 ± 22) В з частотою $(50 \pm 0,5)$ Гц і вмістом гармонік 5 % у будь-якому закритому приміщенні при: температурі оточуючого повітря від 5 до 40 °С (від 278 до 313 К); відносній вологості повітря до 90 % при температурі 30 °С (303 К).

Нормальні умови експлуатації спектрофотометра: температура оточуючого повітря $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($293\text{K} \pm 5 \text{ K}$); від-носна вологість повітря (65 ± 15) %; напруга живлення мережі $(220 \pm 4,5)$ В.

4.2. Основні технічні дані

Робочий діапазон приладу 400 – 750 нм

Монохроматор – призмовий, подвійний.

Відносний отвір 1:7

Дисперсія:

при довжині хвилі 400 нм 1,6 нм/мм,

- // - - // - 500 нм 4,0 нм/мм,

- // - - // - 600 нм 7,8 нм/мм,

- // - - // - 750 нм 16,5 нм/мм.

Тривалість запису одного спектра від 3,5 до 1,5 хв.

Межі вимірювання:

коефіцієнтів пропускання та відбивання . . . 1 – 100 %,

оптичної густини 0 – 2,5.

Межі допустимої *основної* та *додаткової похибок* при вимірюванні:
 коефіцієнтів пропускання та відбивання . . $\pm 0,3$ та $0,6\%$,
 оптичної густини $\pm 0,0075$ та $0,015$,
 при встановлені довжини хвилі $\pm 0,5$ та 1 нм

Джерело світла – кінопроекційна лампа К30.

Фотоприймач – мультилужний фотоелемент Ф-10.

Споживаюча потужність 250 Вт.

Напруга живлення 220 В.

Габаритні розміри приладу 1150 X 960 X 380 мм.

Вага 300 кг.

4.3. Принцип дії

Спектрофотометр складається із освітлювача, подвійного призмового монохроматора, фотометра поляризаційного типу, приймально-підсилювальної частини та записуючого механізму (рис. 1.1).

Принцип роботи приладу базується на *нульовому методі* та полягає в наступному. Монохроматичний пучок випромінювання ділиться призмою Рошона на два плоскополяризованих пучки. Один пучок проходить через призму Волластона і знову ділиться на два пучки, які поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах, другий пучок екранується. Оскільки на призму Волластона падає плоскополяризований пучок світла, інтенсивність пучків світла

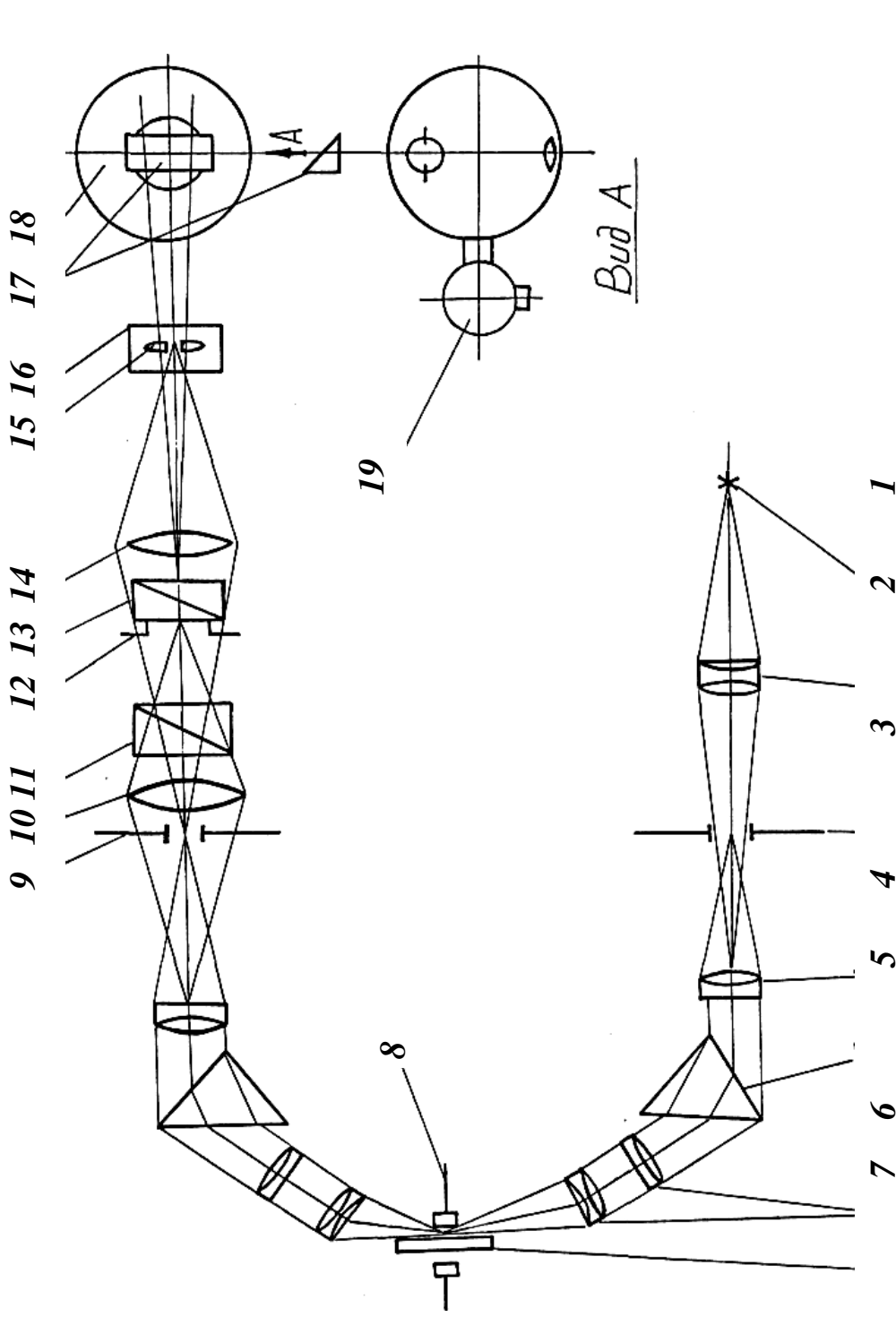


Рис. 1.1. Оптична схема спектрофотометра СФ-10:

1 – джерело світла; 2 – конденсор; 3 – вхідна щілина; 4 – об'єктив вхідного коліматора; 5 – диспергуюча призма; 6 – об'єктив труби; 7 – плоске дзеркало; 8 – ніж; 9 – вихідна щілина; 10, 14 – лінзи; 11 – призма Рошона; 12 – діафрагма; 13 – призма Волластона; 15 – напівлінзи; 16 – барабан переривача; 17 – призма; 18 – фотометрична сфера; 19 – фотоелемент.

за призмою Волластона визначається кутовим положенням відносно неї призми Рошона. Далі пучки перекриваються барабаном модулятора таким чином, що світловий потік у кожному пучку змінюється за формою трапеції, причому початку відкриття одного пучка відповідає початок закриття іншого. Швидкість обертання барабана модулятора та його конструкція вибрані таким чином, що світловий потік змінюється з частотою 50 Гц.

Світло, відбите від зразка і еталона, після багаторазових відбивань від стінок сфери освітлює фотоеlement, розташований за вікном сфери, яке закрито молочним склом.

Освітленість фотоеlementa в кожний момент часу визначається сумою миттєвих потоків, відбитих від зразка і еталона. Якщо світлові потоки, відбиті зразком і еталонем, однакові, освітленість фотоеlementa буде постійною в будь-який момент часу і змінний сигнал на вході підсилювальної системи буде відсутній. При наявності поглинання зразком сумарний світловий потік на фотоеlementі буде змінюватись з частотою 50 Гц і на вході підсилювача з'явиться сигнал такої ж частоти. Напруга сигналу підсилюється і подається на обмотку якоря електродвигуна відпрацювання, який з допомогою фотометричного кулачка повертає призму Рошона доти, доки не зникне різниця світлових потоків, тобто доки не зникне сигнал на вході підсилювача (реалізація нульового методу). Одночасно з поворотом призми відбувається переміщення пера, яке фіксує на паперовій стрічці графіки пропускання, відбивання або оптичної густини зразка.

Зміна довжини хвилі світла, що виходить із монохроматора, здійснюється шляхом переміщення вздовж спектра середньої щілини приладу. Переміщення щілини здійснюється від електродвигуна одночасно з поворотом барабана записуючого механізму. Таким чином, на бланку, який закріплений на барабані записуючого механізму, записується крива спектрального пропускання, відбивання або оптичної густини.

4.4. Оптична схема

Оптична схема приладу складається з двох частин – спектральної (подвійного монохроматора) та фотометричної.

Схема спектральної частини приладу (подвійного монохроматора). Нитка лампи **1** (рис. 1.1) зображається конденсором **2** через вхідну щілину **3** у площині об'єктива **4** коліматора. Вхідна щілина розташована у фокальній площині об'єктива. Паралельний пучок світла, що виходить з нього, проходить диспергуючу призму **5** і розкладається в спектр. Об'єктив **6** труби першого монохроматора дає спектральне зображення вхідної щілини у площині середньої щілини. Середня щілина подвійного монохроматора, яка утворена дзеркалом **7** і ножем **8**, вирізає ділянку спектра, який проходить у другий монохроматор і проектується у площину вихідної щілини **9**.

Подвійна монохроматизація застосована з метою усунення впливу розсіяного випромінювання. На дефектах оптичних деталей спектрофотометра (виколках, подряпинах, бульбашках, пилинках і ін.) відбувається розсіяння випромінювання, тому на виході першого монохроматора у площині середньої щілини будемо спостерігати спектр на

фоні білого розсіяного випромінювання. Другий монохроматор знову розкладе це біле світло у спектр і на його виході (щілина 9) ми отримаємо «чисту» монохроматичну хвилю.

Схема фотометричної частини. При виході з монохроматора пучок світла попадає в фотометричну частину приладу. Спочатку пучок проходить через лінзу 10 і двоякозаломлюючу призму Рошона 11. Лінза 10 дає зображення об'єктива вихідного коліматора поблизу діафрагми 12, **призма Рошона 11** поділяє це зображення на два пучки, які лінійно поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах: один, що не змінює свого напрямку поширення, проходить через призму Волластона 13 і лінзу 14, другий, зміщений, екранується діафрагмою 12. Лінза 14 дає зображення вихідної щілини у площині напівлінз 15. **Призма Волластона** внаслідок своєї конструкції та подвійного променезаломлення поділяє пучок випромінювання, що пройшов через діафрагму 12, на два симетрично відхилені від осі приладу пучки. Вони лінійно поляризовані у взаємноперпендикулярних площинах і їх інтенсивність залежить від кута повороту площини поляризації випромінювання, що пройшло через призму Рошона, відносно призми Волластона (тобто від кута повороту призми Рошона навколо осі приладу). Ці пучки у площині напівлінз створюють два зображення вихідної щілини. Пройшовши напівлінзи 15, які встановлені всередині барабана переривача 16, обидва пучки відхиляються на 90° призмою 17, проходять через вхідні вікна сфери 18 і попадають на вікна, до яких притискаються зразок і еталон. Випромінювання, відбите від зразка і еталона, сумується сферою і падає на фотоеlement 19, який розташований за вихідним вікном сфери.

4.5. Кінематична схема

Кінематична схема приладу забезпечує автоматичне і ручне керування розгорткою спектра та розкриттям щілин приладу, керує записуючим механізмом і дає можливість переходити від запису коефіцієнта відбивання або пропускання до запису оптичної густини.

Кінематична схема наведена на рис. 1.2. Електродвигун 20 через циліндричні шестерні 21, 22 приводить в рух черв'як 23 і черв'ячну шестерню 24 кулачкового механізму довжин хвиль, а через циліндричні шестерні 25, 26 – черв'як 27 і черв'ячну шестерню 28 записуючого механізму. На одному валу з черв'ячною шестернею 24 закріплені кулачки 29 і 30. Кулачок 29 за допомогою штока 31 пересуває середню щілину приладу. Кулачок 30 за допомогою штока 32 і кареток 33 з клинами керує розкриттям вхідної та вихідної щілин приладу. Від черв'яка 27 і черв'ячної шестерні 28 обертання передається барабану 34 записуючого механізму, на якому закріплюється папір для запису кривої спектрального відбивання, пропускання або оптичної густини. До черв'ячної шестерні 28 кріпиться шкала довжин хвиль 35.

Ручне керування механізмом довжин хвиль здійснюється за допомогою ручки 36. При обертанні ручки обертається шків 37, який з'єднаний гнучким валиком зі шківом 38, на одній осі з яким закріплена циліндрична шестерня 22. Далі обертання через черв'як 23 і черв'ячну шестерню 24, циліндричні

шестерні 25, 26, черв'як 27 і черв'ячну шестерню 28 передається механізму довжин хвиль, а також барабану записуючого механізму.

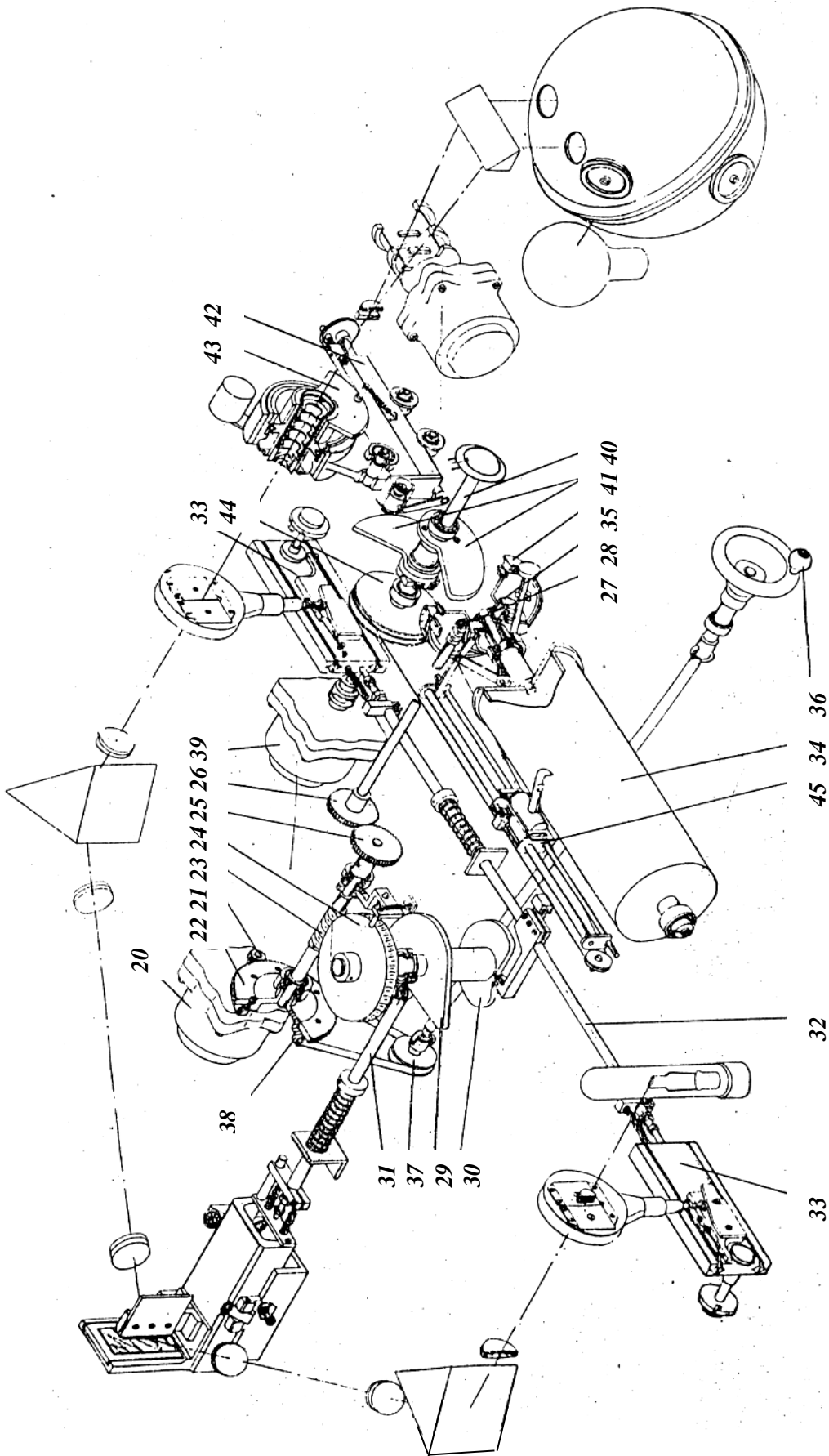


Рис. 1.2. Кінематична схема спектрофотометра СФ-10

Кінематична схема реєструючої частини приладу. Реверсивний електродвигун 39 приводить до обертання вал 40 з фотометричними кулачками 41. За допомогою штока 42 і сектора 43 фотометричний кулачок повертає призму Рошона. На одному валу з фотометричними кулачками закріплений шків 44, на якому закріплені кінці капронового тросика, жорстко зв'язаного з кареткою 45 пера записуючого механізму.

4.6. Конструкція

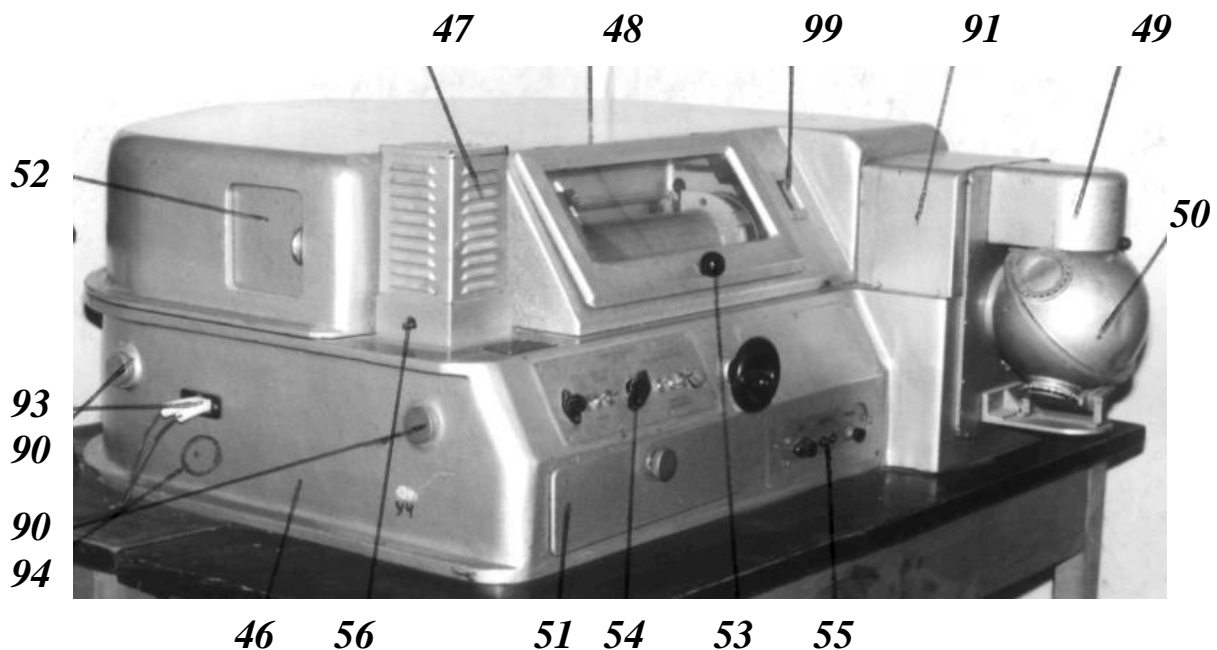
Загальний вигляд приладу зображений на рис.1.3. На основі 46 розташовані: освітлювач, який закривається кожухом 47, монохроматор який закривається кожухом 48, кюветна камера 49 та інтегруюча сфера 50. В середині осно-ви 46 знаходяться приймально-підсилювальний пристрій і ящик 51 для зберігання запасних частин і приладдя.

На бічних стінах кожуха 48 є два вікна, що закриваються шторками: **вікно 52** служить для спостереження за положенням зображення нитки лампи на об'єктиві коліматора і забезпечує доступ до барабанчика встановлення ширини вхідної щілини; **вікно, яке розташоване з протилежного боку кожуха**, забезпечує доступ до барабанчика встановлення ширини вихідної щілини і до гвинта точного повороту призми Рошона. В передній частині кожуха є відкидна кришка 53, яка закриває записуючий механізм.

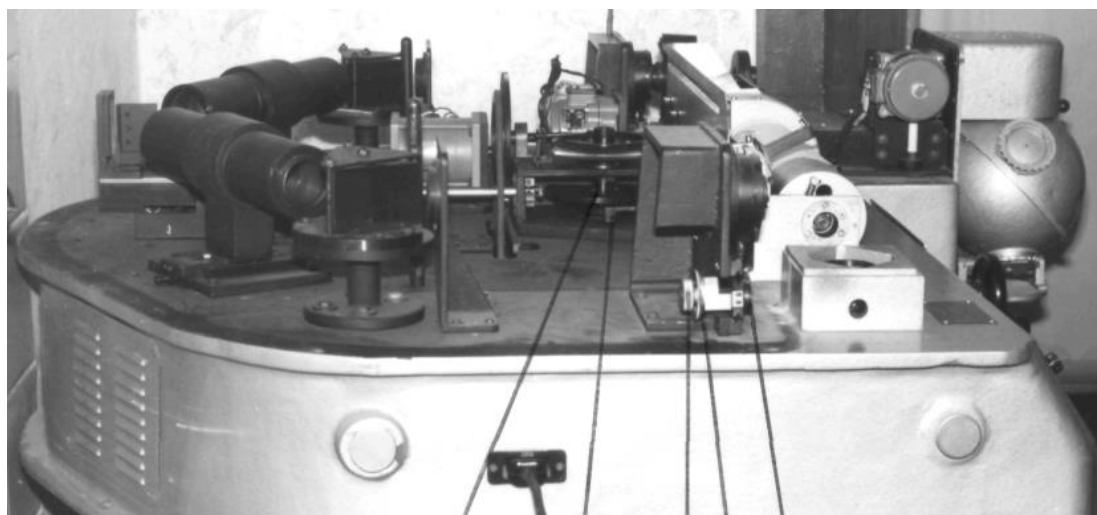
На лицьовій стороні основи 46 розташовані пульт 54 керування приладом і щиток 55 з клемми "контроль" та рукою регулювання підсилення.

Як джерело випромінювання в спектрофотометрі використовується кінопроекційна лампа К30. Для юстування лампи служать ручки 56.

Вхідна щілина монохроматора змонтована на кронштейні 57 (рис. 1.4), вихідна щілина – на кронштейні 58. Вхідна і вихідна щілини – криві, це забезпечує компенсацію викривлення зображення, що створюється призми. Розкриття щілин приладу здійснюється автоматично від кулачка 30, який забезпечує постійність енергії за спектром. Першопочаткове



58



29 Рис. 30. 60 59 57

розкриття вхідної щілини здійснюється барабанчиком 59 при відпущеному гвинті 60, розкриття вихідної щілини – барабанчиком 61 (рис. 1.5) при відпущеному гвинті 62.

Розгортка спектра здійснюється переміщенням середньої щілини від кулачка 29 (рис. 1.4), який забезпечує рівномірність шкали довжин хвиль. Розгортка спектра відбувається або від електродвигуна вмиканням відповідного вимикача на пульті керування, або від руки за допомогою ручки 36 (рис. 1.6).

Обертання вала кулачкового механізму електродвигуном відбувається тільки в одному напрямку – в бік збільшення довжин хвиль, обертання його від руки можливе в обидва боки, але тільки в межах шкали довжин хвиль. Відлік довжин хвиль береться за шкалою 63.

Записуючий пристрій складається з барабана 34 і каретки 45, яка ковзає по циліндричним напрямним 64 і 65. Оправа 66 з пером одягається на каретку 45, яка жорстко зв'язана з капроновим тросиком. На барабані з допомогою притискача 67 закріплюється бланк 68 для запису. Бланк являє собою сітку, по одній осі якої розташована шкала довжин хвиль від 400 до 750 нм, по другій – зліва шкала пропускання від 0 до 100%, справа – шкала оптичної густини від 0 до 2,5. Кнопка 69 служить для підняття пера при встановленні бланка.

Призма Рошона змонтована на кронштейні 70 (рис. 1.5). Рух від фотометричних кулачків на призму передається через шток 42 і радіусний сектор, які зв'язані між собою плоскою пружиною. Притискання штока до фотометричного кулачка здійснюється за допомогою противаги 71.

Перехід від фотометричного кулачка пропускання до кулачка оптичної густини і назад здійснюється за допомогою ручки 72. Для цього необхідно потягнути на себе шток 42 за ручку 72 і повернути її в потрібний бік. При встановленні в робоче положення кулачка пропускання проти гвинта 73 встане літера “Т”, а при встановленні в робоче положення кулачка оптичної густини – літера “Д”. Гвинт 73 служить для точного повороту призми Рошона при встановленні пера на лінію стовідсоткового пропускання і на лінію нульової густини.

Призма Волластона закріплена нерухомо на кронштейні 74.

75 76

42 70 100

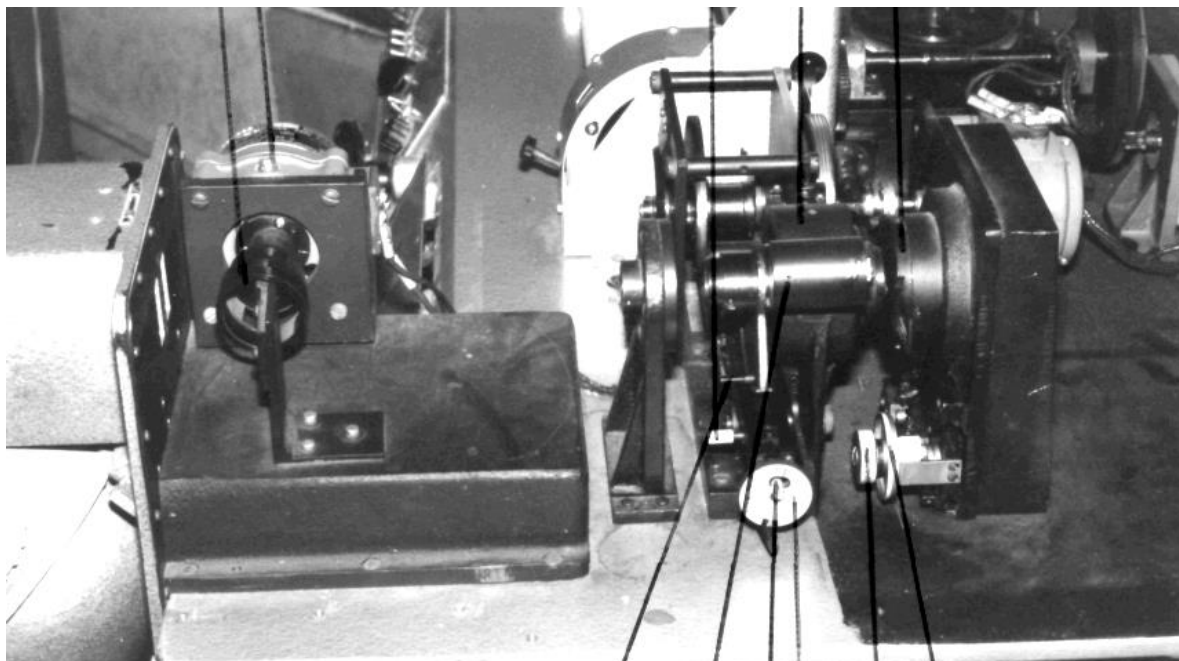


Рис.1.5.

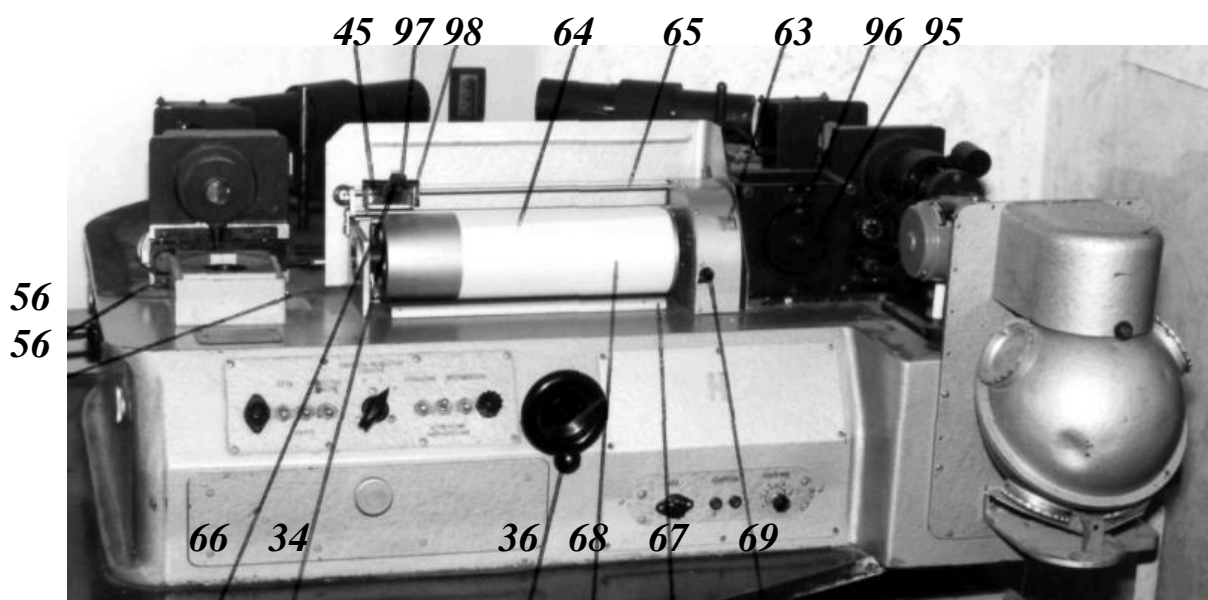


Рис. 1.6.

Переривач (модулятор) випромінювання 75 закріплений на осі електродвигуна 76.

На пульті 54 (рис. 1.6) керування приладом розташовані вимикачі: “мережа”, “лампа”, “розгортка спектра”, “відпрацювання”, “зміна напрямку”, “переривач”, а також перемикач “швидкість розгортки спектра”.

На плато 77 (рис. 1.7) змонтовані кюветна камера 49 для встановлення зразків, які вимірюються на пропускання, та інтегруюча сфера 50.

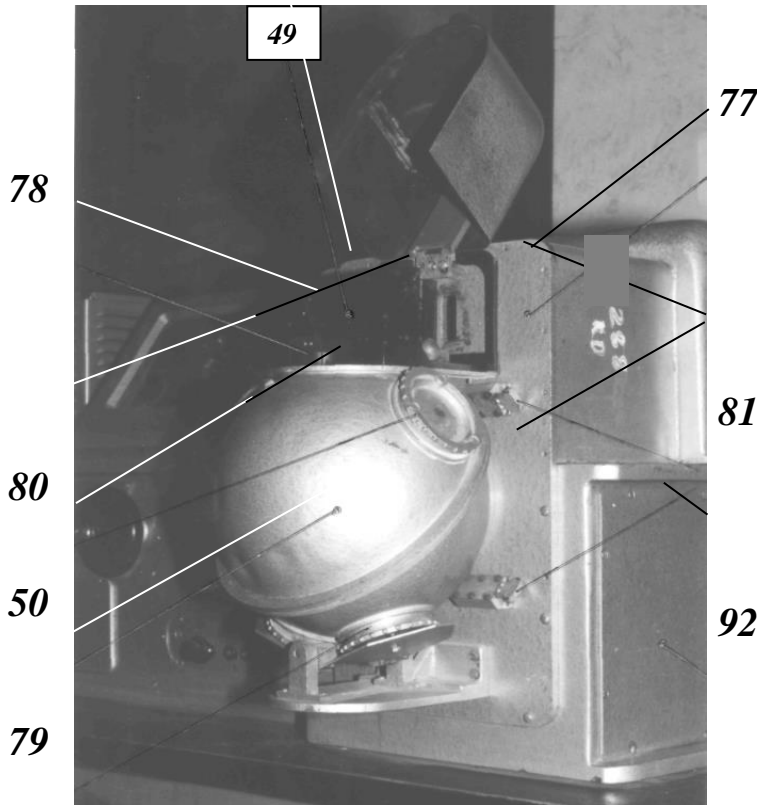


Рис. 1.7.

Для вимірювання пропускання рідин існує набір парних кювет з робочою товщиною 5, 10, 20 і 50 мм.

Тверді прозорі зразки і кювети з рідиною вкладаються в спеціальний утримувач, який виконаний у вигляді притискачів, що стягуються гвинтом. Утримувач вставляється в напрямку кюветного відділення. Для мутних середовищ і прозорих порошків існує кругла кювета, яка вставляється в утримувач із лапками, який у свою чергу вкладається у вхідні вікна 78. Товщини прошарків порошкоподібних речовин, які досліджуються на пропускання, можуть

бути визначені за допомогою калібру.

Для вимірювання порошків на відбивання служить кювета 79, яка встановлюється на місце еталона. Для виключення дзеркальної складової відбивання існують кишені 80, які можна встановити в бічні отвори сфери. Всередині сфери є два екрани, які призначені для запобігання попадання випромінювання від зразків безпосередньо на фотоелемент при вимірюванні абсолютних коефіцієнтів відбивання (за методом Тейлора): верхній екран запобігає попаданню випромінювання, яке пройшло через зразок. Для вмикання екранів необхідно відтягнути ручки 81.

Вимірювання абсолютних коефіцієнтів відбивання полягає у наступному: спочатку записується лінія стовідсоткового пропускання при нейтральному положенні екранів відносно світлових пучків, при цьому ручки 81 утоплені у сферу. Потім замість еталона до вікна сфери в робочий пучок встановлюється зразок, який вимірюється на відбивання. Відтягнувши ручки 81 до упору, екрани встановлюють у положення, при якому пряме

світло від зразка не попадає на фотоелемент. Наступний запис дає значення абсолютного коефіцієнта відбивання зразка за спектром.

4.7. Порядок підготовки приладу до роботи

Встановіть перо з оправою в каретку записуючого пристрою і підніміть його, відтягнувши кнопку **69** (рис. 1.6).

Встановіть бланк на барабан записуючого механізму, для чого, обертаючи барабан від руки, встановіть його так, щоб притискач **67** знаходився приблизно на одній лінії зі шкалою довжин хвиль **64**; обрізати бланк з боку шкали довжин хвиль так, щоб лінія відрізу пройшла через обидві риски; підніміть притискач **67**, наверніть на барабан бланк так, щоб його обрізаний край впритул прилягав до правого бортика барабана, і відпустіть притискач; встановіть за шкалою довжин хвиль відлік 400 нм; опустіть перо і знову обертанням барабана точно сумістіть вістря пера з лінією бланка, яка відповідає 400 нм.

Вимкніть вимикачі на щитку керування.

Ввімкніть прилад вимикачем “**мережа**”, при цьому повинна загорітися сигнальна лампа на щитку керування.

Дайте приладу прогрітися 5 хв.

Ввімкніть вимикач “**лампа**”.

Від’юстуйте лампу розжарення за допомогою ручок **56**. Добийтеся такого положення лампи, при якому зображення її нитки розжарення заповнить об’єктив коліматора і буде різким (спостереження здійснюйте через бокове вікно в кожусі). Лампа попередньо повинна бути промита спиртом або ефіром.

Вимкнути вимикач “**лампа**”.

Ввімкнути вимикач “**переривач**”.

Ввімкніть обмотку збудження реверсивного електродвигуна вимикачем “**відпрацювання**”.

Поверніть ручку “**регулювання підсилення**” в крайнє праве положення (максимальне підсилення).

Ввімкніть вимикач “**лампа**”. Перо повинно переміщуватись у бік лінії стовідсоткового пропускання, якщо встановлений кулачок “**Т**”, або в бік лінії нульової густини, якщо встановлений кулачок “**Д**”. Перемкніть перемикач “**зміна напрямку**”, якщо перо переміщується в протилежний бік.

Встановіть за шкалою довжин хвиль 420 нм, при цьому повинні спостерігатися коливання пера. Обертайте ручку “**регулювання підсилення**” у бік зменшення підсилення доти, доки не зникнуть коливання пера. Для перевірки правильності встановлення підсилення пропонується: торкнутися пальцем верхньої клеми “**контроль**”, при цьому перо повинно відійти в бік, потім забрати палець – перо повинно повернутися в початкове положення з одним-двома коливаннями. Якщо спостерігається більше коливань, підсилення потрібно зменшити, якщо ж перо повільно підходить до початкового положення, підсилення слід збільшити. Перевірку необхідно проводити при незаземленому приладі.
Після перевірки прилад обов’язково заземлити!

4.8. Практичні зауваження

Прилад дозволяє проводити вимірювання коефіцієнтів пропускання або відбивання в межах від 1 до 100%. При вимірюванні зразка з пропусканням в деякому інтервалі довжин хвиль менше 1% перо може відхилитися за “0” шкали пропускання. Як тільки пропускання зразка стане більше 1%, перо автоматично вийде на шкалу бланка.

При переході від кулачка “Т” до кулачка “Д” необхідно перевірити встановлення нульової густини, а при переході від кулачка “Д” до кулачка “Т” перевірити встановлення стовідсоткового пропускання.

При встановленні будь-якої поділки шкали довжин хвиль (з метою усунення так званої «похибки мертвого ходу») необхідно обертати її лише в бік збільшення показів. Якщо при цьому шкала повернеться на більшу величину, треба відвести її назад і знову підвести на потрібну поділку. Так само необхідно встановлювати відлік шкали довжин хвиль на 400 нм при встановленні бланка.

Точність показів приладу значною мірою залежить від правильного встановлення бланка, а також від його лінійних розмірів. Необхідно обрізати бланк точно по рисках за допомогою металевої лінійки. Бланк при встановленні повинен щільно охоплювати барабан, а обрізаний край повинен бути біля правого бортика барабана по всій довжині, при цьому вістря пера повинно точно збігатися з лінією бланка, яка відповідає 400 нм.

Щоб уникнути поломки пера, слід тримати його в піднятому положенні до тити, доки прилад не буде повністю готовим до запису.

Після встановлення або зняття бланка затискач записуючого механізму необхідно відпустити. Якщо не опустити затискач, то це може призвести до поломки пера.

Для заміни пера необхідно: вставити нове перо в утримувач, а утримувач – у каретку записуючого механізму; точно відрізати бланк і встановити його на барабан записуючого механізму; ввімкнути прилад і, діючи гвинтом 73 (рис. 1.5), добитися збігу позначки “100” шкали 95 (рис. 1.6) з індексом 96, при цьому вістря пера повинно збігатися з лінією “100” на бланці. У випадку розбіжності вістря пера з лінією “100” бланку необхідно звільнити гвинт 97 і, діючи гвинтами 98 і 73 (рис. 1.5), добитись такого положення, при якому вістря пера буде збігтися з лінією “100” бланка, а позначка “100” шкали 95 (рис. 1.6) буде суміщена з індексом 96. Спостереження вести через вікно 99 (рис. 1.3). Регулювання гвинтом 98 (рис. 1.6) проводити з допомогою викрутки, при цьому каретку необхідно притримувати, щоб уникнути розтягування капронового троса.

При вимірюванні зразків, які мають вузькі смуги поглинання або поглинання яких різко змінюється зі зміною довжини хвилі, правильність показів залежить від швидкості розгортки спектра і ширини щілини: чим менша швидкість розгортки спектра і вужча щілина, тим більш достовірні покази приладу.

У випадку виникнення автоколивач під час запису треба зменшити підсилення.

Необхідно слідкувати, щоб шторка 100 (рис. 1.5) була вставлена до упора.

5. Порядок перевірки спектрофотометра СФ-10

Установіть вхідну і вихідну щілини в положення “1” або “2” згідно з вказівками на контрольному запису, який міститься в атестаті приладу.

Увімкніть у робоче положення кулачок “Т” поворотом ручки 72 (рис. 1.5).

Установіть бланк на барабані записуючого пристрою.

Установіть максимальну швидкість запису, поставивши перемикач **“швидкість розгортки спектра”** в положення “4”.

Увімкніть вимикач **“відпрацювання”**.

Увімкніть вимикач **“лампа”**, при цьому перо повинно переміщуватись у бік лінії стовідсоткового пропускання.

Установіть перо гвинтом 73 на лінію бланка, яка відповідає приблизно 90% пропусканню.

Опустіть перо, натиснувши кнопку 69 (рис. 1.6), увімкніть вимикач **“розгортка спектра”**, зробіть запис кривої стовідсоткового пропускання і вимкніть вимикач.

Установіть перо гвинтом 73 (рис. 1.5) в положення, при якому крива стовідсоткового пропускання мала би однакові відхилення (тобто випадкові похибки) по обидві сторони відносно лінії на бланку, яка відповідає 100% пропусканню.

Увімкніть вимикачі **“швидкість розгортки спектра”**, **“відпрацювання”**.

Закріпіть в утримувачі світлофільтр №1 і встановіть його на шляху правого (по ходу променів) пучка.

Вімкніть вимикач **“відпрацювання”**, а потім **“розгортка спектра”** і зробіть запис пропускання світлофільтра №1 при знаходженні перемикача **“швидкість розгортки спектра”** в положення “1”, після чого вимкніть вимикачі **“відпрацювання”** і **“розгортка спектра”**.

Встановіть у кюветне відділення утримувач зі світлофільтром №2 і запишіть криву спектрального пропускання, після чого вимкніть вимикачі **“відпрацювання”** і **“розгортка спектра”**.

Ручкою 72 встановіть у робоче положення кулачок “Д” і перемкніть перемикач **“зміна напрямку”**. Вімкніть вимикач **“відпрацювання”**.

Встановіть перо гвинтом 73 на лінію нульової густини бланка.

Встановіть у кюветне відділення світлофільтр №3 і, ввімкнувши прилад, запишіть криву оптичної густини світлофільтра, після чого вимкніть прилад.

Зніміть бланк з записуючого пристрою, піднявши притискач 67 (рис. 1.6), і порівняйте отриманий запис із контрольним записом, прикладеним до атестату приладу, або паспортними даними світлофільтрів. У разі відсутності контрольного запису і паспортних даних світлофільтрів проведіть їх атестацію на іншому спектрофотометрі, похибки якого менше похибок спектрофотометра СФ-10 більше ніж у три рази.

Порівняння запису пропускання світлофільтра №1 вести за вузькими смугами поглинання, зміщення кривої по довжинах хвиль повинно бути не більше $\pm 0,5$ нм (**перевірка градуювання спектрофотометра по довжинах хвиль**).

Крива пропускання світлофільтра №2 не повинна мати зміщень за відсоткам пропускання більше ніж на $\pm 0,3$ % (**перевірка спектрофотометра за коефіцієнтами пропускання та відбивання**).

Крива оптичної густини світлофільтра №3 не повинна мати зміщень за оптичною густиною більше ніж на $\pm 0,0075$ (**перевірка спектрофотометра за оптичною густиною**).

Вказані параметри перевірки стосуються випадку *нормальних умов експлуатації* спектрофотометра. При *робочих умовах експлуатації* відповідні відхилення не повинні перевищувати відповідних значень додаткових похибок (див. п. 2.4.2): за довжинами хвиль не більше ± 1 нм, за коефіцієнтами пропускання та відбивання не більше $\pm 0,6$ %, за оптичною густиною не більше $\pm 0,015$.

6. Порядок виконання роботи

6.1. Ознайомтесь із методичними вказівками до лабораторної роботи, вивчіть та засвойте призначення, принцип роботи, будову, порядок підготовки до роботи та порядок роботи на спектрофотометрі СФ-10.

6.2. Проведіть перевірку спектрофотометра для чого: запишіть спектри пропускання світлофільтрів №1 та №2 і криву оптичної густини світлофільтра №3; порівняйте одержані результати згідно з п.5 з контрольним записом, прикладеним до атестату приладу, або паспортними даними світлофільтрів, та зробіть відповідні висновки.

6.3. При відсутності контрольних записів, доданих до атестату приладу або паспортних даних світлофільтрів, запишіть спектри вище названих світлофільтрів на зразковому приладі (у нашому випадку на спектрофотометрі КФК-3), попередньо ознайомившись з інструкцією з експлуатації до цього приладу. Порівняйте отримані спектри пропускання з результатами вимірювань на СФ-10. Зробіть відповідні висновки.

6.4. Оформіть звіт по роботі.

7. Зміст звіту

7.1. Назва, мета та завдання до роботи.

7.2. Оптична схема приладу.

7.3. Принцип роботи спектрофотометра СФ-10.

7.4. Послідовність проведення перевірки з відповідними розрахунками при порівнянні експериментальних результатів з паспортними даними.

7.5. Висновки.

8. Контрольні запитання

8.1. Яке призначення СФ-10?

8.2. Що таке: коефіцієнт пропускання, відбивання; коефіцієнт дифузного відбивання та пропускання; оптична густина?

8.3. Охарактеризуйте оптичну схему та принцип роботи СФ-10.

8.4. Яка будова та властивості призм Рошона та Волластона?

8.5. Який метод та спосіб його реалізації Ви використали для перевірки СФ-10?

8.6. У чому полягала власне перевірка СФ-10, проведена Вами? Які її результати?

9. Список літератури

9.1. Солтис І.В. , Деревянчук О.В. Основи метрології / автори.: І.В Солтис, О.В. Деревянчук. - Чернівці: Чернівецький нац. ун-тет, 2021, 152 с.

9.2. Артемьев Б. Г. Справочное пособие для работников метрологических служб / Б. Г. Артемьев, М. С. Голубев. – М.: Изд. Стандартов, 1986. – 341 с.

9.3. Ландсберг Г. С. Оптика / Григорий Самуилович Ландсберг. – М.: Изд. “Наука”, 1976. – 928 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПЕРЕВІРКИ РЕФРАКТОМЕТРА ІРФ-454

1. Мета роботи

Засвоїти методи та одержати навички перевірки рефрактометрів.

2. Завдання до роботи

- 2.1. Вивчити та засвоїти призначення, основні технічні дані, принцип роботи та будову рефрактометра ІРФ-454.
- 2.2. Засвоїти правила експлуатації та порядок підготовки приладу до роботи.
- 2.3. Отримати навички роботи на рефрактометрі.
- 2.4. Провести перевірку рефрактометра ІРФ-454:
 - визначити показник заломлення дистильованої води;
 - порівняти отримані значення з табличними при температурі вимірювання;
 - оцінити похибку у визначенні показника заломлення і зробити висновки щодо придатності прилада для роботи на ньому;
 - розрахувати середню дисперсію дистильованої води.
- 2.5. Оформити звіт до роботи.

3. Обладнання та матеріали

Рефрактометр ІРФ-454; освітлювач; рідини та тверді з полірованими поверхнями зразки з відомими показниками заломлення; дистильована вода, спирт ректифікований, батистова або мадаполамова серветка.

4. Теоретична частина

Технічний рефрактометр Аббе призначений для швидкого (і порівняно грубого) вимірювання показника заломлення рідин і твердих тіл. Устрій рефрактометра Аббе базується на явищі повного внутрішнього відбивання.

Нехай промінь світла падає на границю поділу двох середовищ із боку оптично більш густого середовища ($n=n_2$). Для кутів падіння r , менших граничного r_{gp} , світло частково проникає в оптично менш густе середовище ($n=n_1$), а частково відбивається. При $r_{gp} \leq r \leq 90^\circ$ заломлений промінь відсутній, і відбувається повне відбивання (рис. 2.1, а). Внаслідок цього відбитий промінь утворює границю між світлою областю (повне відбиття) і полутінню (часткове відбивання).

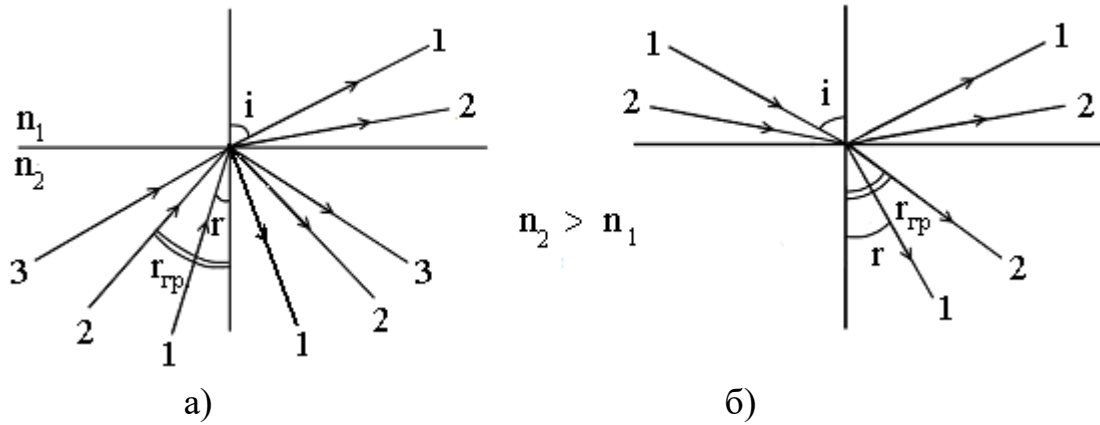


Рис. 2.1

Граничний кут r_{gp} відповідає куту заломлення $i=90^\circ$. Це означає, що

$$\sin r_{gp} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (2.1)$$

Знаючи показник заломлення одного з середовищ і визначаючи з досліду граничний кут, можна за допомогою (2.1) визначити показник заломлення другого середовища. Нехай світло падає на границю поділу з боку оптично менш густого середовища (рис. 2.1, б). У залежності від кута падіння промінь у другому середовищі може складати з нормаллю кути, розташовані в інтервалі від нуля до r_{gp} . Граничний кут заломлення r_{gp} відповідає куту падіння $i=90^\circ$ (ковзаючий промінь). У результаті в заломлених променях утворюється різка границя між світлою і темною областями. Легко побачити, що величина граничного кута і в цьому випадку визначається формулою (2.1).

При вимірюванні показника заломлення за допомогою рефрактометра Аббе можна користуватися як методом повного внутрішнього відбивання, так і методом ковзаючого кута.

Оптична схема рефрактометра Аббе і хід променів при вимірюванні показника заломлення рідин за методом ковзаючого кута зображені на рис. 2.2.

Основною частиною рефрактометра є дві скляні прямокутні призми P_1 і P_2 , виготовлені зі скла з великим показником заломлення. В розрізі призми мають вигляд прямокутних трикутників, які обернені один до одного гіпотенузами; зазор між призмами має ширину біля 0,1 мм і слугує для розміщення рідини, що досліджується. Світло потрапляє в призму P_1 через грань bf і попадає в рідину через матову грань ab . Світло, розсіяне матовою поверхнею, проходить шар рідини і під будь-якими можливими кутами падає на грань cd призми P_2 .

Ковзаючому променю в рідині ($i=90^\circ$) відповідає граничний кут заломлення r_{gp} . Заломлені промені більше r_{gp} не виникають. У зв'язку з цим кут виходу променя з грані ce може змінюватися в деякому інтервалі.

Якщо світло, яке виходить з грані ce , пропустити крізь збиральну лінзу L_1 , то в її фокальній площині спостерігається різка границя світла і темряви.

Границя спостерігається за допомогою лінзи L_2 . Лінзи L_1 і L_2 утворюють зорову трубу, встановлену на безмежність. В їх загальній фокальній площині знаходиться зображення шкали величин показника заломлення і вказівники (нитка і перехрестя). В полі зору окуляра L_2 труби одночасно можна побачити тільки частину зображення шкали і частину поля сфокусованих променів, які виходять із призми P_2 . Обертаючи систему призм P_1 і P_2 і, відповідно, змінюючи нахил граничного пучка променів відносно осі зорової труби, можна добитися, щоб границя світла і тіні опинилася в полі зору окуляра L_2 і збігалася з положенням вказівника. При обертанні системи призм обертається і шкала показників заломлення, встановлених на пластині, жорстко зв'язаній з системою призм P_1 і P_2 (на рис. 2.2 шкала не зображена). Значення показника заломлення рідини відраховується за шкалою на рівні різкої границі світла і тіні.

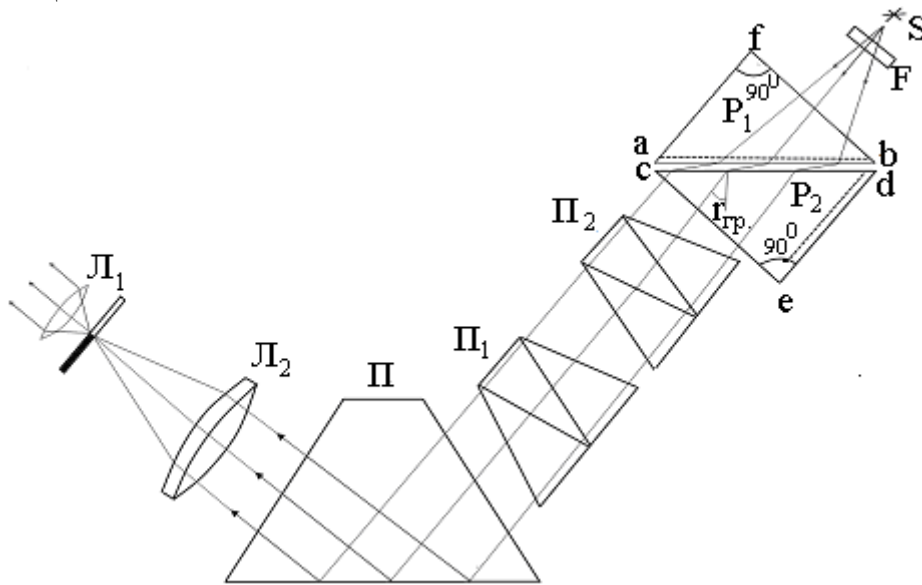


Рис. 2.2

Якщо джерело світла S не є монохроматичним, границя світла і темряви, що спостерігається в окулярі труби, часто виявляється розмитою і забарвленою через дисперсію показника заломлення досліджуваної речовини (тобто через залежності n від довжини хвилі λ). Для того, щоб отримати в цьому випадку різке зображення границі, на шляху променів, які виходять з призми P_2 , розміщують компенсатор із змінною дисперсією. Компенсатор складається з двох однакових дисперсійних призм Амічі (призми Π_1 і Π_2 на рис. 2.2), кожна з яких складається з трьох склеєних призм, які мають різні показники заломлення і різну дисперсію. Призми розраховані так, щоб монохроматичний промінь із довжиною хвилі $\lambda_D = 589,3$ нм (середнє значення довжини хвилі жовтого дублета натрію) проходив без відхилення. Промені з іншими довжинами хвиль відхиляються в той чи інший бік. Якщо положення призм відповідає рис. 2.2, то дисперсія двох призм дорівнює подвоєній дисперсії кожної з них. При повороті однієї з призм Амічі на 180° відносно іншої (навколо оптичної осі) повна дисперсія компенсатора дорівнює нулю, оскільки дисперсія однієї з них скомпенсована дисперсією іншої. У

залежності від взаємної орієнтації призми дисперсія компенсатора змінюється від нуля до подвоєного значення дисперсії однієї призми.

Для повороту призми однієї відносно іншої є спеціальна рукоятка і система конічних шестерен, за допомогою яких призми одночасно повертаються в протележних напрямках. Обертаючи ручку компенсатора, необхідно добиватися того, щоб границя світла і тіні в полі зору стала достатньо різкою. Положення границі при цьому відповідає довжині хвилі λ_D , для якої звичайно і наводяться значення показника заломлення.

У деяких випадках, коли дисперсія дослідної речовини особливо велика, діапазон компенсатора стає недостатнім і чіткої границі отримати не вдається. У такому випадку рекомендується встановлювати перед освітлювачем жовтий світлофільтр. Застосування в рефрактометрі Аббе поворотної призми Π (призми Дове) дозволяє зробити прилад більш компактним.

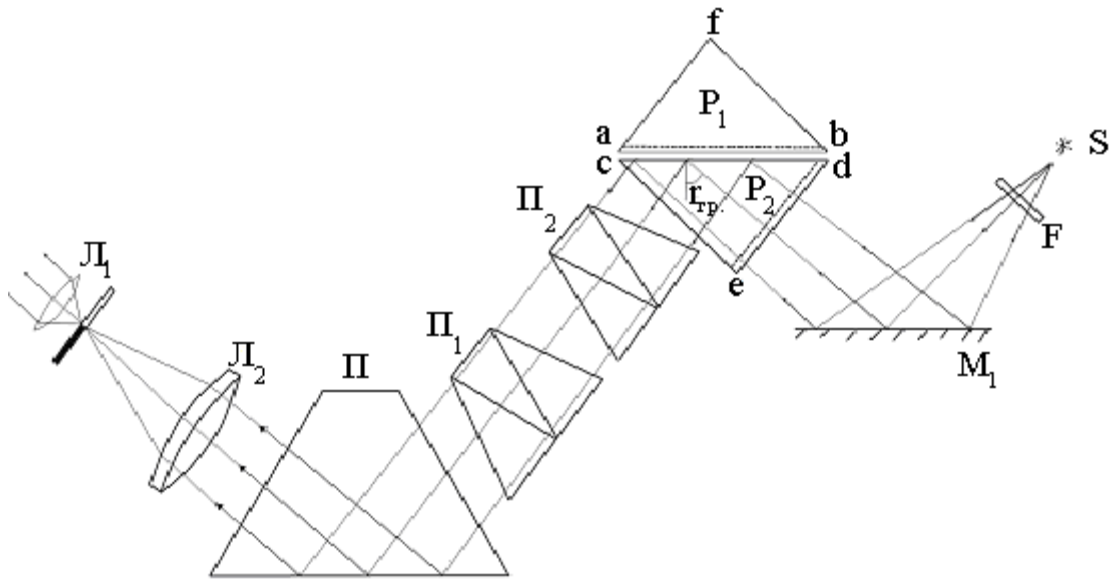


Рис. 2.3

На рис. 2.3 зображено хід променів в рефрактометрі за методом повного внутрішнього відбивання. У цьому випадку світло від джерела S після відбивання від дзеркала M_1 падає на матову грань ed призми P_2 (у методі ковзаючого кута ця поверхня закривається металевою шторкою). Після розсіяння на грані ed світло падає на границю поділу скло – рідина під будь-якими можливими кутами. При $r \geq r_{cp}$ відбувається повне внутрішнє відбивання, при $r < r_{cp}$ світло відбивається частково. В полі зору труби спостерігається границя світла і напівтіні.

Оскільки умови, які визначають величину граничного кута в методі ковзаючого кута і в методі повного внутрішнього відбивання, збігаються, то положення границі поділу в обох випадках однакове.

Зазначимо, що, на відміну від методу ковзаючого кута, метод повного внутрішнього відбивання дозволяє вимірювати показник заломлення непрозорих речовин.

Рефрактометр Аббе можна використовувати і для вимірювання показника заломлення твердих тіл. У цьому випадку застосовується як метод повного внутрішнього відбивання, так і метод ковзаючого кута. Дослідний зразок повинен мати плоску поліровану поверхню; цією поверхнею він притискається до гіпотенузи cd призми P_2 (призма P_1 при цьому відхиляється в бік). Для забезпечення оптичного контакту в проміжок між дотичними поверхнями вводять тонкий шар рідини, показник заломлення n якої відповідає умові: $n_1 \leq n \leq n_2$, де n_1 – показник заломлення дослідного зразка, а n_2 – показник заломлення призми P_2 . При виконанні цієї умови наявність шару рідини не впливає на результати вимірювань. (Студентам пропонується самостійно розглянути це питання.) Зазвичай для створення оптичного контакту використовують монобромнафталін, показник заломлення якого для жовтих ліній натрію дорівнює $n_D = 1,66$. При роботі за методом ковзаючого кута зразок повинен мати поліровану бокову поверхню, крізь яку в нього проникає світло (рис. 2.4).

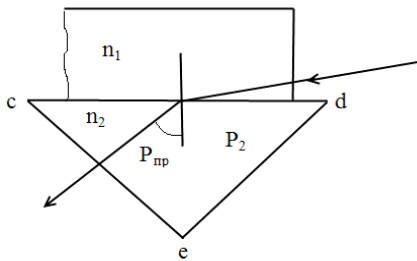


Рис. 2.4

5. Технічний опис та інструкція з експлуатації рефрактометра ІРФ-454

5.1. Призначення

Рефрактометр ІРФ-454 (рис. 2.5.) призначений для безпосереднього вимірювання показника заломлення n лінії D спектра і середньої дисперсії $n_F - n_C$ неагресивних рідин і твердих тіл.

Рефрактометр повинен експлуатуватися в приміщеннях з кондиціонованим повітрям при температурі від 18 до 22 °С і відносній вологості повітря при 20 °С не більше 80 % (*Робочі умови експлуатації рефрактометра*).

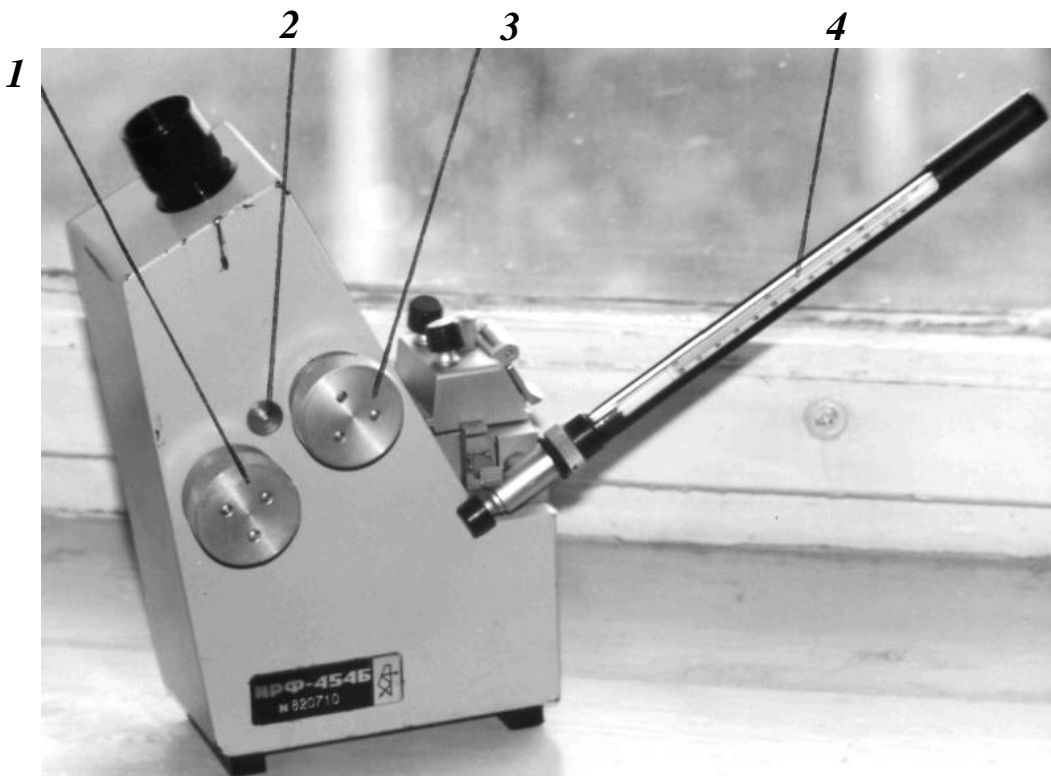


Рис. 2.5. Загальний вигляд рефрактометра РФ-454 Б:
1, 3 – маховики; 2 – заглушка; 4 – термометр

Нормальні умови експлуатації рефрактометра: температура оточуючого повітря $20 \pm 0,2$ °С, відносна вологість 60 ± 5 %.

Галузь використання – промислові та наукові лабораторії різноманітних галузей науки і техніки.

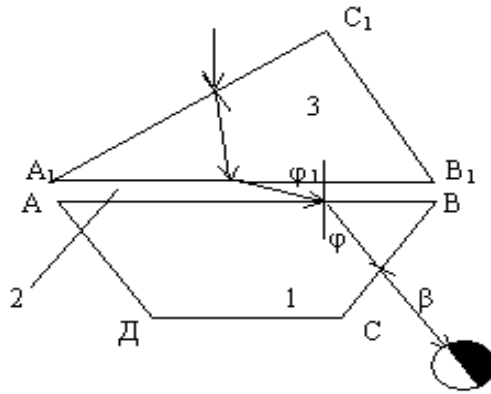


Рис. 2.6. Хід променів у рефрактометричному блоці:
1 – вимірювальна призма; 2 – досліджувана речовина; 3 – освітлювальна призма.

5.2. Технічні дані

Діапазон вимірювань показника заломлення n_D

моделі А:	1,2 – 2,0
на рефрактометричному блоці 1	1,2 – 1,7
на рефрактометричному блоці 2	1,6 – 2,0
моделі Б:	1,2 – 1,7

Межа допустимої основної та додаткової похибок, відповідно:

за показником заломлення n_D	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$ та $\pm 3 \cdot 10^{-4}$
за середньою дисперсією $n_F - n_C$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$ та $\pm 2 \cdot 10^{-4}$

Варіація показів показника заломлення

n_D не більше	$1 \cdot 10^{-4}$
-----------------	-------------------

Ціна поділки шкали показника

заломлення n_D	$1 \cdot 10^{-3}$
------------------	-------------------

Температура рідини, що досліджується від 10 до 60 °С

Габаритні розміри рефрактометра, мм, не більше	370x115x270
--	-------------

Маса рефрактометра, кг, не більше 3,8

Маса рефрактометра з приладдям

моделі А, кг, не більше	5,8
-------------------------	-----

моделі Б, кг, не більше 4,8

5.3. Принцип дії та оптична схема рефрактометра.

Принцип дії рефрактометра базується на *явищі повного внутрішнього відбивання* при проходженні світлом межі поділу двох середовищ з різними показниками заломлення.

Усі вимірювання здійснюються в “білому” світлі (природному або штучному). Показник заломлення прозорих середовищ визначають у прохідному світлі, а напівпрозорих і мутних – у відбитому.

Кілька крапель досліджуваної рідини розташовують між двома гіпотенузними гранями AB призми 1 і A_1B_1 призми 3 (рис. 2.6). Промені світла проходять *освітлювальну призму 3*, розсіюючись на виході матовою гранню A_1B_1 ; входять у досліджувану рідину і падають на поліровану грань AB вимірювальної призми 1 .

Оскільки на рефрактометрі досліджуються речовини, показник заломлення яких *менше* показника заломлення вимірювальної призми, то промені всіх можливих напрямків, що утворилися при розсіянні на матованій грані A_1B_1 освітлювальної призми, заломившись на межі рідини і полірованої грані вимірювальної призми, увійдуть в останню.

За законом заломлення для граничного кута заломлення (на рис. 2.6 кута падіння) при $\varphi = 90^\circ$ маємо:

$$\sin \varphi = n/N \sin \alpha, \quad (2.2)$$

$$\sin \beta = N \sin \beta' \sin \alpha, \quad (2.3)$$

причому $\beta' = \alpha - \varphi$. (2.4)

Виключаючи проміжні кути β' і φ з рівнянь (2.2), (2.3), (2.4), отримаємо формулу для визначення показника заломлення зразка

$$n = \sin \alpha \cdot \sqrt{N^2 - \sin^2 \beta} + \cos \alpha \cdot \cos \beta, \quad (2.5)$$

де N – показник заломлення вимірювальної призми; β – кут виходу променя з вимірювальної призми; α – заломлюючий кут вимірювальної призми.

Граничні промені та заломлені під різними кутами виходять потім із вимірювальної призми через її другу грань (BC) і відбившись від дзеркала 4 (рис. 2.7) попадають у зорову трубу $7, 8, 9$, утворюючи світлу частину поля зору (на рис. 2.6 нижня частина). Інша частина поля зору залишається темною. Отримана границя світлотіні являє собою пряму лінію і її положення визначається граничними променями, що виходять із призми 2 під кутом β (розгляньте *явище повного внутрішнього відбивання під час “зворотного” ходу променів*). Межа світлотіні з перехрестям, штрихи шкали 16 і відліковий штрих призми 10 оптичною системою $12, 11, 10$ проектується у фокальну площину окуляра 9 (рис. 2.7).

Спостерігаючи в окуляр 9 , суміщають межу світлотіні з перехрестям сітки 8 , повертаючи дзеркало 4 і жорстко зв'язану з ним шкалу 16 , і знімають з цієї шкали відлік величини показника заломлення.

Для ахроматизації межі світлотіні, яка виникла внаслідок дисперсії *білого* світла на вимірювальній призмі, і вимірювання

середньої дисперсії досліджуваної речовини слугує компенсатор, який складається з двох призм прямого зору **6** (призми Амічі). Призми Амічі обертаються навколо оптичної осі в протилежні сторони. При повороті призми Амічі на кут $\pm 90^\circ$ від положення, вказаного на рис. 2.7, дисперсія змінюється від максимальної до нуля. *Зазначимо, що відлік за шкалою показників заломлення проводиться лише після усунення спектральної забарвленості границі світлотіні* в положенні, при якому лінія границі світлотіні перетинає центр перехрестя сітки.

Дві вимірювальні призми **2** передбачені для вимірів показника заломлення в діапазоні від 1,2 до 2,0. Одна призма забезпечує виміри показника заломлення в діапазоні від 1,2 до 1,7; друга – від 1,6 до 2,0. При переході від одного діапазону вимірювань до іншого, для виставлення початку відліку, використовують переміщення об'єктива **12** в площині, яка перпендикулярна до штрихів та поверхні шкали **16**.

Для підсвітки шкали **16** і окраски поля зору слугують дзеркало **13** і світлофільтр **14**. При роботі у відбитому світлі вимірювальну призму **2** підсвічують дзеркалом **1**.

5.4. Конструкція рефрактометра ІРФ-454.

Основні вузли рефрактометра змонтовані в металевому корпусі. На корпус виведені маховики **1**, **3** (див. рис. 2.5) і заглушка **2**, напрямні типу “хвіст ластівки” **1**, **13** (рис. 2.8) для встановлення рефрактометричних блоків **2**; у верхній

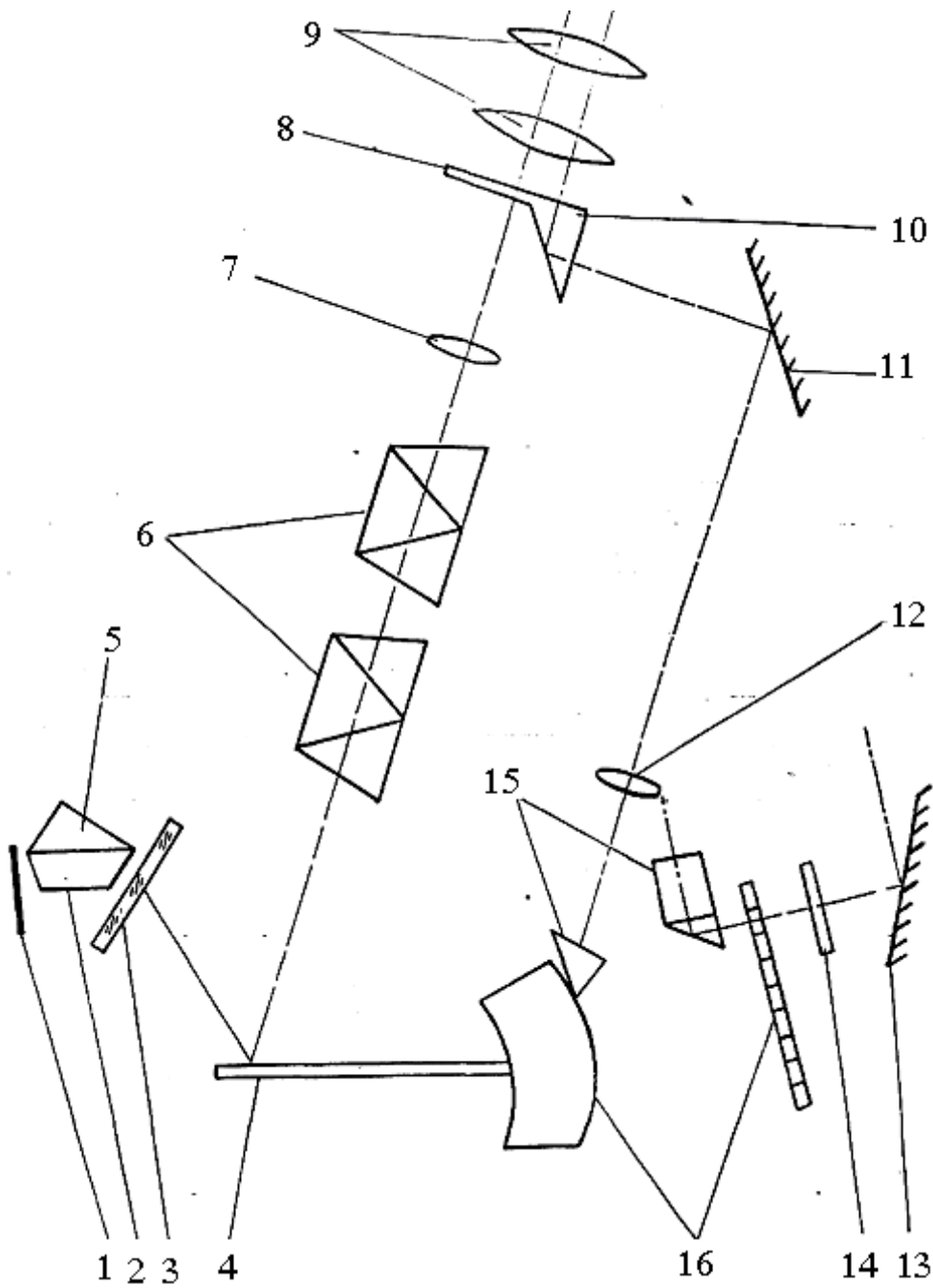


Рис. 2.7. Оптична схема рефрактометра РФ-454:

1 – дзеркало підвідки; **2** – вимірювальна призма; **3** – захисне скло; **4, 11, 13** – плоскі дзеркала; **5** – освітлювальна призма; **6** – компенсатор (призми прямого зору Амічі); **7, 12** – лінзи об’єктива зорової труби; **8** – сітка зорової труби (перехрестя); **9** – окуляр зорової труби; **10** – призма зі штрихом відліку; **14** – світлофільтр; **15** – шкала; **16** – призма

частині корпусу розміщений окуляр. Корпус закритий кришкою, на якій змонтовані світлофільтр і дзеркало **11**.

Рефрактометричний блок складається з двох частин: верхньої та нижньої. Нижня нерухома частина є вимірювальною, а верхня – освітлювальною призмою.

Освітлювальну призму за ручку **8** відкидають на кут $\sim 100^\circ$.

Оскільки показник заломлення досліджуваної речовини (особливо рідини) значною мірою залежить від температури, то при вимірюваннях її необхідно підтримувати постійною. Для цього в оправах призм передбачені камери, через які пропускають термостатовану воду. Подають і відводять її гумовими шлангами, які одягаються на штуцера **3, 7, 9, 12**.

Для контролю температури в штуцер **3** вгвинчують один з термометрів **4** (рис. 2.5).

Для встановлення на корпусі рефрактометричний блок подають по напрямним до упору і фіксують юстувальним ключем.

Знаходження межі поділу світлотіні й суміщення її з перехрестям сітки **8** (див. рис. 2.7) здійснюється поворотом дзеркала і обертанням маховика шкали **1** (рис. 2.5). Величина показника заломлення речовини, що досліджується, зчитується зі шкали **16** (див. рис. 2.7), яка системою, що складається з призми **15**, об'єктива **12**, дзеркала **11**, призми **10**, проектується у фокальну площину окуляра.

Об'єктив **12** може переміщатися у площині, перпендикулярній до штрихів та поверхні шкали. Для цього необхідно зняти заглушку **2** (рис. 2.5) і юстувальним ключем обережно повернути головку гвинта в потрібну сторону.

Всередині рефрактометра змонтований компенсатор, який слугує для усунення забарвленості спостерігаємої межі поділу світла й тіні, що спостерігається, та для визначення середньої дисперсії речовини. Компенсатор складається з двох призм прямого зору (призм Амічі). Призми Амічі маховиком **3** обертаються одночасно в різні сторони, змінюючи при цьому кутову дисперсію компенсатора і усуваючи кольорову кайму межі поділу світла й тіні. Разом із маховиком **3** обертається шкала **5** (див. рис. 2.8), з якої знімають відлік. Шкала поділена на 120 поділок. Поворот маховика на одну поділку шкали

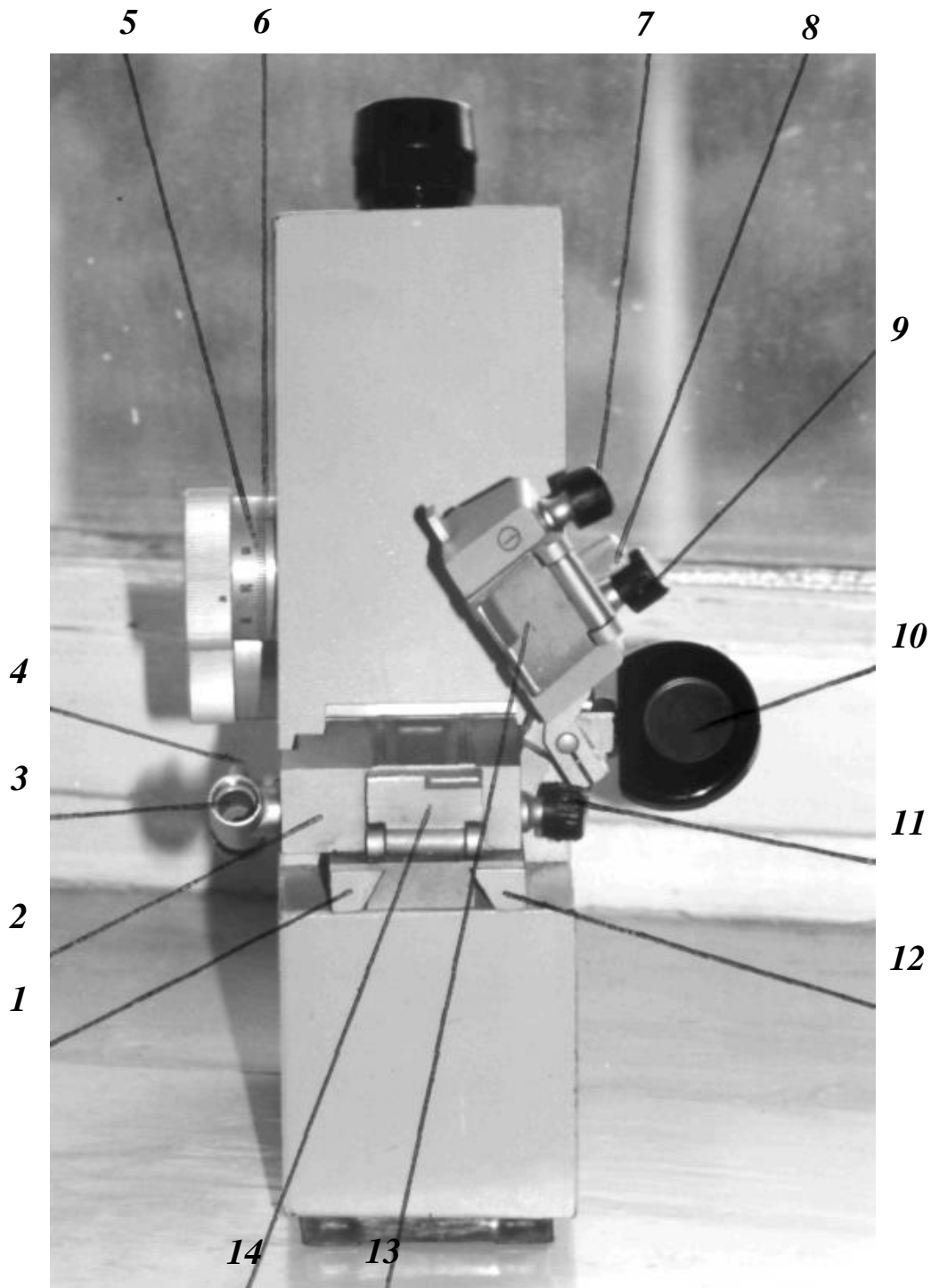


Рис. 2.8. Рефрактометр ІРФ-454:
1, 12 – направляючі типу «хвіст ластівки»; **2** – рефрактометричний блок; **3, 7, 9, 11** – шуцера; **4** – гачок; **5** – шкала компенсатора;
6 – ноніус; **8** – ручка; **10** – дзеркало підсвітки; **13** – заслінка;
14 – дзеркало

відповідає повороту призми Амічі на 3° . Десяті частки поділки шкали **5** визначаються за ноніусом **6**. Одна поділка ноніуса відповідає повороту призми Амічі на $0,3^\circ$.

Середню дисперсію речовини визначають перерахуванням показів шкали і ноніуса за таблицями 1, 2 (див. додаток), використовуючи при цьому значення n_D цієї речовини.

Дзеркало **II** призначено для підсвічування шкали і має розворот у двох площинах. Окуляр може бути встановлений на різкість у межах ± 5 діоптрій.

5.5. Підготовка приладу до роботи

Перед початком роботи необхідно перевірити юстування рефрактометра. Юстування обов'язкове після зміни рефрактометричних блоків. Контроль юстування з рефрактометричним блоком 1 (діапазон вимірювань n_D від 1,2 до 1,7) може бути здійснений за допомогою дистильованої води або контрольної пластини, а з рефрактометричним блоком 2 (діапазон вимірювань n_D від 1,6 до 2,0) – за допомогою контрольної пластини.

Контроль юстування рефрактометра краще проводити при температурі 20 °С. При використанні контрольних пластин для юстування навколишня температура не повинна виходити за межі 20 ± 2 °С, а при юстуванні за допомогою дистильованої води вимагається обов'язкове термостатування з точністю $\pm 0,2$ °С. Значення показника заломлення дистильованої води в залежності від її температури наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Показник заломлення дистильованої води у залежності від її температури

Нанесення дистильованої води на призму і вимірювання її n_D здійснюйте за методикою роботи з рідинами, а встановлення контрольної пластини і вимірювання її показника заломлення – за методикою вимірювання твердих тіл (див. нижче). Якщо середня величина п'ятиразових відліків відхиляється більше ніж на $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ від значення n_D , яке вигравіруване на контрольній пластині, а для дистильованої води – від даних у таблиці, то рефрактометр слід від'юстувати.

Для цього відгвинтити заглушку **2** (див. рис. 2.5) і юстувальним ключем підкрутити головку гвинта, сумістивши значення шкали із значенням показника заломлення, яке відповідає вигравіруваному на контрольній пластині. Гранична лінія світлотіні при цьому повинна проходити точно через центр перехрестя.

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	n_D	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	n_D
15	1,3334	21	1,3329
16	1,3333	22	1,3328
17	1,3332	23	1,3327
18	1,3332	24	1,3326
19	1,3331	25	1,3325
20	1,3330		

5.6. Порядок роботи на рефрактометрі

5.6.1. Встановлення окуляра. Вигвинтити окуляр до упора. Потім повертати його за годинниковою стрілкою доти, доки перехрестя у верхній частині освітленого поля зору не буде видно різко; одночасно фокусується на різкість і зображення шкали в нижній частині поля зору.

5.6.2. Встановлення освітлення. Джерелом світла може служити електролампа або денне світло. Рекомендується використовувати матову електролампу потужністю 40 Вт, яка встановлюється на деякій відстані від рефрактометра.

Рефрактометр і джерело світла встановлюють так, щоб світло попадало на вхідне вікно освітлювальної призми або на дзеркало, яким спрямовують світло на вхідне вікно вимірювальної призми.

5.6.3. Встановлення зразка

1) Тверді тіла. Перед початком роботи відкинути освітлювальну призму. Очистити поверхню вимірювальної призми та зразка. На поліровану поверхню зразка нанести невелику краплину імерсійної рідини. Показник заломлення імерсійної рідини повинен бути більше за показник заломлення зразка і менше за показник заломлення вимірювальної призми. Покласти зразок полірованою гранню на вимірювальну призму так, щоб матова грань, яка утворює з полірованою поверхнею гостре ребро, була повернута до світла. При накладанні зразка та помірному натиску на нього імерсійна рідина повинна розподілятися по всій поверхні і не виступати за його краї. Інтерференційні смуги в шарі імерсійної рідини легкими натисками на зразок розміщують паралельно падаючому світлу. Кількість інтерференційних смуг повинна бути не більше трьох. Встановлення зразка вважається ідеальним при однокольоровому забарвленні площини стискання зразка та призми, що відповідає приблизно половині інтерференційної смуги.

2) Рідини. На чисту поліровану поверхню вимірювальної призми скляною паличкою або піпеткою обережно, не торкаючись призми, нанести дві-три краплини рідини. Опустити освітлювальну призму та притиснути її гачком **4** (див. рис. 2.8).

Вимірювання прозорих рідин здійснюють у проходячому світлі, коли воно проходить через відкрите вікно освітлювальної призми, при цьому вікно вимірювальної призми закрито дзеркалом.

3) Забарвлені та мутні проби. Вимірювання здійснюють у відбитому світлі. Для цього закрити заслінку **14** і відкинути дзеркало **15**, з допомогою якого спрямувати світло у вимірювальну призму, при цьому темне і світле поля міняються місцями. Далі вимірювання проводити так, як і прозорих рідин.

5.6.4. Вимірювання показника заломлення. Після встановлення досліджуваного зразка на вимірювальній призмі розташуйте окуляр на якісну видимість перехрестя. Поворотом дзеркала **11** добийтеся найкращої освітленості шкали. Обертанням маховика **1** (рис. 2.5) межу світлотіні введіть у поле зору окуляра. Обертайте маховик **3** до зникнення забарвлення границі світлотіні. Спостерігаючи в окуляр, маховиком **1** наведіть границю

світлотіні точно на перехрестя і за шкалою показників заломлення, яка відповідає вибраному рефрактометричному блоку, зніміть відлік. Індексом для відліку слугує нерухомий вертикальний штрих призми **10** (рис. 2.7). Ціна поділки шкали $1 \cdot 10^{-3}$. Цілі, десяті, соті та тисячні частки відраховуйте за шкалою, десятитисячні частки оцінюйте на око.

5.6.5. Вимірювання середньої дисперсії. Мірою дисперсії зразка, який поміщений на призму, служить обертання однієї призми компенсатора відносно другої, яке здійснюється маховиком **3** (рис. 2.5) до повного усунення забарвленості границі світлотіні.

Відлік проводити за шкалою **5** (рис. 2.8), яка обертається разом із маховиком. Шкала поділена на 120 частин від 0 до 60 в обидві сторони. Десяті частки поділки беріть за ноніусом **6**. При обертанні маховика на 360° забарвленість границі світлотіні усувається двічі. При вимірюванні середньої дисперсії $n_F - n_C$ проводьте не менше п'яти відліків з обох сторін шкали і беріть середнє арифметичне значення цих відліків Z . У залежності від отриманого значення Z і показника заломлення речовини, що досліджується, користуючись табл. 1, 2, 3 (див. додаток 1), знайдіть величину середньої дисперсії $n_F - n_C$.

За табл. 1 для виміряного значення показника заломлення n_D знаходять величини коефіцієнтів A і B . Оскільки значення n_D у таблицях дані через 0,01, то величини A і B для проміжних значень визначають інтерполяцією. За табл. 2 для отриманого значення Z знаходять величину σ . Для проміжних значень Z визначають σ також інтерполяцією. Необхідно зважати на те, що для значення Z більше 30 величина σ набуває від'ємного значення.

За знайденими величинами A , B і σ обчислюють значення середньої дисперсії $n_F - n_C = A + B\sigma$.

Приклад запису результатів вимірювання і користування таблицями при визначенні середньої дисперсії наведений для дистильованої води в додатку, пункт 3.

6. Перевірка рефрактометра ІРФ-454

Перевірка, обсяг і періодичність контрольно-профілактичних робіт повинні відповідати методичним вказівкам щодо методів та засобів перевірки рефрактометра ГЗ4.15.051 МВ.

6.1. Операції та засоби перевірки

При проведенні перевірки повинні виконуватись операції та застосовуватись засоби перевірки, які вказані в табл. 2.1.

Прилади, що знаходяться в експлуатації, підлягають перевірці згідно з ГОСТ 8.002-71 один раз на рік.

Перелік засобів та обов'язкових операцій при проведенні перевірки рефрактометра ІРФ-454

Найменування операцій	Номера пунктів даних методичних вказівок	Засоби перевірки та їх нормативно-технічні характеристики	Обов'язковість проведення операцій при:		
			випуску з виробництва	ремонті	експлуатації та зберіганні

1. Перевірка зовнішнього вигляду і комплектності	4.2.7.4.1		так	ні	ні
2. Перевірка якості складання та взаємодії рухомих вузлів	4.2.7.4.2.1		так	так	так
3. Перевірка проточності та герметичності порожнин камери	4.2.7.4.2.2	Стенд, який забезпечує приток води під тиском. Манометр МТ-3, класу 4, з межами 0-16 Кгс/см ² ГОСТ 8625-77	так	так	так
4. Визначення меж діоптрійної наводки окуляра	4.2.7.4.3.1	Діоптрійна трубка з межами вимірювання ± 5 діоптрій	ні	так	так
5. Перевірка юстування оптичної системи, якості поля зору і шкал	4.2.7.4.3.2	Дистильована вода згідно з ГОСТ 6709-72, зразкові призми для перевірки рефрактометрів, монобромнафталін згідно з ТУ-6-09-186-70	так	так	так
6. Перевірка юстування дисперсійного компенсатора	4.2.7.4.3.3	Установка з натрієвою лампою ДНаС-18 і світлофільтр для виділення довжини хвилі 589,25 нм, який складається з стекол ЗС-8 (товщина 1 мм) і ОС-13 (товщина 5 мм) згідно з ГОСТ 9411-75	так	так	так
7. Визначення похибки за показником заломлення та середньою дисперсією	4.2.7.4.3.5	Термостат з межею допустимої похибки термостатування $\pm 0,1$ °С,	так	так	так

8. Визначення збіжності показів	4.2.7.4.3.6	дистильована вода по ГОСТ 6709-72, зразкові призми для перевірки рефрактометрів, монобромнафталін згідно з ТУ-6-09-186-70	так	так	так
9. Перевірка площинності ро-бочої площини вимірювальної та контрольної призми	4.2.7.4.3.7	Плоскопаралельне скло згідно з ГОСТ 2923-75	ні	так	ні
10. Визначення похибки атестації вимірювальної призми	4.2.7.4.3.8	Рефрактометр з межею допустимої похибки $\pm 2 \cdot 10^{-5} n_D$	ні	так	ні
11. Перевірка величини проміжку між вимірювальною та освітлювальною призмами	4.2.7.4.3.9	Індикатор-мікрометр КИ з межами 0-6 мм класу 0,01 на спеціальній підставці П-подібної форми	ні	так	ні

6.2. Умови перевірки

При проведенні перевірки повинні виконуватись наступні умови:

- температура навколишнього повітря 10-35 °С;
- відносна вологість повітря при 20 °С не більше 80 %;
- атмосферний тиск 720-780 мм рт.ст. (93-103 кПа);
- механічні коливання і вібрації повинні бути відсутніми;
- камери рефрактометра, в яких закріплені вимірювальна та освітлювальна призми, повинні термостатуватися при температурі $20 \pm 0,2$ °С.

6.3. Підготовка до перевірки

Перед проведенням перевірки повинні бути виконані підготовчі роботи, які викладені в п.3.4.5.

Перевірка рефрактометра проводиться за допомогою набору зразкових призми, які атестовані Держстандартом.

6.4. Проведення перевірки

6.4.1. Зовнішній огляд. При проведенні зовнішнього огляду повинна бути встановлена відповідність рефрактометра наступним вимогам:

- на поверхнях металевих деталей не повинно бути пошкоджень та дефектів, які погіршують зовнішній вигляд рефрактометра;
- на площинах вимірювальної та освітлювальної призми не повинно бути подряпин і виколочок;

- комплектність рефрактометра повинна відповідати переліку розділу “Комплектність поставки” паспорта.

6.4.2. Випробовування.

6.4.2.1. Перевірку плавності наведення окуляра, плавності переміщення ручки шкал дисперсійного компенсатора, оправ освітлювальної призми відносно шарніра проводять випробовуванням.

6.4.2.2. Перевірку протікання і герметичності камер рефрактометра проводять на спеціальному стенді, при цьому спочатку перевіряється текучість камер, а потім створюється тиск величиною $2 \cdot 10^4$ Па і витримується протягом 3 хвилин. У процесі випробовувань тиск не повинен падати більше ніж на 200 Па. При цьому не повинно спостерігатися течі, появи краплин і запотівання поверхонь призм.

6.4.3. Визначення метрологічних параметрів

6.4.3.1. Визначення меж діоптрійного наведення окуляра рефрактометра проводять за допомогою діоптрійної трубки з межами вимірювання ± 5 діоптрій з межею допустимої похибки $\pm 0,1$ діоптрій наступним чином:

- встановлюють діоптрійну трубку на безмежність, тобто на різке бачення безмежно віддаленого предмета при положенні індексу шкали діоптрійної трубки на позначці ∞ ;
- прикладають її до окуляра рефрактометра і виставляють його так, щоб шкалу, що спостерігається через діоптрійну трубку було різко видно;
- це положення окуляра рефрактометра відповідає нульовому положенню діоптрійного наведення окуляра;
- потім вгвинчують окуляр рефрактометра до упору, наводять діоптрійну трубку на різке зображення шкали і за шкалою діоптрійної трубки проводять відлік, який повинен бути не менше $-3,5$ діоптрій;
- те саме повторюють при вигвинченому положенні окуляра рефрактометра, при цьому відлік за шкалою діоптрійної трубки повинен бути не менше $+3,5$ діоптрій.

6.4.3.2. Перевірка юстування оптичної системи, якості поля зору і шкал рефрактометра проводиться шляхом спостереження в окуляр поля зору, межі світлотіні, шкал і сітки при вимірюванні дистильованої води та зразкових призм.

При цьому поле зору рефрактометра повинно відповідати наступним вимогам:

- повинно бути чистим і мати контур кола, поділеного межею світлотіні на дві половини (світлу і темну);
- світла половина поля зору повинна бути рівномірно освітлена і не мати забарвленості при роботі в прохідному та у відбитому світлі;
- межа світлотіні повинна бути різкою, контрастною без забарвлення по всій довжині в будь-якій точці шкали;
- при роботі у відбитому світлі та з мутними рідинами допускається зниження контрастності в межах, які дають чітку фіксацію межі світлотіні;

- фон поля повинен бути чорним і мати контрастний контур без кольорового забарвлення;
- штрихи і оцифрування шкал, а також перехрестя сітки, повинні бути різкими і контрастними в межах усього поля зору і без дефектів, що затрудняють проведення відліку;
- межа світлотіні повинна бути паралельна штрихам шкал по всій довжині шкал; видима оком непаралельність не допускається;
- центр перехрестя сітки при переміщенні її вздовж шкали повинен проходити симетрично відносно лівої сторони шкали на відстані, що дорівнює, приблизно, довжині малого штриха шкали;
- шкали і сітка, які спостерігаються в полі зору одночасно з межею світлотіні, повинні бути встановлені без видимого паралаксу у фокальній площині об'єктива, в якій сфокусована межа світлотіні.

6.4.3.3. Паралакс сітки відносно до границі світлотіні перевіряється діоптрійною трубкою шляхом встановлення її на різкість по границі світлотіні і потім по сітці. Різниця відліків по шкалі діоптрійної трубки між першим і другим встановленням не повинна перевищувати 0,2 діоптрії.

6.4.3.4. Паралакс між шкалою і границею світлотіні повіряється аналогічно і також не повинен перевищувати 0,2 діоптрії.

6.4.3.5. Перевірка юстування дисперсійного компенсатора рефрактометра проводиться шляхом вимірювання показників заломлення дистильованої води в натрієвому світлі при обертанні лімба дисперсійного компенсатора на 180° і спостереження за межею світлотіні. При цьому не повинно спостерігатися зміщення межі світлотіні більше ніж на одну поділку шкали.

6.4.3.6. Перевірка встановлення нуля-пункту рефрактометра проводиться за допомогою дистильованої води ГОСТ 6709-72 з $n_D = 1,3329$ при температурі $20 \pm 0,2$ °С. При цьому відлік повинен бути 1,3329 за n_D .

Юстувальним ключем встановлюють границю світлотіні на поділки шкали, які відповідають вищевказаним, і потім, зміщуючи границю світлотіні вгору і вниз від вказаного положення, підраховують кількість поділок, на які можливі зміщення границі світлотіні ключем.

Кількість поділок, на які можливі зміщення межі світлотіні, не повинна бути менше ± 10 .

6.4.3.7. Визначення похибки рефрактометра проводять при термостатуванні камери до температури $20 \pm 0,2$ °С після встановлення нуля-пункту за зразковими призмами, які мають похибки атестації показника заломлення n_D , яка не перевищує $\pm 2 \cdot 10^{-5}$, і середньої дисперсії $n_F - n_C$, яка не перевищує $\pm 2 \cdot 10^{-5}$.

Призми зразкові можуть бути замінені рідинами, які атестовані за показником заломлення n_D і середньою дисперсією $n_F - n_C$ з тією ж межею допустимої похибки, що і зразкові призми.

Похибка визначається як різниця між середнім арифметичним трьох вимірів і дійсним значенням величини зразкової міри, що досліджується.

Виміряні значення похибки не повинні бути більше:

- за шкалою показників заломлення $\pm 3 \cdot 10^{-4}$;
- за середньою дисперсією $\pm 2 \cdot 10^{-4}$.

6.4.3.8. Визначення збіжності показів рефрактометра проводять визначенням найбільшої різниці між повторними показами, які відповідають одному й тому ж значенню величини, що вимірюється, при незмінних зовнішніх умовах шляхом встановлення різниці між найбільшим та найменшим значеннями п'яти вимірювань однієї й тієї ж зразкової призми. Збіжність визначають у трьох точках шкали.

Допустима величина збіжності показів не повинна бути більше $2 \cdot 10^{-4}$ по шкалі показів заломлення n_D .

6.4.3.9. Перевірку площинності робочої площини призми вимірювальної та контрольної проводять методом накладання на площину призми плоскопаралельного скла згідно з ГОСТу 2923-75, спостереженням через нього і підрахунком інтерференційних смуг, кількість яких не повинна бути більше двох.

6.4.3.10. Перевірку похибки атестації контрольної призми проводять на рефрактометрі з похибкою $\pm 2 \cdot 10^{-5} n_D$ при температурі від ± 15 °С до ± 25 °С. Коливання температури за період вимірювання не повинні перевищувати 1 °С.

Виміряні значення показників заломлення n_D та середньої дисперсії $n_F - n_C$ не повинні відрізнятись від вигравіруваних на призмах більше ніж на $\pm 2 \cdot 10^{-5} n_D$ і не більше ніж на $\pm 2 \cdot 10^{-4} (n_F - n_C)$.

6.4.3.11. Перевірка величини проміжку між вимірювальною та освітлювальною призмами проводиться індикатором мікрометром на спеціальній підставці, яка має П-подібну форму.

Спочатку індикатор розміщують на площину і встановлюють нуль індикатора-мікрометра.

Потім індикатор розміщують на кожній половині камер так, щоб підставка спиралась на площину камери, а стрижень індикатора опускався на призму, і визначають положення площини призми відносно площини камери.

Сумарна величина проміжку між призмами повинна бути не менше 0,02 мм і не більше 0,04 мм.

При цьому площина вимірювальної призми повинна бути нижче відносно до площини камери на 0,01 мм або на одному рівні з нею.

Виступ площин призми відносно до площин камер не допускається.

7. Порядок виконання роботи

7.1. Ознайомитися з технічним описом і інструкцією з експлуатації рефрактометра ИРФ – 454.

7.2. Провести перевірку рефрактометра в обсязі, вказаному викладачем.

- Провести вимірювання показника заломлення дистильованої води (кількість вимірювань $N=10$), при одночасному вимірюванні параметра Z

(кількість значень параметра Z – по п'ять відліків з обох сторін шкали (за чорною і червоною шкалами відповідно)).

- Розрахувати середнє значення показника заломлення і параметра Z .
- Зафіксувати температуру дистильованої води.
- Порівняти отримані значення показника заломлення при фіксованій температурі з табличними значеннями.
- Зробити висновки щодо придатності прилада до роботи.

7.3. За вимірними значеннями показника заломлення і параметра Z , користуючись таблицями 1, 2 (Додаток 2.1); знайти коефіцієнти A , B , σ і розрахувати середню дисперсію дистильованої води за формулою

$$n_F - n_C = A + B\sigma.$$

7.4. Порівняти отримані значення середньої дисперсії з табличними.

7.5. Оформити звіт до роботи.

8. Зміст звіту

- 8.1. Назва, мета та завдання до роботи.
- 8.2. Оптична схема приладу.
- 8.3. Принцип роботи ІРФ-454.
- 8.4. Результати експериментів та їх обробка при проведенні перевірки і вимірюванні показника заломлення та середньої дисперсії наданої викладачем речовини.
- 8.5. Висновки стосовно придатності до використання даного рефрактометра.

9. Контрольні запитання

- 9.1. Яке призначення рефрактометра ІРФ-454?
- 9.2. Що ви розумієте під показником заломлення, його фізичний зміст?
- 9.3. Чи може показник заломлення бути менше ніж одиниця?
- 9.4. Що таке дисперсія та середня дисперсія?
- 9.5. Який принцип (тобто на основі якого фізичного явища) реалізується в ІРФ-454 для вимірювання показника заломлення.
- 9.6. У чому полягає суть методу вимірювання середньої дисперсії?
- 9.7. Чому на ІРФ-454 ми вимірюємо лише n_D , хоча використовуємо для цього біле світло?
- 9.8. Який метод та спосіб його реалізації Ви використовували при перевірці ІРФ-454 за показником заломлення?

10. Список літератури

- 10.1 Солтис І.В., Деревянчук О.В. Основи метрології / автори.: І.В Солтис, О.В. Деревянчук. - Чернівці: Чернівецький нац. ун-тет, 2021, 152 с.
- 10.2. Ландсберг Г. С. Оптика / Григорій Самуїлович Ландсберг. – М.: Изд. Наука, 1976. – 928 с.

10.3. Борбат А.М. именованно Оптические измерения / Алексей Маркович Борбат, Иван Степанович Горбань, Борис Андреевич Охрименко и др. – К.: Техніка, 1967. –420 с.

Додаток 2.1

Таблиця 1 для визначення середньої дисперсії при вимірюванні n_D 1,2 – 1,7 (ИРФ-454Б)

n_D	A	Δ_A	B	Δ_B	n_D	A	Δ_A	B	Δ_B
1,200	0,02444		0,03295		1,450	0,02330		0,02829	
		-6		-1			-2		-39
1,210	0,02438		0,03294		1,460	0,02328		0,02790	
		-6		-2			-2		-41
1,220	0,02432		0,03292		1,470	0,02326		0,02749	
		-6		-3			-2		-43
1,230	0,02426		0,03289		1,480	0,02324		0,02706	
		-6		-5			-1		-45
1,240	0,02420		0,03284		1,490	0,02323		0,02662	
		-6		-7			-2		-47
1,250	0,02414		0,03277		1,500	0,02321		0,02615	
		-6		-8			-1		-49
1,260	0,02408		0,03269		1,510	0,02320		0,02566	
		-5		-9			0		-51
1,270	0,02403		0,03260		1,520	0,02320		0,02515	
		-6		-11			-1		-53
1,280	0,02397		0,03249		1,530	0,02319		0,02462	
		-5		-13			0		-55
1,290	0,02392		0,03236		1,540	0,02319		0,02407	
		-5		-14			+1		-58
1,300	0,02387		0,03222		1,550	0,02320		0,02349	

		-5		-15			0		-60
1,310	0,02382		0,03207		1,560	0,02320		0,02289	
		-5		-17			+1		-64
1,320	0,02377		0,03190		1,570	0,02321		0,02225	
		-4		-19			+2		-66
1,330	0,02373		0,03171		1,580	0,02323		0,02159	
		-5		-20			+2		-69
1,340	0,02368		0,03151		1,590	0,02325		0,02090	
		-4		-22			+3		-72
1,350	0,02364		0,03130		1,600	0,02328		0,02018	
		-4		-23			+3		-76
1,360	0,02360		0,03107		1,610	0,02331		0,01942	
		-4		-25			+4		-79
1,370	0,02356		0,03082		1,620	0,02335		0,01863	
		-4		-26			+4		-84
1,380	0,02352		0,03056		1,630	0,02339		0,01779	
		-4		-27			+6		-89
1,390	0,02348		0,03029		1,640	0,02345		0,01690	
		-3		-29			+6		-93
1,400	0,02345		0,03000		1,650	0,02351		0,01597	
		-3		-31			+8		-100
1,410	0,02342		0,02969		1,660	0,02359		0,01497	
		-4		-32			+9		-106
1,420	0,02338		0,02937		1,670	0,02368		0,01391	
		-2		-34			+11		-115
1,430	0,02336		0,02903		1,680	0,02379		0,01276	
		-3		-36			+13		-124
1,440	0,02333		0,02867		1,690	0,02392		0,01152	
		-3		-38			+16		-137
1,450	0,02330		0,02829		1,700	0,02408		0,01015	

Таблиця 2 для визначення σ по Z .

Z	σ	Δ	Z	Z	σ	Δ	Z
0	1,000		60	16	0,669		44
		-1				-40	
1	0,999		59	17	0,629		43
		-4				-41	
2	0,995		58	18	0,588		42
		-7				-43	
3	0,988		57	19	0,545		41
		-10				-45	
4	0,978		56	20	0,500		40
		-12				-46	

5	0,966		55	21	0,454		39
		-15				-47	
6	0,951		54	22	0,407		38
		-17				-49	
7	0,934		53	23	0,358		37
		-20				-49	
8	0,914		52	24	0,309		36
		-23				-50	
9	0,891		51	25	0,259		35
		-25				-51	
10	0,866		50	26	0,208		34
		-27				-52	
11	0,839		49	27	0,156		33
		-30				-52	
12	0,809		48	28	0,104		32
		-32				-52	
13	0,777		47	29	0,052		31
		-34				-52	
14	0,743		46	30	0,000		30
		-36					
15	0,707		45				
		-38					

Додаток 2.2

Приклад запису результатів вимірювань та обчислення середньої дисперсії з використанням відповідних таблиць

Для води при 20°C $n_D = 1,3330$

Відліки Z за шкалою компенсатора

За червоною шкалою	За чорною шкалою
36,4	36,4
36,4	36,4
36,3	36,4
36,5	36,5
36,5	36,4

середнє 36,4

36,4

Загальне середнє Z = 36,4

З таблиці 1.:

для $n_D = 1,330$ A = 0,02373, B = 0,03171

для $n_D = 1,340$ A = 0,02368, B = 0,03151

$$\Delta_A = - 5 \qquad \Delta_B = - 20$$

Користуючись методом лінійної інтерполяції знаходимо приріст для третього і при необхідності четвертого тисячних і десятитисячних знаків, тобто:

$$\begin{array}{l} n_D = 1,33 \quad A = 0,02373, \qquad B = 0,03171, \\ \qquad \qquad \qquad 0,003 \qquad \qquad - 1,5 \qquad \qquad \qquad - 6; \\ \text{для } n_D = 1,3330 - A = 0,023715; \qquad B = 0,03165 \end{array}$$

Результати округлюємо до п'ятого знака.

Знайдемо σ для $Z = 36,4$, користуючись таблицею 2.

$$\begin{array}{l} Z = 36 \qquad \qquad \sigma = - 0,309 \\ Z = 37 \qquad \qquad \sigma = - 0,358 \end{array}$$

$$\Delta_\sigma = 49.$$

За таблицею 9.2 для 49 маємо:

$$\begin{array}{l} Z = 36 \qquad \qquad \sigma = 0,309 \\ \qquad \qquad \qquad 0,4 \qquad \qquad \qquad 19,6 \\ Z = 36,4 \qquad \qquad \sigma = 0,3286. \end{array}$$

За знайденими значеннями A , B , σ визначаємо:

$$n_F - n_C = A + B\sigma = 0,023715 + (0,03165 \cdot 0,3286) = 0,034115.$$

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПЕРЕВІРКИ ЦИФРОВИХ ВОЛЬТМЕТРІВ

1. Мета роботи

Засвоїти методи та засоби перевірки цифрових вольтметрів і виконати перевірку цифрового вольтметра В7-27А/І з оформленням протоколу.

2. Завдання

2.1. Ознайомитись з інструкцією до роботи.

2.2. Ознайомитись з призначенням, основними технічними даними, правилами експлуатації та порядком підготовки до роботи цифрового вольтметра В7-27А/І, диференціального вольтметра В2-34 та джерела живлення постійного струму Б5-47.

2.3. Зібрати лабораторну схему для проведення перевірки.

2.4. Виконати перевірку цифрового вольтметра В7-27А/І за параметром „вимірювання постійної напруги” згідно з запропонованою методикою.

2.5. Оформити звіт до роботи.

3. Обладнання

Цифровий вольтметр В7-27А/І, диференціальний вольтметр В2-34, джерело живлення постійного струму Б5-47.

4. Теоретична частина

Дивись “Основні положення метрології стосовно перевірки та її місце в забезпеченні єдності вимірювань” методичних рекомендацій.

5. Методика та порядок перевірки цифрового вольтметра за параметром “вимірювання постійної напруги”

Перед нами стоїть завдання здійснити перевірку цифрового вольтметра В7-27А/І за параметром „вимірювання постійної напруги”. Перевірку пропонується провести для діапазонів вимірювання 0-1, 0-10 та 0-100 В.

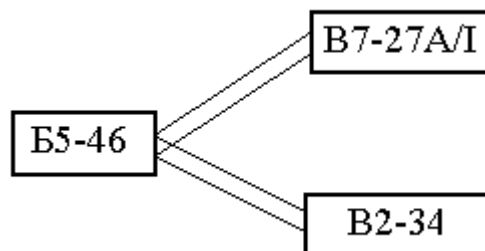


Рис. 3.1. Блок-схема для проведення перевірки цифрового вольтметра за параметром “вимірювання постійною напруги”

За даними технічного паспорту на В7-27А/І межі допустимої основної похибки вимірювання постійної напруги, у відсотках, на вищезазначених межах вимірювання обчислюються за виразом:

$$\Delta U_{\text{дод}} = \pm \left[0,25 + 0,15 \left(\frac{U_{\kappa}}{U} - 1 \right) \right] \%, \quad (3.1)$$

де U_{κ} – номінальне значення встановленої межі вимірювання, в нашому випадку $U_{\kappa} = 1 \text{ В}, 10 \text{ В}, 100 \text{ В}$; U – дійсне значення вимірюваної величини.

Крім того, згідно з технічними вимогами до приладу (див. інструкцію по експлуатації) при перевірці В7-27А/І за постійною напругою перевірку необхідно провести не менш ніж для трьох фіксованих значень напруги (контрольні точки), що відповідають початку, середині та кінцю діапазону вимірювання. Наприклад, для діапазону 0-1 В вибираємо точки 0,1; 0,5 та 1 В.

Блок-схема для проведення перевірки цифрового вольтметра за постійною напругою представлена на рис. 3.1. Б5-46 – це стабілізоване джерело живлення постійного струму, з яким паралельно з'єднані вольтметр В7-27А/І, що перевіряється, та зразковий диференціальний вольтметр В3-34.

Порядок перевірки наступний. Почергово подаємо з виходу джерела живлення на вхід вольтметра, що перевіряється, постійну напругу кожної контрольної точки для всіх діапазонів вимірювання, що перевіряються. Знімаємо п'ять відліків, знаходимо їх середнє арифметичне значення, яке і приймаємо як результат вимірювання вольтметром В7-27А/І, що перевіряється, значення постійної напруги контрольної точки. При цьому одночасно дійсне (істинне) значення величини цієї напруги вимірюється зразковим диференціальним вольтметром В2-34.

З правилами роботи з диференціальним (його ще називають різницевим) вольтметром ознайомтеся в інструкції з його експлуатації. Зазначимо лише принцип його роботи. Він базується на диференціальному (різницевому) методі вимірювання: диференціальний вольтметр вимірює власне лише різницю ΔU між напругою, що подається на його вхід, і величину якої необхідно поміряти U , і напругою $U_{\text{ВН}}$, що задається його внутрішніми нормальними елементами напруги, і величина якої виставляється відповідними калібрувальними перемикачами якомога близькою за значенням до величини вимірюваної напруги. Тоді дійсне значення вимірюваної напруги знайдемо з рівнянням

$$U = U_{\text{ВН}} + \Delta U. \quad (3.2)$$

Різниця між результатом вимірювання, отриманим за допомогою вольтметра В7-27А/І, що перевіряється, і значенням отриманим за допомогою зразкового диференціального вольтметра дасть нам значення реальної похибки, з якою наш п вольтметр, що перевіряється, виміряв величину постійної напруги даної конкретної контрольної точки. Якщо це значення менше значення межі допустимої основної (або додаткової у залежності від умов вимірювання (див. інструкцію з експлуатації В7-27А/І)) похибки, розрахованої згідно з (3.1), то прилад придатний до використання, у протилежному випадку – непридатний.

Результати розрахунків, вимірювань та висновки, зроблені за результатами вимірювань, заносимо до підсумкової таблиці (див. табл 3.1).

Таблиця 3. 1

Підсумкова таблиця

Межа вимірювання, В	Величини напруг, що контролюють, В	Допустиме значення основної похибки, В	Покази вольметра, що повіряється, В	Покази зразкового вольметра, В	Реальна похибка вимірювання, В	Висновки
0-1	0,1					
	0,5	+0,002				
	1,0					
0-10	1,0					
	5,0					
	10,0					
0-100	5,0					
	15,0					
	30,0					

На завершення наведемо приклад розрахунку величини допустимої основної похибки для контрольної точки 0,5 В діапазону вимірювань 0-1 В. Згідно з (3.1) отримаємо

$$\Delta U_{\text{дод}}(0,5 \text{ В}) = \pm \left[0,25 + 0,15 \left(\frac{1}{0,5} - 1 \right) \right] = 0,4 \text{ В}.$$

Отже 0,5 В відповідає 100%, а $\Delta U_{\text{дод}}$ – 0,4%. Тоді

$$\Delta U_{\text{дод}} = \pm \frac{0,5 \cdot 0,4}{100} = \pm 0,002 \text{ В}.$$

6. Зміст звіту

- 6.1. Назва, мета та завдання до роботи.
- 6.2. Основні визначення теоретичної частини даної інструкції, що дають відповіді на контрольні питання.
- 6.3. Блок-схема та послідовність проведення перевірки з відповідними розрахунками меж допустимої основної похибки.
- 6.4. Підсумкова таблиця.
- 6.5. Висновки.

7. Контрольні запитання

- 7.1. Що Ви розумієте під перевіркою та метрологічною атестацією приладів? Яка між ними різниця?

- 7.2. Які прилади можна вважати зразковими при перевірці робочих засобів вимірювання?
- 7.3. З якою точністю повинні бути відомі параметри еталонів, щоб їх можна було використати для перевірки робочих засобів вимірювання?
- 7.4. Що таке впливні величини, нормальні умови вимірювань, нормальне значення та нормальна і робоча область значень впливних величин, основна та додаткова похибки засобу вимірювання?
- 7.5. Які методи вимірювань Ви знаєте? В чому їх суть, переваги, недоліки?
- 7.6. Які методи перевірки Ви знаєте? В чому їх суть, переваги, недоліки?
- 7.7. Які шляхи реалізації методів перевірки Ви знаєте? В чому їх суть, переваги, недоліки?
- 7.8. Який метод перевірки Вами використаний для перевірки цифрового вольтметра В7-21А/І? Дайте йому коротку характеристику.

8. Список літератури

- 8.1 Солтис І.В. , Деревянчук О.В. Основи метрології / автори.: І.В Солтис, О.В. Деревянчук. - Чернівці: Чернівецький нац. ун-тет, 2021, 152 с.

Практична робота №4

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПЕРЕВІРКИ ФОТОПРИЙМАЧІВ

1. Мета роботи

Засвоїти методи та засоби перевірки фотоприймачів (їх параметрів, зокрема спектральної чутливості) згідно з галузевою методикою.

2. Завдання

- Вивчити та засвоїти призначення, основні характеристики та параметри фотоприймачів.
- Пригадати основні закони теплового випромінювання чорного та реальних тіл
- Провести перевірку фотодіодів за їх спектральною чутливістю.
- Оформити звіт до роботи.

4. Обладнання

Спектрофотометр СФ-4, лампа розжарювання (як імітатор абсолютно чорного тіла), вимірвальний прилад В7-27, фотодіоди зразковий та той, що перевіряється.

4. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

4.1. Характеристики та параметри фотоприймачів

4.1.1. Характеристики фотоприймачів

Вольт-амперна характеристика відображає залежність струму, який проходить у колі фотоприймача, від напруги на ньому. Світловий (загальний) струм $I = I_m + I_\phi$, де I_m – струм у відсутності освітленості; I_ϕ – фотострум.

Спектральна характеристика визначає реакцію фотоприймача на дію випромінювання з різною довжиною хвилі. Вона визначає спектральну область застосування приймача, а також його спектральну та інтегральну чутливість.

Енергетична (світлова) характеристика відображає залежність фото-відповіді від інтенсивності збуджуючого потоку випромінювання (ампер-ватна, вольт-ватна, люкс-амперна характеристики). Енергетичною характеристикою називають також залежність інтегральної або спектральної чутливості приймача від інтенсивності засвічування.

Температурні характеристики визначають залежність ряду параметрів (темновий струм, темновий опір, чутливість та ін.) від температури навколишнього середовища. Робоча область температур регламентується відповідними технічними умовами (ТУ) і Держстандартом. При цьому визначаються значення основних параметрів у крайніх точках робочого діапазону при робочій напрузі живлення фотоприймача.

Порогові характеристики описують здатність фотоприймача реагувати на світлові сигнали слабої інтенсивності. Значною мірою ці характеристики визначаються власними шумами приладу, які являють собою флуктуації струму, який проходить крізь нього при відсутності засвічування або при дії немодульованого світлового потоку.

Тепловий шум є білим і виявляється у вигляді невпорядкованих коливань на виводах фотоприймача. Напругу цього шуму можна зменшити навантаженням приймача узгодженим опором.

Генераційно-рекомбінаційний (дробовий) шум визначається флуктуацією концентрації і часом життя носіїв заряду.

Радіаційний шум зумовлений випадковими флуктуаціями потоку випромінювання. Спектр потужності радіаційного (фотонного) шуму має постійну амплітуду, яка несуттєво залежить від частоти.

Важливими властивостями фотоприймачів є *стабільність* – здатність зберігати фотоелектричні параметри в заданих межах протягом заданого часу і *довговічність* – здатність до довгострокової роботи в заданому режимі за умов зберігання фотоелектричних параметрів у межах норм технічних умов. Як правило, в як критерії оцінки стабільності і довговічності виступають *темновий струм* і *чутливість* (для фотодіодів) і *темновий опір* (для фоторезисторів). Довговічність, визначається в ТУ на фотоприймач, характеризує неперервний режим роботи приладу протягом визначеного часу за умов, які зазначені в методиці випробувань.

Умови роботи пристроїв, в яких використовуються фотоприймачі, часто відрізняються від нормальних. Прилади при цьому зазнають різного роду впливів механічного і кліматичного характеру (вібрація, удари, струс, лінійні прискорення, підвищена вологість, температура навколишнього середовища і т.ін.). Працездатність фотоприймачів за різних умов забезпечується рядом технологічних і конструктивних заходів і визначається в ТУ. У ТУ визначаються також умови і термін зберігання фотоприймачів і норми зміни параметрів протягом терміну зберігання.

Частотні характеристики визначаються залежністю фоточутливості від частоти модуляції світла і є *характеристикою інерційності* фотоприймача.

4.1.2. Параметри фотоприймачів

Робоча напруга фотоприймача U_p – постійна напруга, подана до фотоприймача, при якій забезпечуються номінальні параметри при довгостроковій роботі за заданих експлуатаційних умов. Її вибирають з запасом відносно пробивної напруги.

Максимально допустима напруга U_{max} – максимальне значення постійної напруги, при якому відхилення параметрів приладу від номінальних значень не перевищує встановлених меж. При роботі в імпульсному режимі U_{max} може бути збільшена.

Потужність розсіювання – вона виділяється при проходженні фотоструму, визначає нагрівання фотоприймача. Велика розсіяна потужність може привести до незворотної зміни струмів I_τ і I_ϕ . Кожний приймач

характеризується певним значенням максимальної потужності розсіювання P_{don} , яка не повинна перевищуватись. Значення P_{don} залежить від умов тепловідведення, розмірів чутливої площадки фотоприймача та інших факторів.

Темновий опір R_τ – опір фотоприймача у відсутності падаючого на нього випромінювання в межах його спектральної чутливості.

Диференційний опір R_d – відношення малих приростів напруги і струму на фотоприймачі.

Темновий струм фотоприймача I_τ – струм, що проходить крізь фотоприймач при вказаній напрузі на ньому у відсутності потоку випромінювання у межах спектральної чутливості.

Короткохвильова (довгохвильова) межа спектральної чутливості – найменша (найбільша) довжина хвилі монохроматичного випромінювання, при якій монохроматична чутливість фотоприймача дорівнює 0,1 її максимального значення.

Динамічний діапазон лінійності (в децибелах) характеризує область значень променистого потоку Φ (від Φ_{max} до Φ_{min}), для якого енергетична характеристика лінійна $\Delta = 10 \lg(\Phi_{max}/\Phi_{min})$.

Максимум спектральної характеристики фотоприймача – довжина хвилі, що відповідає максимуму чутливості фотоприймача. Положення максимуму чутливості фотоприймача залежить від об'ємного часу життя нерівноважних носіїв, швидкості поверхневої рекомбінації, геометричних розмірів світлочутливої поверхні та інших факторів.

Струмова чутливість S_i (А/лк або А/Вт) визначає значення фотоструму, який створюється одиничним потоком випромінювання. Нерідко замість потоку випромінювання, що падає на фотоприймач, задається густина падаючого потоку, яка вимірюється в Вт/м².

Вольтова чутливість S_u характеризує значення сигналу у вольтах, віднесеного до одиниці падаючого потоку випромінювання.

Токова і вольтова чутливість називаються **інтегральними**, якщо вони характеризують чутливість до інтегрального потоку випромінювання, і **моно-хроматичними**, якщо характеризують чутливість до монохроматичного випромінювання. Звичайно фотоприймачі описують або інтегральною фоточутливістю, або фоточутливістю в максимумі випромінювання ($S_{i\lambda max}$, $S_{u\lambda max}$) з вказівкою довжин хвиль, при яких фоточутливість зменшується вдвічі.

Інтегральну струмову і вольтову чутливість розраховують за формулами

$$S_i = \frac{I - I_\tau}{\Phi}; \quad S_u = \frac{U - U_\tau}{\Phi},$$

де I , U і I_τ , U_τ – загальні та темнові струми і напруги на фотоприймачі відповідно.

Питома здатність виявлення D^* ($\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$) характеризує можливість використання приймача для виявлення та реєстрації гранично малих сигналів

$$D^* = U_{\Phi} \sqrt{\Delta f \cdot S} / U_{\text{ш}} \cdot \Phi,$$

де U_{Φ} – напруга фотосигналу, В; $U_{\text{ш}}$ – напруга шуму на фотоприймачі, В; Δf – полоса пропускання частот, Гц; S – площа чутливої площадки фотоприймача, см^2 .

Порогова чутливість $P_{\text{пор}}$ визначає рівень потужності світлового потоку, при якому сигнал дорівнює шуму. Порогова чутливість і питома здатність виявлення пов'язані простим співвідношенням: $P_{\text{пор}} = \sqrt{S} / D^*$.

Крім вищеназваних параметрів, ще є такі, як **інерційність, напруга шуму фотоприймача, струм шуму фотоприймача, ефективна фоточутлива площа, ефективне поле зору фотоприймача, коефіцієнт фотоелектричного зв'язку багатоелементного фотоприймача.**

4.2. Теплове випромінювання

4.2.1. Теплове випромінювання чорного тіла

Будь-яке тверде тіло, яке має температуру, відмінну від абсолютного нуля, випромінює в оточуючий простір енергію. Виділення тілом енергії довгостроково може відбуватися тільки тоді, коли енергія тіла буде безперервно поповнюватися або випромінювання відбувається за рахунок хімічних процесів, які відбуваються у випромінюючому тілі, внаслідок яких неперервно зменшується запас внутрішньої енергії тіла.

При нагріванні, тіло можна примусити довгостроково світитися. Поширене розповсюдження як джерела випромінювання отримали тіла, які нагріваються електричним струмом, що проходить крізь них. Струм, який проходить крізь нитку розжарювання електричної лампи, поповнює втрату енергії, що втрачається внаслідок випромінювання ниткою потоку енергії.

Теплове випромінювання. Вивчення процесів випромінювання свідчить, що різні тіла, які мають одну й ту ж саму температуру, можуть мати різну енергетичну світність, якщо вони мають різні коефіцієнти поглинання. Всі тіла поділяються на три класи: *чорні, сірі і вибіркові (селективні)*.

Під **чорним тілом** розуміють тіло, яке поглинає всю падаючу на нього енергію. Коефіцієнт поглинання чорних тіл $\alpha = 1$. Часто коефіцієнт поглинання називають поглинаючою здатністю тіла. У природі чорних тіл не існує: чорний бархат має $\alpha = 0,995 \div 0,996$, у той час як крейда має $\alpha = 0,15 \div 0,22$. Незважаючи на те, що чорні тіла в природі відсутні, можна достатньо просто створити модель такого тіла. Це порожнисте тіло, внутрішня поверхня якого зафарбована в чорний колір. Через невеликий отвір потік випромінювання поступає в порожнину такого тіла, де в результаті

багаторазового відбивання повністю поглинається. Нагріваючи таке тіло, отримуємо із його отвору випромінювання чорного тіла.

Всі випромінювання реальних тіл поділяються на сірі й вибіркові (селективні). Для сірого випромінювання крива спектральної густини енергетичної світності $r_e(\lambda T)$ подібна кривій $r_{es}(\lambda T)$ спектральної густини енергетичної світності чорного тіла при однаковій температурі тіл. Для вибіркового (селективного) випромінювання крива спектральної густини енергетичної світності $r_e(\lambda T)$ не подібна $r_{es}(\lambda T)$ при однаковій температурі тіл.

Закони випромінювання чорного тіла. У 1859 р. **Р. Кірхгоф** встановив зв'язок між енергетичними світностями і інтегральними коефіцієнтами поглинання двох тіл, які мають однакову температуру: :

$$R_{e1T} / R_{e2T} = \alpha_{e1T} / \alpha_{e2T}.$$

Для ряду тіл, які мають однакову температуру, закон Кірхгофа можна записати у такому вигляді:

$$R_{e1T} / \alpha_{e1T} = R_{e2T} / \alpha_{e2T} = \dots = R_{enT} / \alpha_{enT} = R_{esT},$$

де R_{esT} , R_{e1T} , R_{e2T} , R_{enT} – енергетичні світності чорного і реального тіл, які мають постійну температуру T ; α_{e1T} , α_{e2T} , ... , α_{enT} – коефіцієнти поглинання тих самих тіл при температурі T .

Для монохроматичних потоків випромінювання закон Кірхгофа має наступний вигляд:

$$r_{e1}(\lambda T) / \alpha_1(\lambda T) = r_{e2}(\lambda T) / \alpha_2(\lambda T) = \dots = r_{en}(\lambda T) / \alpha_n(\lambda T) = r_{es}(\lambda T),$$

де $r_{es}(\lambda T)$, $r_{e1}(\lambda T)$, $r_{en}(\lambda T)$ – спектральні густини енергетичних світностей чорного тіла і різних випромінювачів для даної довжини хвилі λ і температури T ; $\alpha_1(\lambda T)$, $\alpha_2(\lambda T)$, ... , $\alpha_n(\lambda T)$ – спектральні коефіцієнти поглинання для тих самих випромінювачів для даної довжини хвилі λ і температури T .

Із закону Кірхгофа можна зробити наступні висновки:

1. Будь-яке реальне тіло випромінює з одиниці поверхні завжди менший потік випромінювання, ніж чорне тіло при тій самій температурі.
2. Спектральна густина енергетичної світності реального тіла в будь-якій області спектра завжди менша за спектральну енергетичну світність чорного тіла в тій самій області спектра при однаковій температурі реального і чорного тіл.
3. Криві $r_e(\lambda T)$ для сірого і селективного випромінювачів завжди лежать усередині кривої $r_{es}(\lambda T)$ для чорного тіла при рівності температур цих тіл.

На підставі дослідних кривих розподілу спектральної густини енергетичної світності чорного тіла **В.** він отримав аналітичний вираз, який дозволяє визначити довжину хвилі λ_{max} , на яку припадає максимум кривої $r_{es}(\lambda T)$ при даній температурі T :

$$\lambda_{max} T = C',$$

де $C' = 2896$ мкм·К. Це співвідношення називається **законом зміщення Віна**.

Із закону Віна видно, що для температури чорного тіла до 4760 К максимум кривої $r_{eS}(\lambda T)$ лежить в інфрачервоній області спектра. Для температури від 4760 до 10 000 К максимум цієї кривої зміщується у видиму частину спектра.

На основі аналізу дослідних кривих $r_{eS}(\lambda T)$ було встановлено рівняння для максимального значення спектральної густини енергетичної світності $r_{eS}(\lambda T)_{max}$ чорного тіла при даній його температурі

$$r_{eS}(\lambda T)_{max} = C'' T^5,$$

де $C'' = 1,306 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{К}^{-5}$.

У 1879 р. І. Стефан на основі аналізу даних вимірювань енергетичної світності різних тіл, проведених їм особисто і рядом дослідників, прийшов до висновку, що енергетична світність пропорційна четвертому степеню температури для будь-якого теплового випромінювача. У 1884 р. Л. Больцман довів, що ця закономірність має місце тільки для чорного тіла. Якщо відома температура чорного тіла, то за **законом Стефана – Больцмана** легко визначити його енергетичну світність

$$R_{eST} = \sigma T^4,$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$, T – температура чорного тіла, К.

Вищезазначені закони випромінювання чорного тіла отримані шляхом узагальнення експериментальних даних.

У 1900 р. М. Планку вдалося вивести залежність, яка відповідала дослідним даним у всьому діапазоні спектра

$$r_{eS}(\lambda T) = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}.$$

Цей вираз має назву **закону Планка**. Для того, щоб вивести це рівняння, Планк використав гіпотезу про квантовий характер випромінювання.

При розрахунках часто користуються **формулою Планка у відносних координатах**, оскільки вона дозволяє замінити сімейство кривих енергетичних світностей чорного тіла при різних температурах однією кривою, яку легко протабулювати (див. додаток 1). За відносні координати приймають

$$\xi = \lambda / \lambda_{max} \text{ і } \eta = r_{eS}(\lambda T) / r_{eS}(\lambda T)_{max}.$$

Тоді $\lambda = \xi \lambda_{max} = \xi C' / T$; $r_{eS}(\lambda T) = \eta r_{eS}(\lambda T)_{max} = \eta C'' T^5$. Підставивши λ і $r_{eS}(\lambda T)$ в рівняння Планка, отримаємо це рівняння у відносних координатах:

$$\eta = n \xi^{-5} \left[\exp(m / \xi) - 1 \right]^{-1},$$

де

$$n = \frac{C_1}{C'' (C')^5}; \quad m = \frac{C_2}{C'}.$$

Для розрахунків спектральної густини енергетичної світності чорного тіла користуються таблицею (див. додаток 1), в якій задаються відносні

координати η у залежності від відносних координат ξ . За допомогою такої таблиці і аналітичних виразів, які дозволяють для відомої температури T визначити значення ξ і η , можна достатньо легко визначити $r_{eS}(\lambda T)$ для заданої довжини хвилі й температури.

Теплове випромінювання реальних тіл. На даний час ми маємо можливість розрахувати спектральну густину енергетичної світності для будь-якої ділянки спектра чорного тіла.

Спектральна густина енергетичної світності для будь-якого реального випромінювача $r_e(\lambda T)$ завжди менше спектральної густини енергетичної світності чорного тіла при однаковій їх температурі. Для реальних тіл ще не встановлені аналітичні залежності, які зв'язують $r_{e\lambda T}$ з довжиною хвилі і температурою, тому для визначення $r_e(\lambda T)$ користуються функцією спектральної густини енергетичної світності чорного тіла $r_{eS}(\lambda T)$ і експериментально визначеними значеннями спектрального коефіцієнта теплового випромінювання $\varepsilon_{\lambda T}$:

$$r_e(\lambda T) = \varepsilon(\lambda T) \cdot r_{eS}(\lambda T).$$

Енергетична світність реальних тіл при даній температурі визначається через енергетичну світність чорного тіла при тій самій температурі, помножену на інтегральний коефіцієнт теплового випромінювання:

$$R_{eT} = \varepsilon_T R_{eST} = \varepsilon_T \sigma T^4,$$

де ε_T – інтегральний коефіцієнт теплового випромінювання, який залежить від температури і матеріалу випромінювача.

Для сірих випромінювачів спектральний коефіцієнт випромінювання є постійною величиною для будь-якої ділянки спектра. Прикладом сірого випромінювача може бути ацетиленове полум'я, спектральний розподіл енергії випромінювання якого подібний до спектрального розподілу енергії чорного тіла при температурі 2360 К.

5. Методика вимірювання абсолютної спектральної чутливості фотоприймачів

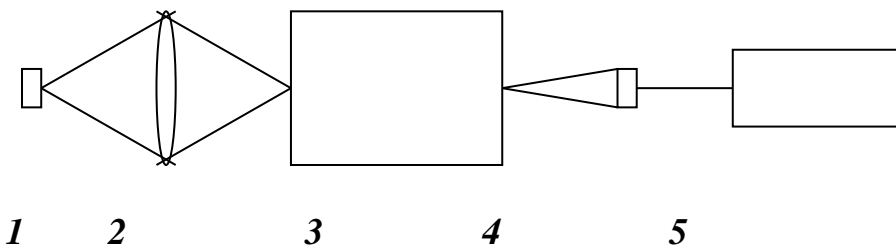
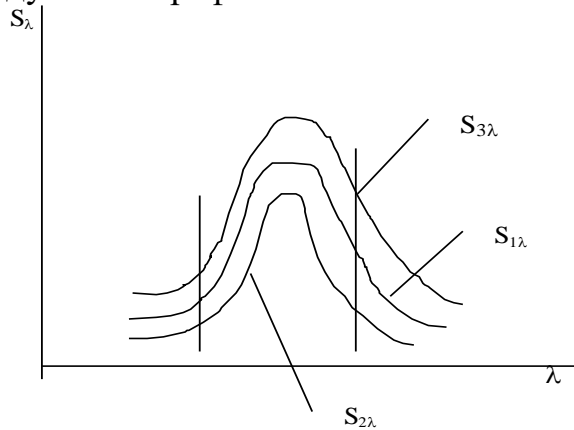


Схема установки

1 – джерело світла; 2 – конденсорна лінза; 3 – СФ-4; 4 – фотодіод;
5 – реєструючий прилад.

5.1. Освітити щілину СФ-4 так, щоб на виході приладу потік був рівномірним і з найбільшою інтенсивністю.

5.6. Побудувати графік залежності $S = S(\lambda)$ для кожного з



фотодіодів.

5.7. Вважаючи один із фотодіодів еталоном (проміжна крива), визначити придатність інших двох, виходячи з критерію, що відносна похибка спектральної чутливості не повинна перевищувати 20%.

$$|S_{1\lambda} - S_{2\lambda}| = \Delta S', \quad |S_{1\lambda} - S_{3\lambda}| = \Delta S'',$$

$$\delta_1 = \frac{\Delta S'}{S_{1\lambda}} \cdot 100\% \leq 20\%, \quad \delta_2 = \frac{\Delta S''}{S_{1\lambda}} \cdot 100\% \leq 20\%.$$

8. Зробити відповідні висновки.

6. Зміст звіту

- 6.1. Назва, мета та завдання до роботи.
- 6.2. Коротка теоретична частина, що дає відповіді на контрольні запитання.
- 6.3. Розрахункова таблиця, графіки, аналіз даних.
- 6.4. Висновки.

7. Контрольні запитання

- 7.1. Що таке абсолютна та відносна спектральна чутливість фотоприймача?
- 7.2. Що таке інтегральна та монохроматична чутливості, їх одиниці чутливостей?
- 7.3. Що таке порогова чутливість фотоприймача і від чого вона залежить?
- 7.4. Для чого в роботі використовується лампа розжарення з відомою кольоровою температурою?
- 7.5. Що таке енергетична світність і як вона визначається за формулою Планка?
- 7.6. Як вводяться відносні координати для формули Планка?
- 7.7. Які режими роботи фотодіода існують і який режим використовується при визначенні спектральної чутливості?
- 7.8. Для чого в роботі необхідно врахувати дисперсію спектрального прилада?

8. Список літератури

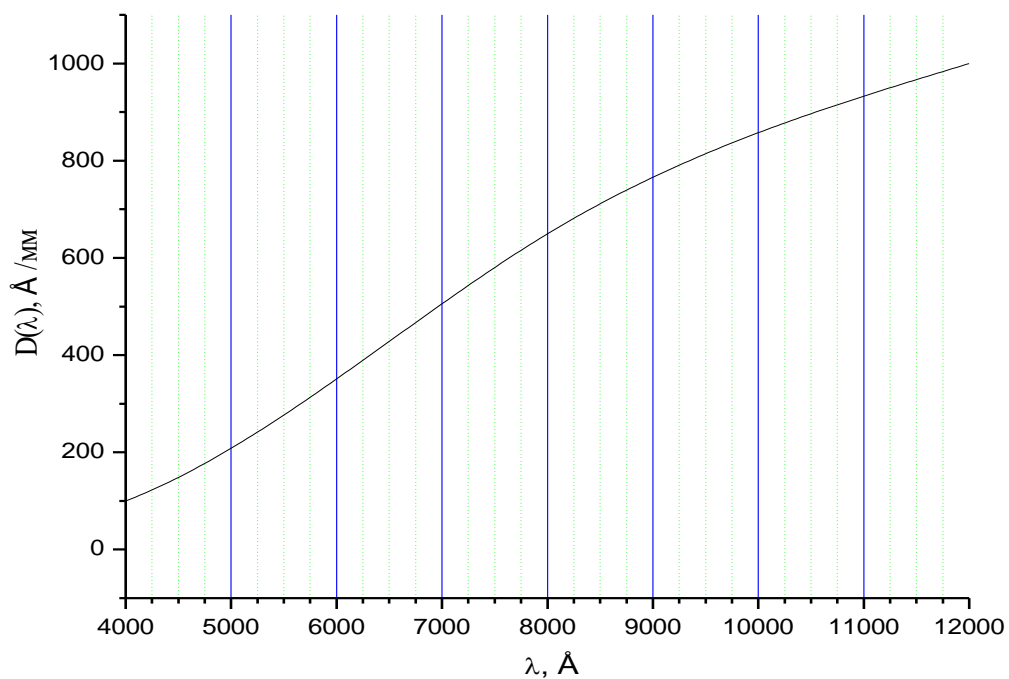
- 8.1. Анисимова И. Д. Полупроводниковые фотоприёмники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И. Д. Анисимова, И. М. Викулин, Ф. А. Зайтов, Ш. Д. Курмашев; Под ред. проф. В. И. Стафеева. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.
- 8.2. Гуторов М. М. Основы светотехники и источники света. Учебн. пособие для вузов / М. М. Гуторов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.
- 8.3. Солтис І.В. , Деревянчук О.В. Основи метрології / автори.: І.В Солтис, О.В. Деревянчук. - Чернівці: Чернівецький нац. ун-тет, 2021, 152 с.

Додаток 4.1

Значення спектральних коефіцієнтів пропускання СФ-4

Довжина хвилі λ , мкм	Коефіцієнт пропускання СФ-4, τ	Довжина хвилі λ , мкм	Коефіцієнт пропускання СФ-4, τ	Довжина хвилі λ , мкм	Коефіцієнт пропускання СФ-4, τ
0,42	0,41	0,66	0,56	0,90	0,30
0,43	0,42	0,67	0,54	0,91	0,30
0,44	0,43	0,68	0,53	0,92	0,30
0,45	0,44	0,69	0,52	0,93	0,30
0,46	0,45	0,70	0,51	0,94	0,30
0,47	0,45	0,71	0,50	0,95	0,30
0,48	0,45	0,72	0,50	0,96	0,30
0,49	0,45	0,73	0,50	0,97	0,30
0,50	0,51	0,74	0,50	0,98	0,30
0,51	0,51	0,75	0,48	0,99	0,30
0,52	0,52	0,76	0,46	1,00	0,30
0,53	0,52	0,77	0,43	1,01	0,30
0,54	0,55	0,78	0,40	1,02	0,30
0,55	0,55	0,79	0,36	1,03	0,30
0,56	0,58	0,80	0,33	1,04	0,30
0,57	0,58	0,81	0,33	1,05	0,30
0,58	0,61	0,82	0,32	1,06	0,30
0,59	0,61	0,83	0,32	1,07	0,30
0,60	0,62	0,84	0,32	1,08	0,30
0,61	0,62	0,85	0,32	1,09	0,30
0,62	0,62	0,86	0,30	1,10	0,30
0,63	0,61	0,87	0,30	1,11	0,30
0,64	0,60	0,88	0,30	1,12	0,30
0,65	0,58	0,89	0,30	1,13	0,30

Додаток 4.2



$\lambda, \text{Å}$	$D(\lambda), \text{Å/мм}$	$\lambda, \text{Å}$	$D(\lambda), \text{Å/мм}$	$\lambda, \text{Å}$	$D(\lambda), \text{Å/мм}$
4000	100	6500	430	9000	760
4250	120	6750	470	9250	790
4500	150	7000	500	9500	810
4750	175	7250	540	9750	840
5000	205	7500	575	10000	860
5250	245	7750	610	10250	880
5500	275	8000	650	10500	900
5750	315	8250	680	10750	920
6000	350	8500	710	11000	935
6250	390	8750	740		

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ПРЯМИХ БАГАТОРАЗОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ НОРМАЛЬНО РОЗПОДІЛЕНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

1. Мета роботи

Вивчити і отримати практичні навички в обрахунку нормально розподілених експериментальних даних прямих багаторазових вимірювань.

2.Завдання

- 2.1. Ознайомитись із теорією до лабораторної роботи.
- 2.2. Скласти план обробки прямих багаторазових вимірювань.
- 2.3. Провести вимірювання діаметру деталі за допомогою мікрометра.
- 2.4. Обробити отримані експериментальні дані згідно з попередньо складеним планом.
- 2.5. Оформити звіт до роботи.

3. Обладнання

Мікрометр, деталь для вимірювання.

4. Теоретична частина

4.1. Обробка результатів прямих багаторазових вимірювань

Пряме вимірювання – це вимірювання, при якому шукане значення величини знаходять безпосередньо з дослідних даних. Наприклад, вимірювання температури термометром, сили струму – амперметром, проміжку часу секундоміром – і т.ін.

Багаторазові вимірювання – це вимірювання, при яких результат знаходять з експериментальних даних шляхом їх математичної обробки. При багаторазових вимірюваннях повинно бути не менше 4-х експериментальних даних, бо лише в цьому випадку ряд вимірювань може бути оброблений відповідно до вимог математичної статистики.

Існують традиційні класичні та більш сучасні нові статистичні методи обробки експериментальних даних, такі як робастні, непараметричні, конфлюентні методи та ін. Зупинимося лише на класичних статистичних методах обробки експериментальних даних.

Припустимо, що деяка незмінна величина вимірюється з допомогою ряду окремих спостережень, які виконуються з однаковою ретельністю в однакових умовах одним оператором. Як наслідок отримано n результатів, дещо відмінних одне від одного з числовими значеннями: x_1, x_2, \dots, x_n . Такий ряд називається *рівноточним*.

Оскільки виконується вимірювання певного параметра конкретного об'єкта, то існує деяке істинне значення цього параметра, яке неможливо

визначити через наявність систематичних і випадкових похибок окремих вимірювань.

Аналогічна сукупність значень x_i може бути отримана і в результаті вимірювання одного і того ж параметра, але деякої множини об'єктів, які, зазвичай повинні бути абсолютно однаковими, однак через похибки як їх виготовлення, так і вимірювання, відрізняються одна від одної. Такий ряд називається *стохастичним*, його відмінність від рівноточного полягає в тому, що істинного значення вимірюваного параметра не існує, оскільки воно є математичною абстракцією, а кожний об'єкт має своє значення цього параметра.

Нагадаємо, що оцінки вимірюваної величини та її похибки, отримані з експериментальних даних, вважаються найкращими, якщо вони незміщені, добротні та ефективні.

Основні вимоги до обробки результатів прямих багаторазових вимірювань викладені в ГОСТ 8.207–76.

4.1.1. Обробка нормально розподілених даних

Статистичну обробку результатів спостережень здійснюють у такій послідовності:

4.1.1.1. Здійснюють попередню обробку результатів вимірювань.

4.1.1.2. Обчислюють середнє арифметичне виправлених результатів спостережень, яке вважають результатом вимірювання. Середнє арифметичне знаходять за формулами:

$$\tilde{A} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

$$\tilde{A} = \bar{x} = c + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - c),$$

де c – округлене число, близьке за значенням до \bar{x} .

Якщо у всіх результатах спостережень міститься постійна систематична похибка, допускається виключати її після обрахунку середнього арифметичного невиправлених результатів спостережень.

4.1.1.3. Перевіряють відповідність експериментального закону розподілу теоретичному нормальному за критеріями відповідності згідно з п. 4.2.5-4.2.7. Якщо відповідність підтверджується, то подальший розрахунок продовжують згідно з даним пунктом, якщо ні, то згідно з пунктом 4.2.

4.1.1.4. Вираховують середньоквадратичне S окремого результату спостереження. Згідно з ГОСТ 11.004–74 (СТ СЭВ 876–78), його звичайно обраховують за формулою Бесея

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

Для більш точних розрахунків S використовують формулу

$$S = M_k \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

де M_k – поправковий коефіцієнт, який береться з відповідних таблиць (див. додаток 5.1) у залежності від $k = n - 1$.

4.1.1.5. Обчислюють середнє квадратичне відхилення результату вимірювання $S(\tilde{A})$ за формулою

$$S(\tilde{A}) = S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

4.1.1.6. Визначають довірчі границі випадкової складової похибки результату вимірювання.

Для нормального розподілу довірчий інтервал ε є симетричним відносно величини \bar{x} і обчислюється за формулою

$$\varepsilon = t_\gamma \cdot S_{\bar{x}},$$

де t_γ – коефіцієнт довіри або коефіцієнт Стюдента, який у залежності від довірчої ймовірності γ і числа ступенів свободи $k = n - 1$ знаходять за таблицями (див. додаток 5.1).

Звичайно вважають, що довірча ймовірність γ дорівнює 0,95. У тих випадках, коли вимірювання неможливо повторити, крім границь, що відповідають довірчій ймовірності $\gamma = 0,95$, допускається вказувати границі для довірчої ймовірності $\gamma = 0,99$. В особливих випадках, наприклад при вимірюваннях, результати яких мають значення для здоров'я людей, допустимо замість 0,99 брати більш високу довірчу ймовірність, зокрема 0,999 (ГОСТ 8.207–76).

4.1.1.7. Визначають довірчі границі θ невиключених залишків систематичної складової похибки результату вимірювання

Результат кожного i -го вимірювання x_i може містити в собі як систематичну, так і випадкову похибку. Систематичну похибку намагаються усунути, використовуючи спеціальні прийоми виключення. В окремих випадках, коли є можливість оцінити систематичну похибку, то в експериментальні дані вносять поправку. Систематичні похибки, які не піддаються виключенню, а також похибки поправок, що вносяться, та інші похибки складають невиключені систематичні похибки експериментальних даних, які подаються границями θ_i .

Отже, невиключена систематична похибка результату вимірювання утворюється зі складових, якими можуть бути невиключені систематичні

похибки методу, засобів вимірювань, похибки поправок та викликані іншими джерелами.

Границями складових невиключеної систематичної похибки вважають, наприклад, границі допустимих основних і додаткових похибок засобів вимірювання, якщо випадкові складові похибки нехтовно малі, похибки поправок, які використовуються для компенсації систематичних похибок, похибки використовуваних констант і т.п.

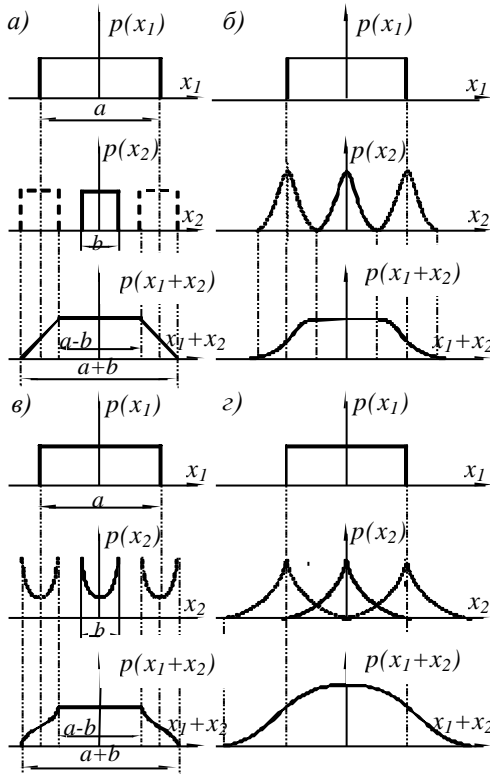


Рис. 5.1. Приклади побудови композиції (суми) $p(x_1+x_2)$ двох випадкових величин з розподілами $p(x_1)$ і $p(x_2)$:

а) двох рівномірних розподілів, б) рівномірного і нормального, в) рівномірного та арксинусоїдального, г) рівномірного і розподілу Лапласа

При сумуванні складових невиключеної систематичної похибки результату вимірювання невиключені систематичні похибки засобів вимірювання кожного типу і похибки поправок слід розглядати як випадкові величини. При відсутності даних про вид розподілу цих випадкових величин їх розподіл вважають рівномірним.

Границі сумарної невиключеної систематичної похибки θ результату вимірювання вираховують шляхом побудови композиції її компонент: невиключених систематичних похибок засобів вимірювання, методу і похибок, викликаних іншими джерелами.

Закон розподілу суми незалежних випадкових величин $p(x)=p(x_1+x_2)$, які мають розподіли $p_1(x)$ і $p_2(x)$, називається композицією і виражається інтегралом згортки.

$$p(x) = p(x_1 + x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(z) p_2(x - z) dz \quad (5.1)$$

Таким чином, термін “композиція” – це синонім терміна “сума”, але стосовно випадкових величин. При утворенні композиції двох випадкових величин відбувається суттєва зміна форми їх законів розподілу. Так, наприклад, при сумуванні двох рівномірно розподілених похибок (випадкових величин) з шириною розподілів $a > b$ (рис. 5.1, а) результуюча похибка має розподіл у формі трапеції з верхньою основою $a - b$ та нижньою $a + b$. Цю деформацію можна уявити собі більш наочно як “розмивання” різко обмежених кінців більш широкого розподілу шириною a на величину протяжності b менш широкого розподілу, як це зображено на рис. 5.1, а штриховими лініями. Композиція двох однакових (з шириною a) рівномірних розподілів трикутна (так званий розподіл Сімпсона), оскільки в цьому випадку верхня основа трапеції перетвориться в нуль, а нижня у $2a$.

Так само утворюється і композиція рівномірного та нормального розподілів (рис. 5.1, б) з тією лише відмінністю, що підйом і спад на краях результуючого розподілу відбувається по кривій інтегрального закону нормального розподілу, аналогічно тому, як на рис. 5.1, а він відбувається по кривій інтегрального закону рівномірного розподілу (по прямій лінії).

Утворення композиції рівномірного розподілу шириною a та арксинусоїдального розподілу шириною b зображено на рис. 5.1, в. Композиція являє собою криволінійну трапецію з верхньою основою $a - b$ та нижньою $a + b$ і спадами по кривих інтегрального закону арксинусоїдального розподілу (функція арксинуса). Композиція рівномірного розподілу та розподілу Лапласа (двосторонній експоненціальний розподіл) зображена на рис. 5.1, г і має довгі, полого спадаючі "хвости" кривої результуючого розподілу.

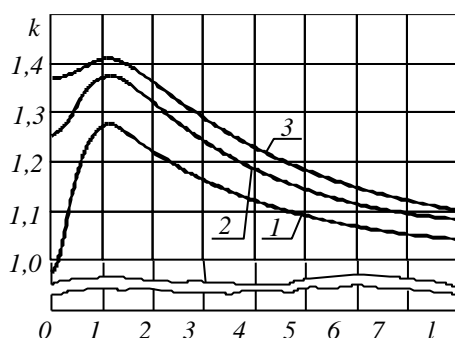


Рис. 5.2. Графік залежності $k=f(m,l)$:
1 - $m=2$; 2 - $m=3$; 3 - $m=4$

Розподіли, показані на рис. 5.1, побудовані без дотримання відносного масштабу кривих по вертикалі. Цей масштаб визначається кожний раз тим, що площа під будь-якою з кривих густини ймовірності повинна дорівнювати одиниці.

Будувати композицію кожний раз важко, тому здебільшого припускають, що невиключені систематичні похибки всередині власних заданих границь θ_i розподілені за рівномірним законом. А при рівномірному розподілі невиключених систематичних похибок довірчі границі невиключеної систематичної похибки результату вимірювання $\theta(P)$ без урахування знака обчислюють згідно з ГОСТ 8.207-76 за формулою

$$\theta(P) = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2}, \quad (5.2)$$

де k – коефіцієнт, який визначається прийнятою довірчою ймовірністю P і залежить від кількості складових m невиключених систематичних похибок, а також від їх співвідношення між собою; θ_i – границя i -ої невиключеної систематичної похибки.

Якщо значення θ_i суттєво відрізняються одне від одного, наприклад, на два порядки або ще більше, то менші з них слід відкинути, а ті, що залишились, просумувати згідно з (5.2).

Внаслідок того, що при довірчих ймовірностях $P = 0,90$ і $P = 0,95$ значення поправкового коефіцієнта k мало чутливе до зміни числа m невиключених систематичних похибок та їх співвідношення між собою, то при довірчій ймовірності $P = 0,90$ вважають, що поправковий коефіцієнт k дорівнює 0,95, а при $P = 0,95$ – $k = 1,1$.

При довірчій ймовірності $P = 0,99$ вважають, що поправковий коефіцієнт дорівнює 1,4, якщо кількість сумованих складових $m \geq 5$. Якщо кількість

складових $m \leq 4$, то коефіцієнт k визначається за графіком (рис. 5.2) залежності

$$k = f(m, l), \quad (5.3)$$

де m – кількість сумованих систематичних похибок; $l = \theta_1 / \theta_2$, причому $\theta_1 \leq \theta_2 \leq \theta_3 \leq \theta_4$.

Довірчу імовірність P для обчислення границь невиключеної систематичної похибки, як правило, вважають такою ж, що і при обчисленні довірчих границь випадкової похибки результату вимірювання.

4.1.1.8. Визначають довірчі границі загальної похибки результату вимірювання

Довірча границя Δ загальної похибки результату вимірювання \tilde{A} при наявності сукупності як невиключеної систематичної, так і випадкової складових похибки, відповідно до ГОСТ 8.207–76, визначається в залежності від співвідношення між ними, тобто між величинами θ і $S_{\bar{x}}$:

– якщо $\theta / S_{\bar{x}} < 0,8$, то невиключеними систематичними похибками порівняно з випадковими нехтують і вважають, що границя похибки результату $\Delta = \varepsilon$.

– якщо $\theta / S_{\bar{x}} > 8$, то нехтують випадковою похибкою в порівнянні з систематичною, і тоді відповідно $\Delta = \theta$.

Зазначимо, що похибка, яка виникає через нехтування однією із складових похибки результату вимірювання при виконанні вищевказаних нерівностей, не перевищує 15%.

– якщо $0,8 \leq \theta / S_{\bar{x}} \leq 8$, то суттєвий внесок у похибку результату вимірювання вносять як випадкові, так і невиключені систематичні похибки. Для знаходження похибки результату вимірювання в цьому випадку потрібно побудувати композицію розподілів випадкових і невиключених систематичних похибок відповідно до з 4.1.1.7. Однак побудова композиції пов'язана зі значними труднощами, тому, згідно з ГОСТ 8.207–76 допускається границі похибки результату вимірювання Δ (без врахування знаку) обчислювати за формулою

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma}, \quad (5.4)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від співвідношення випадкової і невиключеної систематичної похибок; S_{Σ} – оцінка сумарного середнього квадратичного відхилення результату вимірювання.

Коефіцієнт K обчислюють за емпіричною формулою

$$K = \frac{\varepsilon + \theta}{S_{\bar{x}} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3}}}, \quad (5.5)$$

а оцінку сумарного середнього квадратичного відхилення результату вимірювання – за формулою

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3} + S_{\bar{x}}^2}. \quad (5.6)$$

4.1.1.9. Записують результат прямого багаторазового вимірювання

Згідно з ГОСТ 8.011–72 при симетричній довірчій похибці результат вимірювання подають у формі

$$\tilde{A} \pm \Delta, P, \quad (5.7)$$

де \tilde{A} – результат вимірювання. Причому числове значення результату вимірювання повинно закінчуватися цифрою того ж розряду, що й значення похибки Δ , а значущих цифр у похибки результату повинно бути не менше двох. Якщо довірна імовірність $P = 0,95$, то її можна не писати.

4.2. Попередня обробка результатів вимірювань

Основні завдання попередньої обробки експериментальних даних такі:

- виключення спостережень, які містять грубі похибки;
- виключення або зменшення впливу систематичної складової похибки вимірювання;
- групування експериментальних даних, якщо їх більше 50, для спрощення і зменшення обсягу подальших обчислень та попередньої оцінки виду розподілу;
- встановлення виду розподілу експериментальних даних з метою правильного вибору методу обчислення вимірюваної величини та її похибок.

4.2.1. Виключення грубих похибок

Перш за все, із сукупності експериментальних даних слід виключити результати спостережень, які містять явно виражені грубі похибки і тому помітно відмінні від інших. Якщо повної впевненості в наявності грубої похибки немає, такий результат слід залишити у вибірці, а потім перевірити правомірність цього віднесення до неї за допомогою відповідних статистичних критеріїв. Їх є кілька. Ми пропонуємо вам лише один, згідно з ГОСТ 11.002–73. Цей статистичний критерій виявлення аномальних результатів спостереження базується на припущенні про те, що вибірка даних належить нормальному розподілу. Для того, щоб перевірити, чи містить суттєво відмінний експериментальний показ x_k грубу похибку, вираховують *показник аномальності*

$$V_k = \left| \frac{(x_k - \bar{x})}{S} \right|, \quad (5.8)$$

де \bar{x} – середньоарифметичне вибірки згідно з $\tilde{A} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; S – середньоквадратичне відхилення окремого показу згідно з

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

Потім, задавшись довірчою імовірністю γ (як правило $\gamma = 0,95$), для даного обсягу вибірки n з відповідних таблиць (див. додаток 5.1) знаходять параметр β . Якщо результат x_k належить до даної нормальної сукупності, то з імовірністю γ можна стверджувати, що абсолютне значення показника аномальності V_k не перевершить β . Тобто критерій аномальності – умова $V_k \geq \beta$. Якщо ця умова виконується, то ймовірність даного результату спостереження x_k менша за $\alpha = 1 - \gamma$. Отже, таке спостереження аномальне і повинно бути виключене з даної вибірки. α – це рівень значущості даного критерію, під яким розуміють найбільшу ймовірність α , з якою даний критерій (гіпотеза) може дати помилковий результат. Деякі таблиці для β складені в залежності від α .

Якщо після виключення одного різко відмінного показу викликає сумнів ще якийсь показ, то вказаний порядок дій повторюють, але вже при обчисленні \bar{x} , S , V_k не враховується раніше виключений показ x_k .

4.2.2. Способи виключення систематичних похибок

Систематичні похибки найбільш суттєво спотворюють результат вимірювання. Для зменшення систематичної складової похибки вимірювання універсальних способів не існує. Виявлення, оцінка і усунення такої похибки багато в чому залежить від кваліфікації експериментатора, причому при багаторазових вимірюваннях зменшити систематичну похибку легше, ніж при одноразових.

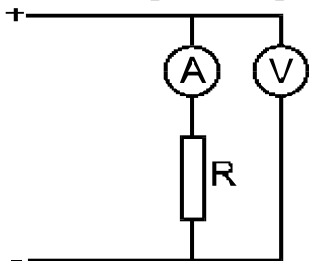


Рис. 5.3. Непряме вимірювання опору R за допомогою амперметра і вольтметра

Розрізняють такі систематичні похибки:

- похибки засобів вимірювання;
- похибки, зумовлені дією впливаючих величин;
- похибки методу;
- похибки, що виникають внаслідок неточності дій оператора;
- похибки через неадекватність моделі вимірювань об'єкта вимірювань.

Систематичні похибки можна виключити або безпосередньо в процесі вимірювання (експериментальне виключення), або внесенням поправок у результат вимірювання (аналітичне виключення).

4.2.2.1. Аналітичне виключення систематичних похибок

Поправкою Δ_{II} називається значення величини, одноіменне з вимірюваною, яке сумується зі значенням, отриманим при вимірюванні, з метою виключення систематичної похибки.

При введенні поправки рівняння вимірювання буде мати вигляд

$$x = X + \Delta x_C + \Delta_{II}, \quad (5.9)$$

де x – виміряне, а X – істинне значення величини. Якщо $\Delta_{II} = -\Delta x_C$, то систематична похибка виключається.

Нехай, наприклад, **систематична похибка визначається неточністю міри**: при зважуванні на вагах використовується гиря з номінальним значенням $x_{ном}=100$ г, а перевірка цієї гирі, проведена з максимально можливою точністю, показала, що дійсне значення маси цієї гирі $x_{\partial}=101$ г. Абсолютна похибка гирі буде

$$\Delta x = x_{ном} - x_{\partial}, \quad (5.10)$$

і дорівнюватиме $\Delta x = -1$ г. *Поправка чисельно дорівнює модулю абсолютної похибки міри, але протилежна за знаком.* Отже, отримані результати зважування за допомогою даної гирі необхідно скоректувати введенням поправки $\Delta_{II} = +1$ г.

Якщо **систематична похибка визначається неправильним градуванням вимірювального приладу**, необхідно провести перевірку даного приладу і визначити значення абсолютних похибок по всій довжині його шкали. Значення абсолютних похибок вимірювального приладу визначають за формулою

$$\Delta x = x_{II} - x, \quad (5.11)$$

де x_{II} – покази приладу, що повіряється; x – дійсне значення величини, визначене за допомогою зразкового приладу.

Потім складається таблиця поправок для різних точок шкали приладу, що повіряється (як і в попередньому випадку поправки протилежні за знаком до похибок).

Систематичні похибки можуть зумовлюватись недосконалістю методу вимірювання. Нехай, наприклад, проводиться вимірювання електричного опору резистора R за допомогою амперметра і вольтметра за схемою, зображеною на рис. 5.3. Через амперметр протікає такий же струм, як і через резистор, а покази вольтметра дорівнюють сумі спаду напруги на даному резисторі і на амперметрі. Для виключення систематичної похибки методу вимірювання потрібно від показів вольтметра відняти значення спаду напруги на амперметрі. Якщо внутрішній опір амперметра r_A , то спад напруги на ньому для різних значень струму I можна визначити за формулою $U_A = I r_A$. Тобто шуканий опір

$$R = \frac{U - I r_A}{I}, \quad (5.12)$$

де U – покази вольтметра.

До систематичних похибок методу належать також похибки, що виникають внаслідок *обмеженої точності емпіричних формул*, що використовуються для опису явища, покладеного в основу вимірювання, а також *обмеженої точності в рівняннях фізичних констант*, що використовуються. Оцінки похибок формул і фізичних констант найчастіше відомі. При вказуванні похибки результату вимірювання їх характеризують невиключеними систематичними похибками.

4.2.2.2. Експериментальне виключення систематичних похибок

Використовуючи *метод заміщення*, можна виявити систематичну похибку в процесі вимірювання. Для цього слід спочатку виміряти невідому величину, в результаті чого отримаємо

$$x_{II} = X + \Delta x_C, \quad (5.13)$$

де X – значення невідомої величини; x_{II} – покази вимірювального приладу; Δx_C – систематична складова похибки.

Нічого не змінюючи у вимірювальній установці, підключаємо замість X міру X_M , що регулюється, і підбираємо таке її значення, при якому досягаються попередні покази вимірювального приладу. Тоді

$$x_{II} = X_M + \Delta x_C. \quad (5.14)$$

Зіставляючи (5.13) і (5.14) отримаємо значення невідомої величини:

$$X = X_M, \quad (5.15)$$

і обчислюємо, згідно з (5.13), значення систематичної складової похибки:

$$\Delta x_C = x_{II} - X_M. \quad (5.16)$$

Якщо джерело систематичної похибки має *напрявлену дію*, то можна компенсувати її так, щоби систематична похибка ввійшла до результату вимірювання з протилежними знаками

$$x_{II1} = X + \Delta x_C; \quad x_{II2} = X - \Delta x_C. \quad (5.17)$$

Звідки отримуємо

$$X = \frac{x_{II1} + x_{II2}}{2}; \quad \Delta x_C = \frac{x_{II1} - x_{II2}}{2}. \quad (5.18)$$

Наприклад, щоб запобігти впливу зовнішнього магнітного поля Землі при вимірюваннях магнітної індукції та інших величин, які піддаються впливу зовнішніх магнітних полів, вимірювання виконують кілька разів. При цьому здійснюють повороти вимірюваного об'єкта навколо осей системи координат. Результатом вимірювань вважають середнє арифметичне отриманих даних.

4.2.2.3. Рандомізація

Нерідко похибки, систематичні в одній ситуації, будуть випадковими в іншій. Наприклад, інструментальна похибка конкретного екземпляра вимірювального приладу є систематичною у всіх випадках використання

цього приладу при вимірюваннях. А при характеристиці точності виготовлення деякої партії таких приладів ця ж похибка випадкова.

Цю обставину інколи можна використовувати для підвищення правильності вимірювань. Так, наприклад, якщо причини систематичних похибок відомі, але їх абсолютні значення і знак невідомі, підвищити правильність вимірювань можна за допомогою рандомізації. *Рандомізація* – це штучне переведення систематичних похибок у випадкові.

Буквальне значення терміна “рандомізація”, який походить з англійської, – “перемішування, створення хаосу”. Для створення умов рандомізації вимірювання організують так, щоб фактори, які викликали систематичні похибки, що впливають на результат вимірювання, діяли неоднаково, причому результат їх дії мав би випадковий характер.

Так, наприклад, неточне встановлення на нуль шкали вимірювального приладу приводить до появи систематичних похибок, постійних для даного приладу; якщо ж взяти кілька аналогічних приладів, то зміни цих похибок від приладу до приладу будуть випадковими. Вимірявши вищезазначену фізичну величину кількома однотипними вимірювальними приладами, можна суттєво зменшити систематичну складову похибки результату вимірювання.

Другий приклад. Систематичні похибки, що виникають через неточність дій оператора, також можна зменшити, використовуючи рандомізацію. Поява таких похибок пояснюється індивідуальними особливостями оператора. Неточні дії оператора можуть привести до запізнілої або випередженої реєстрації якогось сигналу, асиметрії при встановленні вказівника між двома штрихами тощо. Ці похибки можна перевести в розряд випадкових шляхом проведення вимірювань кількома операторами. Результатом вимірювання вважають усереднене значення отриманих даних.

З усіх наведених прикладів видно, що для усунення систематичної похибки слід знати характер впливу, який викликав цю похибку, і залежність значення систематичної похибки від цього впливу. Ретельне вивчення умов проведення експерименту зумовлює до підвищення точності отриманих результатів завдяки виключенню систематичних похибок. Зазначимо, що якість вимірювань, яка відображає близькість до нуля систематичних

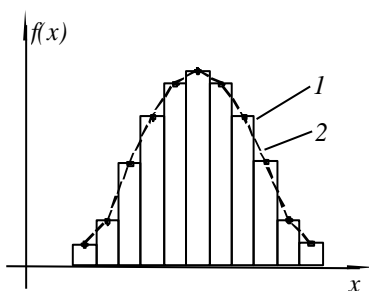


Рис. 5.4 Графічне зображення розподілу експериментальних даних у вигляді гістограми (1) та полігону (2)

похибок в їх результатах, називається *правильністю вимірювань*.

Виявити всі систематичні похибки неможливо, і після використання розглянутих прийомів у результатах вимірювань залишаються *невиключені залишки систематичних похибок*.

Оптимальними умовами для виконання вимірювань будуть такі, при яких невиключені залишки систематичних похибок θ , а також випадкова складова результату вимірювання, що визначається $S_{\bar{x}}$, будуть приблизно однаковими.

Тільки в цьому випадку точність приладів і самого методу будуть відповідати оптимальним умовам проведення вимірювань. Якщо $\theta \gg S_{\bar{x}}$, то використовувані прилади і методи занадто грубі, і збільшення кількості спостережень n не підвищить точності результату вимірювань. При $\theta \ll S_{\bar{x}}$ збільшення обсягу вибірки позитивно впливатиме на точність результату; кількість n доцільно збільшувати доти, доки $S_{\bar{x}}$ не зменшиться до величини θ .

4.2.3. Критерій χ^2 (Пірсона)

Критерій Пірсона використовують при кількості спостережень $n > 200$ і лише у виняткових випадках при $n > 100$. Результати вимірювання деякої величини X розміщують у порядку зростання $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$. Вимірювання повинні проводитись з однаковою ретельністю, за одних і тих самих умов, одним оператором.

За даними вимірювання обчислюють розмах $x_n - x_1$ і утворюють r однакових інтервалів шириною

$$h = \frac{x_n - x_1}{r}. \quad (5.19)$$

Кількість інтервалів r вибирають у залежності від обсягу вибірки n :

$$\begin{aligned} \text{При } n = 200; & \quad r = 18-20; \\ n = 400; & \quad r = 25-30; \\ n = 1000; & \quad r = 35-40. \end{aligned}$$

При $100 < n < 200$ критерій χ^2 використовують у виняткових випадках із кількістю інтервалів $r = 15-18$. Наприклад, якщо при перевірці за якимось іншим критерієм гіпотеза прийнята при рівні значущості 0,1 і відкинута при рівні 0,05, то в цьому випадку можна додатково використати критерій χ^2 .

Для зручності дані для перевірки відповідності дослідного і теоретичного розподілів за критерієм χ^2 записують у таблицю 5.1.

Результати вимірювань x_i групують по інтервалах і підраховують частоти m_j попадання x_i в j -тий інтервал. Порядковий номер інтервалу j записуємо в перший стовпчик таблиці, а частоти m_j – у другий.

Визначають значення x_j ($j = 1, 2, \dots, r$), які дорівнюють серединам інтервалів групування, і заносять їх у 3-ій стовпчик.

Далі підраховують теоретичні частоти n_j , тобто знаходять кількість даних, яка повинна була б бути в j -му інтервалі, якщо б їх розподіл відповідав вибраному за гіпотезою:

$$n_j = nhf(x_j). \quad (5.20)$$

Отримані значення заносять у 4-й стовпчик. У 5-му стовпчику для кожного інтервалу обчислюють

$$\chi_j^2 = \frac{(m_j - n_j)^2}{n_j}. \quad (5.21)$$

Таблиця 5.1

$б j$	m_j	x_j	$n_j = f(x_j) \cdot h \cdot n$	$\chi_j^2 = \frac{(m_j - n_j)^2}{n_j}$
1	2	3	4	5
1				
2				
⋮				
r				
	$\sum_{j=1}^r m_j = n$			$\chi^2 = \sum_{j=1}^r \frac{(m_j - n_j)^2}{n_j}$

Просумувавши χ_j^2 по всіх r інтервалах, визначають критерій

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^r \frac{(m_j - n_j)^2}{n_j}. \quad (5.22)$$

Для перевірки відповідності дослідного і теоретичного розподілів за критерієм χ^2 , задаються довірчою ймовірністю γ того, що обчислене значення χ^2 , отримане внаслідок випадкових відхилень частот дослідного розподілу від відповідних частот теоретичного розподілу, буде меншим від теоретичного значення $(\chi^*)^2$, обчисленого для довірчої ймовірності γ . За відповідними таблицями (див. додаток 5.1) для довірчої ймовірності γ і кількості степенів свободи $k = r - 1$ знаходять значення $(\chi^*)^2 / k$, обчислюють $(\chi^*)^2$ і порівнюють з ним значення χ^2 . Якщо χ^2 буде менше $(\chi^*)^2$, то з прийнятою довірчою ймовірністю γ гіпотезу про відповідність дослідного і теоретичного розподілів приймають, в протилежному випадку відкидають.

4.2.4. Критерій ω^2 (Мізеса – Смірнова)

Даний критерій використовують, якщо кількість спостережень більше 50 і, обов'язково, якщо менше 200. При кількості спостережень більше 200 критерій ω^2 використовують тільки у випадках, коли результати перевірки за

іншими критеріями не дозволяють зробити висновок про відповідність дослідного і теоретичного розподілів. Наприклад, якщо при перевірці за критерієм χ^2 гіпотеза прийнята з довірчою ймовірністю 90% і відкинута при 95%, то в цьому випадку слід додатково використати критерій ω^2 .

Обчислення за критерієм ω^2 проводять у наступному порядку: визначають значення Ω_n^2 за формулою

$$\Omega_n^2 = -n - 2 \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{2i-1}{2n} \ln F(x_i) + \left(1 - \frac{2i-1}{2n} \right) \ln [1 - F(x_i)] \right\}, \quad (5.23)$$

де x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – результат вимірювання, який має i -тий номер у варіаційному ряді $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$; $F(x_i)$ – значення інтегральної функції теоретичного розподілу згідно з гіпотезою, відповідність якій ми перевіряємо, при значенні аргументу x_i .

Всі проміжні обчислення, згідно з (5.23), проводять із точністю до п'яти значущих цифр, округлюючи кінцевий результат до двох значущих цифр. Потім із відповідних таблиць (див. додаток 5.1) знаходять значення функції a , яка відповідає обчисленому значенню Ω_n^2 . Функція a являє собою функцію розподілу величини Ω_n^2 . Після цього задаються рівнем значущості α . Якщо $a < (1-\alpha)$, тобто $a < \gamma$, то гіпотезу приймають, якщо $a \geq (1-\alpha)$, тобто $a \geq \gamma$, то гіпотезу про відповідність дослідного і теоретичного розподілів відкидають.

4.2.5. Складовий критерій

При кількості результатів спостереження $10 < n < 50$ нормальність їх розподілу перевіряють за допомогою складового критерію згідно з ГОСТ 8.207-76.

Складовий критерій складається з двох критеріїв. Якщо при перевірці нормальності розподілу результатів спостереження для критерію 1 вибрано рівень значимості α_1 , а для критерію 2 – α_2 , то результуючий рівень значущості складового критерію буде

$$\alpha \leq \alpha_1 + \alpha_2. \quad (5.24)$$

У випадку, коли хоча б один з критеріїв не виконується, вважають, що розподіл результатів спостереження не відповідає нормальному.

Критерій 1. Розраховують значення \tilde{d} за формулою

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{nS^*}, \quad (5.25)$$

де S^* – зміщена оцінка СКВ:

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (5.26)$$

Розподіл результатів спостереження вважають нормальним, якщо

$$d_{1-\frac{\alpha_1}{2}} < \tilde{d} \leq d_{\frac{\alpha_1}{2}}, \quad (5.27)$$

де $d_{1-\frac{\alpha_1}{2}}$ і $d_{\frac{\alpha_1}{2}}$ – квантілі розподілу величини d , які знаходяться із

відповідних таблиць (див. додаток 5.1) по $\alpha_1/2$, $1-\alpha_1/2$, n , причому α_1 – наперед вибраний рівень значимості першого критерію. Ці таблиці складені для $10 < n \leq 71$.

Критерій 2. Вважають, що результати спостережень належать нормальному розподілу, якщо не більше m різниць $|x_i - \bar{x}|$ перебільшують значення $z_{P/2} \cdot S$, де S – оцінка СКВ, яка обчислюється за формулою

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (5.28)$$

а $z_{P/2}$ – верхня квантіль розподілу нормованої функції Лапласа (див. додаток 5.1), яка відповідає ймовірності $P/2$. Ймовірність P визначають за n і рівнем значущості α_2 критерію як корінь рівняння

$$1 - \sum_{k=0}^m C_n^k (1-P)^k P^{n-k} = \alpha_2. \quad (5.29)$$

Практично значення P визначають із відповідних таблиць (див. додаток 5.1) за вибраним для другого критерію рівнем значущості α_2 і кількістю результатів спостережень n . Ці таблиці складені для $10 \leq n < 50$, причому $m = 1$ для $10 \leq n \leq 20$ і $m = 2$ при $20 < n < 50$.

4.2.6. Критерій W

Даний критерій може використовуватися для перевірки нормальності розподілу експериментальних даних згідно з СТ СЭВ 1190–78 для вибірок обсягом від 3 до 50 результатів спостережень. При цьому необхідно насамперед упорядкувати вибірку, розмістивши всі спостереження x_i у порядку зростання, тобто у вигляді варіаційного ряду $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$. Вихідні дані слід записати до розрахункової таблиці (табл. 5.2)

Таблиця 5.2

i	x_i	j	a_{n-j+1}	$x_{n-j+1} - x_j$	$a_{n-j+1} \cdot (x_{n-j+1} - x_j)$
-----	-------	-----	-------------	-------------------	-------------------------------------

1	2	3	4	5	6
1	x_1				
2	x_2	l			
...			
...	...	2			
n	x_n	1			

У нижній половині третього стовпчика таблиці знизу вверх записують значення j від 1 до l , причому $l = n/2$, якщо n – парне, і $l = (n-1)/2$ при непарному n . Із таблиць (див. додаток 5.1) для відповідних n і l знаходять значення коефіцієнта a_{n-j+1} для j від 1 до l і записують їх знизу вверх у четвертому стовпчику. Потім підраховують різниці $x_{n-j+1} - x_j$, які заносять у п'ятий стовпчик. Результати построкового перемноження вмісту стовпчиків 4 і 5 записують у шостий стовпчик. Далі підраховують характеристики

$$\varphi^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 ; \quad (5.30)$$

$$b^2 = \left\{ \sum_{j=1}^l a_{n-j+1} (x_{n-j+1} - x_j) \right\}^2 . \quad (5.31)$$

Звідки обчислюють критерій

$$W = b^2 / \varphi^2 . \quad (5.32)$$

Задаючись певним рівнем значущості α , який відображає найбільшу ймовірність помилковості гіпотези про приналежність даної вибірки до нормальної генеральної сукупності, за відповідними таблицями (див. додаток 5.1) у залежності від n знаходять W^* .

При $W > W^*$ вважають, що гіпотеза справедлива і дослідний розподіл не суперечить нормальному закону. При $W < W^*$ гіпотеза про приналежність до нормального закону розподілу відкидається.

4.2.7. Графоаналітичний спосіб перевірки відповідності дослідного розподілу нормальному

Цей спосіб передбачає використання ймовірнісної сітки, на якій за певними правилами будується графік емпіричного розподілу для вибірки, що аналізується. За конфігурацією цього графіка судять про те, чи відповідає дослідний розподіл нормальному закону (ГОСТ 11.008–75).

Існує кілька варіантів такої побудови. Розглянемо найбільш зручний із них – із простими обчисленнями і прямолінійним графіком для нормального закону розподілу. Даний варіант може використовуватись у вибірках із кількістю спостережень від 3 до 40.

Таблиця 5.3

j	x_j	n_j	N_j	$\Phi(y_j)$	y_j
1	2	3	4	5	6

Перш за все вибірку впорядковують у вигляді варіаційного ряду. Дані розрахунку заносять до таблиці (табл. 5.3). Якщо якесь значення результатів спостережень у такому варіаційному ряді повторюється кілька разів, то в таблицю вони записуються в другий стовпчик тільки один раз, але вказують (у третьому стовпчику) кількість цих однакових значень (тобто частоту n_j даної варіанти x_j в упорядкованій вибірці). Для значень x_j , які не повторюються, частота $n_j=1$.

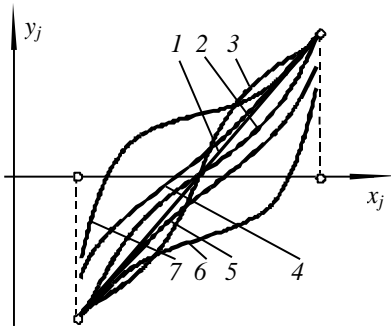


Рис. 5.5. Графіки, побудовані на ймовірнісній сітці нормального закону розподілу:

1 – нормального; 2 – симетричного більш плосковершинного, ніж нормального; 3 – симетричного більш гостровершинного; 4 – плосковершинного з правосторонньою асиметрією; 5 – плосковершинного з лівосторонньою асиметрією; 6 – гостровершинного з лівосторонньою асиметрією; 7 – гостровершинного з правосторонньою асиметрією

У наступному четвертому стовпчику зі зростаючим підсумком записують так звані “накопичені частоти” N_j , тобто сума значень n_j від початку до даного x_j включно: $N_j = \sum_{i=1}^j n_i$, для

останнього ν -го рядка $N_\nu = n$. Після чого обчислюють значення інтеграла Лапласа згідно з виразом

$$\Phi(y_j) = \frac{N_j}{n+1} - 0,5, \quad (5.33)$$

які заносять у п'ятий стовпчик.

Знаючи $\Phi(y_j)$, за відповідними таблицями можна знайти значення y_j для цього може бути використана таблиця додатка 5.1, однак зручніше користуватись спеціальною “оберненою” таблицею (див. додаток 5.1). Для кожної пари значень x_j і y_j позначають точки в прямокутній координатній системі з рівномірними шкалами як по осі абсцис x , так і по осі ординат y . З'єднавши точки, отримаємо графік функції $y_j = \varphi(x_j)$. Якщо цей графік прямолінійний, то дана вибірка не суперечить нормальному закону розподілу, якщо ж графік криволінійний, то вибірка не відповідає нормальному закону. За формою кривої можна наближено судити про характер закону розподілу (рис. 5.5). Правостороння асиметрія означає, що права гілка кривої пологіша (більш витягнута), ніж ліва і, навпаки, при лівосторонній асиметрії – більш витягнута ліва гілка.

5. Обробка результатів прямих багаторазових вимірювань при нормально розподілених експериментальних даних

Завдання: провести вивірення нуля мікрометра, виміряти діаметр вказаної деталі з допомогою мікрометра і здійснити обробку результатів прямих багаторазових вимірювань.

Таблиця 5.4.

№	x_i , мм		\bar{x} , мм		$ x_i - \bar{x} \cdot 10^{-3}$, мм		$(x_i - \bar{x})^2 \cdot 10^{-6}$, мм	
	n	Без аномальних		Без аномальних		Без аномальних		Без аномальних
1	22,580	22,580			5	0	25	0
2	22,577	22,577			2	3	4	9
3	22,580	22,580			5	0	25	0
4	22,578	22,578			3	2	9	4
5	22,579	22,579			4	1	16	1
6	22,575	22,575			0	5	0	25
7	22,579	22,579			4	1	16	1
8	22,577	22,577			2	3	4	9
9	22,585	22,585	22,575	22,58	10	5	100	25
10	22,585	22,585			10	5	100	25
11	22,585	22,585			10	5	100	25
12	22,580	22,580			5	0	25	0
13	22,580	22,580			5	0	25	0
14	22,580	22,580			5	0	25	0
15	22,578	22,578			3	2	9	4
16	22,580	22,580			5	0	25	0
17	22,500	—			75	—	5625	—

5.1. Вимірювання діаметра проводимо n разів (кількість вимірювань визначається викладачем). Причому розміри фіксуються в одному й тому ж місці деталі. Результати заносимо до табл. 5.4 (у нашому прикладі кількість вимірювань $n=17$).

Розраховуємо середнє арифметичне значення вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{17} \cdot \sum_{i=1}^{17} x_i = 22.575 \text{ мм} \quad (\text{Значення заносимо до табл. 5.4.})$$

Після цього знаходимо модулі відхиленнь вимірювань від середнього арифметичного значення (для кожного вимірювання): $|x_i - \bar{x}|$. Далі розраховуємо квадрат цієї різниці: $(x_i - \bar{x})^2$. Отримані результати заносимо до таблиці 5.4.

5.2. При всіх розрахунках будемо задаватися довірчою ймовірністю $P = 0,95$, оскільки здійснюємо технічні вимірювання.

5.3. Перевіримо: чи містить суттєво відмінний експериментальний показ x_k грубу похибку. Згідно з таблицею 1 № 17, $x_k = 22.500$ мм вибираємо за суттєво відмінний експериментальний показ (оскільки різниця $|x_i - \bar{x}|$ для нього має найбільше значення). Перевіримо цей показ на аномальність, використовуючи критерій аномальності. Для цього спочатку розраховуємо середньоквадратичне відхилення результату вимірювання за формулою

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 19,578 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Для оцінювання критерію аномальності розраховуємо

$$V_k = \left| \frac{(x_k - \bar{x})}{S} \right| = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{19.6 \cdot 10^{-3}} = 3,83.$$

Оскільки ми вважали ймовірність $P = 0.95$ для даного обсягу вибірки $n = 17$, із додатка 5.1 знаходимо параметр β , який $\beta = 2,48$.

Перевіряємо умову аномальності: $V_k \geq \beta$. У нашому випадку: $V_k > \beta$, оскільки $3,83 > 2,44$. Отже, умова аномальності виконується, тобто результат не належить до розподілу даних. Отже, на це аномальне вимірювання не зважаємо, тому не використовуємо в подальших розрахунках.

Тепер перераховуємо \bar{x} , $|x_i - \bar{x}|$ та $(x_i - \bar{x})^2$ для шістнадцяти вимірювань, що залишилися. Отримані результати заносимо до таблиці 1 (або креслимо нову таблицю для $n = 16$).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{16} \cdot \sum_{i=1}^{16} x_i = 22.58 \text{ мм}$$

Перевіримо: чи містить наступний суттєво відмінний експериментальний показ x_k грубу похибку. Згідно з таблицею 1 № 9 $x_k = 22,585$ мм вибираємо за різко відмінний експериментальний показ (оскільки різниця $|x_i - \bar{x}|$ для нього має найбільше значення). Перевіримо цей показ на аномальність, використовуючи критерій аномальності. Для цього спочатку розраховуємо середньоквадратичне відхилення результату вимірювання (не враховуючи виключене вимірювання) за формулою

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 2,92 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Для оцінювання критерію аномальності розраховуємо:

$$V_k = \left| \frac{(x_k - \bar{x})}{S} \right| = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2,92 \cdot 10^{-3}} = 1,712.$$

Оскільки ми вважали імовірність $P = 0.95$ для даного обсягу вибірки $n = 16$ із додатка 5.1 знаходимо параметр β , який: $\beta = 2.44$.

Перевіряємо умову аномальності $V_k \geq \beta$. У нашому випадку $V_k < \beta$, оскільки $1,684 < 2,44$. Отже, умова аномальності не виконується, тобто результат належить до розподілу даних.

5.4. З метою виключення систематичної похибки в результатах вимірювання здійснюємо вивірення, в даному випадку нуль мікрометра. При цьому систематичні похибки будуть усунені експериментальним шляхом. Однак залишаються невиключені систематичні похибки, в даному випадку беремо:

- межу допустимої похибки мікрометра $Q_1 = 0.002 \text{ мм}$,
- абсолютну зміну розміру деталі за рахунок температурного розширення, із таким припущенням, що вимірювання температури проводиться з точністю до 1°C .

Розрахуємо величину абсолютної зміни розміру деталі за рахунок температурного розширення згідно з формулою:

$$D = D_0(1 + \alpha \cdot \Delta t); \Delta D = D_0 \cdot \Delta t \cdot \alpha,$$

де α – коефіцієнт температурного розширення матеріалу деталі (Al), для нього $\alpha = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ 1/град}$;

$$D_0 = \bar{x}.$$

Δt – різниця температур.

$$\Delta D = 22,58 \cdot 1 \cdot 2,6 \cdot 10^{-5} = 58,7 \cdot 10^{-5} = 0,000587 \approx 0,0006 \text{ мм.}$$

Отже, абсолютна зміна розміру деталі: $Q_2 = \Delta D = 0,0006 \text{ мм}$.

5.5. Перевіримо відповідність експериментального закону розподілу теоретичному нормальному за складовим критерієм відповідності, який можна використати при кількості результатів спостереження $15 < n < 50$.

5.5.1 Критерій 1. Обчислюємо значення \tilde{d} за формулою

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot S^*},$$

де S^* – зміщена оцінка СКВ (мм);

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = 2,83 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^{16} |x_i - \bar{x}|}{16 \cdot S^*} = \frac{32}{16 \cdot 2,83} = 0,707$$

Розподіл вважають нормальним, якщо виконується умова $d_{1-\alpha_1/2} < \tilde{d} \leq d_{\alpha_1/2}$.

Згідно з таблицею додатку 5.1 вибираємо значення $d_{\alpha_1/2} = 0,9137$, $d_{1-\alpha_1/2} = 0,6829$ для кількості вимірювань $n = 16$. Підставляючи вибрані значення в умову, отримуємо: $0,6829 < 0,7067 \leq 0,9137$. Умова виконується.

Але розподіл буде нормальним, якщо виконується критерій 2.

5.5.2 Критерій 2. Перевіряємо нормальність розподілу результатів вимірювання згідно з умовою, при якій не більше m різниць $|x_i - \bar{x}|$ повинні перевищувати значення $z_{P/2} \cdot S$. Значення m беремо з таблиці додатка 3, для $n = 16$: $m = 1$.

Розраховуємо середньоквадратичне відхилення результату вимірювання за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 2,92 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Визначаємо критерій імовірності за рівнем значущості $\alpha_2 = 3\%$ (такий рівень значущості вибираємо з тих міркувань, що $\alpha \geq \alpha_1 + \alpha_2$, $\alpha_1 = 2\%$, а $\alpha = 5\%$, оскільки ми вважали імовірність $P = 0,95$, $\alpha = 1-P$) при $n = 16$, згідно таблиці додатку 5.1. Отже, $P = 0,99$.

Розраховуємо значення $P/2$: $P/2 = 0,99/2 = 0,495$. Згідно з таблицею додатка 5.1, вибираємо верхню квантіть розподілу нормованої функції Лапласа, що відповідає ймовірності $P/2$ при $m=1$, оскільки $n=16$: $z_{P/2} = 2,58$.

$$z_{P/2} \cdot S = 2,58 \cdot 2,92 \cdot 10^{-3} = 7,482 \cdot 10^{-3}$$

Отже, жодна з різниць $|x_i - \bar{x}|$ не перевищує значення $z_{P/2} \cdot S$.

Оскільки виконуються умови обох критеріїв складового критерію, то розподіл експериментальних даних відповідає нормальному.

5.6. Розраховуємо середньоквадратичне відхилення S окремого результату вимірювання за формулою Бесселя: (розраховане в п. 5.3) $S = 2,92 \cdot 10^{-3}$ мм.

Для більш точного розрахунку S використовують формулу

$$S = M_k \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}},$$

де M_k – поправковий коефіцієнт, вибраний згідно з таблицею додатка 5.1 для $k = n-1 = 15$: $M_k = 1,017$.

$$\text{Отже, } S = 1,017 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{16} (x_i - \bar{x})^2}{16-1}} = 1,017 \cdot 2,92 \cdot 10^{-3} = 2,97 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

5.7. Обчислюємо середньоквадратичне відхилення результату вимірювання згідно з формулою:

$$S(\tilde{A}) = S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{128 \cdot 10^{-6}}{16 \cdot (16-1)}} = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

5.8. Визначаємо довірчу границю випадкової складової похибки результату вимірювання. Розраховуємо довірчий інтервал ε , що є симетричним відносно \bar{x} , за формулою:

$$\varepsilon = t_\gamma \cdot S_{\bar{x}},$$

де t_γ – коефіцієнт Стьюдента, який при довірчій імовірності $P = 0,95$ і кількості результатів вимірювання $n = 16$ знаходимо за таблицею додатка 5.1: $t_\gamma = 2,12$.

$$\varepsilon = t_\gamma \cdot S_{\bar{x}} = 2,12 \cdot 0,73 \cdot 10^{-3} = 1,548 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

5.9. Визначимо довірчу границю невиключених залишків систематичної складової похибки за формулою

$$Q(P) = k \sqrt{\sum_{i=1}^{\eta} Q_i^2},$$

де η – кількість систематичних похибок.

k – поправковий коефіцієнт: для довірчої ймовірності $P = 0,95$ $k = 1,1$.

Не виключені систематичні похибки, отримані в п. 5.4: $Q_1 = 0,002$ мм, $Q_2 = 0,0006$ мм, отже їх кількість $\eta = 2$.

$$Q(P) = 1,1 \sqrt{(0,002)^2 + (0,0006)^2} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

5.10. Визначаємо довірчу границю загальної похибки результату вимірювання, яку знаходимо в залежності від співвідношення $Q(P)$ і $S_{\bar{x}}$:

$$\frac{Q(P)}{S_{\bar{x}}} = \frac{2,3 \cdot 10^{-3}}{0,73 \cdot 10^{-3}} = 3,15.$$

Оскільки отримане значення попадає в інтервал: $0,8 < 3,15 < 8$, то робимо висновок, що суттєво на похибку результату вимірювання впливають як випадкові, так і невиключені систематичні похибки.

Границі похибки результату вимірювання Δ (без урахування знака) обчислюємо за формулою

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma},$$

де K – коефіцієнт, який залежить від співвідношення випадкової і невиключеної систематичних похибок;

S_{Σ} – оцінка сумарного середньоквадратичного відхилення результату вимірювання.

Коефіцієнт K обчислюється за формулою

$$K = \frac{\varepsilon + Q(P)}{S_{\bar{x}} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{Q_i^2}{3}}} = \frac{1,548 \cdot 10^{-3} + 2,3 \cdot 10^{-3}}{0,73 \cdot 10^{-3} + \sqrt{\frac{(0,002)^2}{3} + \frac{(0,0006)^2}{3}}} = 2.$$

Оцінку СКВ результату вимірювання вираховуємо за формулою:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{Q_i^2}{3} + S_{\bar{x}}^2} = \sqrt{(1,3 \cdot 10^{-6} + 0,12 \cdot 10^{-6}) + (0,73 \cdot 10^{-3})^2} = 1,4 \cdot 10^{-3}.$$

Отже: $\Delta = 2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} = 2,8 \cdot 10^{-3} \approx 0,003$ мм.

5.11. Записуємо результат прямого багаторазового вимірювання згідно з ГОСТ 8.011-72 ($\tilde{A} \pm \Delta, P$):

$$22,580 \pm 0,003 \text{ мм.}$$

(У відповіді можемо не писати значення P , коли $P = 0,95$).

6. Зміст звіту

- 6.1. Назва, мета та завдання до роботи.
- 6.2. План обробки прямих багаторазових вимірювань.
- 6.3. Таблиця вимірювань діаметра деталі за допомогою мікрометра.
- 6.4. Обробка отриманих експериментальних даних згідно з попередньо складеним планом.
- 6.5. Висновки.

7. Контрольні запитання

- 7.1. Нормальний закон розподілу.
- 7.2. Зміст густини ймовірності.
- 7.3. Правило “ 2σ ; 3σ ”, що воно визначає?
- 7.4. Коли нормальний закон симетричний?
- 7.5. Чому виникають аномальні вимірювання (причини їх виникнення)?
- 7.6. Як визначають середнє і середньоквадратичні значення (дисперсія вибіркова)?
- 7.7. Що таке генеральне середнє значення та генеральна дисперсія?
- 7.8. Як залежить випадкова похибка вимірювань від кількості вимірювань?
- 7.9. Фізичний зміст отриманої абсолютної випадкової похибки (різниця між чим і чим, з якою ймовірністю)?
- 7.10. Що враховує коефіцієнт Стюдента і що зумовлює його введення?
- 7.11. Коли при однаковій кількості вимірювань абсолютна випадкова похибка буде більшою?
- 7.12. Як визначається систематична похибка?
- 7.13. Як визначається загальна похибка?

7.14. Як визначити абсолютну похибку величини $y=f(x)$, де x – вимірювана величина; те саме для двох змінних $z=f(x,y)$?

7.15. Як знайти відносну похибку для визначених величин $y=f(x)$ та $z=f(x,y)$?

7.16. Як експериментально підтвердити ці результати:

$$M\{S^2(x)\} = \sigma^2(x)$$

$$M\{\bar{x}\} = \mu$$

7.17. Зважаючи на результати експерименту, поясніть, що:

$$M\{S^2(x)\} = \sigma^2(x), \text{ де}$$

$$M\{\bar{x}\} = \mu$$

$$S^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

8. Список літератури

8.1 Солтис І.В. , Деревянчук О.В. Основи метрології / автори.: І.В Солтис, О.В. Деревянчук. - Чернівці: Чернівецький нац. ун-тет, 2021, 152 с.

8.2. Кірш М. Л. Метрологічна обробка результатів вимірювань. Навчальний посібник / Микола Леопольдович Кірш. – Чернівці: Рута, 2000. – 104 с.

Додаток 5.1

Коефіцієнт M_k

k	M_k	k	M_k	k	M_k
1	1,253	10	1,025	19	1,013
2	1,128	11	1,023	20	1,013
3	1,085	12	1,021	25	1,010
4	1,064	13	1,019	30	1,008
5	1,051	14	1,018	35	1,007
6	1,042	15	1,017	40	1,006
7	1,036	16	1,016	45	1,006
8	1,032	17	1,015	50	1,005
9	1,028	18	1,014	60	1,004

Коефіцієнт довіри t_γ

k	При γ			k	При γ		
	0,95	0,99	0,999		0,95	0,99	0,999
1	12,706	63,657	636,619	19	2,093	2,861	3,883
2	4,303	9,925	31,598	20	2,086	2,845	3,850
3	3,182	5,841	12,941	21	2,080	2,831	3,819
4	2,776	4,604	8,610	22	2,074	2,819	3,792
5	2,571	4,032	6,859	23	2,069	2,807	3,797
6	2,447	3,707	5,959	24	2,064	2,797	3,745
7	2,365	3,499	5,405	25	2,060	2,787	3,725
8	2,306	3,355	5,041	26	2,056	2,779	3,707
9	2,262	3,250	4,781	27	2,052	2,763	3,674
10	2,228	3,169	4,587	28	2,048	2,763	3,674
11	2,201	3,106	4,437	29	2,045	2,756	3,659
12	2,179	3,055	4,318	30	2,042	2,750	3,646
13	2,160	3,012	4,221	40	2,021	2,704	3,551
14	2,145	2,977	4,140	50	2,008	2,677	3,497
15	2,131	2,947	4,073	60	2,000	2,660	3,460
16	2,120	2,921	4,015	80	1,990	2,639	3,416
17	2,110	2,898	3,965	100	1,984	2,626	3,391
18	2,101	2,878	3,922	∞	1,960	2,576	3,291

**Значення P – процентних точок
нормованої функції Лапласа**

$P \cdot 100\%$	90	95	96	97	98	99
$Z_{P/2}$	1,65	1,96	2,06	2,17	2,33	2,58

Значення β (для $\gamma=0,95$)

n	β	n	β	n	β	n	β	n	β
3	1,15	9	2,11	15	2,41	21	2,58	27	2,68
4	1,46	10	2,18	16	2,44	22	2,59	28	2,69
5	1,67	11	2,23	17	2,48	23	2,61	29	2,69
6	1,82	12	2,29	18	2,50	24	2,63	30	2,70
7	1,94	13	2,33	19	2,53	25	2,65		
8	2,03	14	2,37	20	2,56	26	2,66		

α % - ні квантілі для розподілу $d = \sum_{i=1}^n |x_s - \bar{x}| / n \cdot S^*$

Рівень значущості α_1 , в %		Кількість результатів вимірювань в групі, n										
		11	16	21	26	31	36	41	46	51	61	71
$(1 - \alpha_1/2) \cdot 100\%$	99,0	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,72	0,72	0,73	0,73	0,74
	95,0	0,72	0,72	0,73	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,75	0,76	0,76
	90,0	0,74	0,74	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77
$(\alpha_1/2) \cdot 100\%$	10,0	0,89	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83
	5,0	0,91	0,89	0,88	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84
	1,0	0,94	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85

Значення довірчої ймовірності P з рівняння $1 - \sum_{k=0}^m C_n^k \cdot (1-P)^k \cdot P^{n-k} = \alpha_2$ для

обчислення $Z_{P/2}$

n		10	11-14	15-20	21,22	23	24-27	28-32	33-35	36-49
m		1	1	1	2	2	2	2	2	2
$(\alpha_2/2) \cdot 100\%$	1,00	0,98	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99
	2,0	0,98	0,98	0,99	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99
	5,0	0,96	0,97	0,98	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98

Навчальне видання

**МЕТРОЛОГІЯ,
СТАНДАРТИЗАЦІЯ
ТА СЕРТИФІКАЦІЯ**

*Методичні рекомендації
до практикуму*

Укладачі **Солтис І.В., Лазурка І. І.**
Відповідальний за випуск : *Ушенко О. Г.*
Літературний редактор *Макарова О. П.*
Технічний редактор **Лазурка І. І.**