

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»  
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ ІНСТИТУТ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Директор АДІ ДВНЗ «ДонНТУ»  
М. М. Чальцев  
26.10.2012 р.

Кафедра «Загальнонаукові дисципліни»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ДО  
ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З ФІЗИКИ  
(ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0701 «ТРАНСПОРТ І ТРАНСПОРТНА  
ІНФРАСТРУКТУРА» ДЛЯ СТУДЕНТІВ НАПРЯМІВ  
ПІДГОТОВКИ 6.070106 «АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ» ТА  
6.070101 «ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ ТРАНСПОРТУ)»,  
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0601 «БУДІВНИЦТВО ТА  
АРХІТЕКТУРА» - НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.060101  
«БУДІВНИЦТВО», ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0401 «ПРИРОДНИЧІ  
НАУКИ» - НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.040106 «ЕКОЛОГІЯ,  
ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА  
ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ»)**

**15/48-2012-01**

«РЕКОМЕНДОВАНО»  
Навчально-методична  
комісія факультету  
«Автомобільні дороги»  
Протокол № 1 від 19.09.2012 р.

«РЕКОМЕНДОВАНО»  
Кафедра  
«Загальнонаукові дисципліни»  
Протокол № 1 від 31.08.2012 р.

«РЕКОМЕНДОВАНО»  
Навчально-методична  
комісія факультету  
«Автомобільний транспорт»  
Протокол №1 від 18.09.2012 р.

«РЕКОМЕНДОВАНО»  
Навчально – методична  
комісія факультету  
«Транспортні технології»  
Протокол №2 від 10.10.2012 р.

УДК 538 (07)

Методичні вказівки до самостійної роботи при підготовці до лабораторного практикуму з фізики (галузь знань 0701 «Транспорт і транспортна інфраструктура» для студентів напрямів підготовки 6.070106 «Автомобільний транспорт» та 6.070101 «Транспортні технології (за видами транспорту)», галузь знань 0601 «Будівництво та архітектура» – напрям підготовки 6.060101 «Будівництво», галузь знань 0401 «Природничі науки» – напрям підготовки 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування»). [Електронний ресурс] / укладач О. І. Уколов – Електрон. дані. – Горлівка: ДВНЗ «ДонНТУ» АДІ, 2012. – 1 електрон. опт. диск (CD-R); 12 см. – Систем. вимоги: Pentium; 32 MB RAM; WINDOWS 98/2000/NT/XP; MS Word 2000. – Назва з титул. екрану.

Наведено типи лабораторних вимірювальних приладів. Описано принцип дії приладів і методику проведення вимірювань.

Укладач:

Уколов О. І.

Відповідальний за випуск:

Галіахметов А. М., к.ф.-м.н., доц.

Рецензент:

Карпинець А. П., к.х.н., доц.  
каф. «Загальнонаукові дисципліни»

© Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»  
Автомобільно-дорожній інститут, 2012

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА .....	4
1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ПОМИЛОК І ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН .....	6
1.1 Класифікація помилок і похибок вимірювань .....	6
1.2 Математична обробка результатів прямих і непрямих вимірювань .....	8
2 ОБРОБКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ .....	12
2.1 Запис результатів досліду .....	12
2.2 Середні величини .....	13
2.3 Графічні методи обробки результатів .....	15
2.4 Корисні поради та вказівки .....	17
3 ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА УСТАНОВКИ .....	21
3.1 Чутливість .....	21
3.2 Ціна поділки шкали .....	22
3.3 Точність приладу .....	23
4 ДЕЯКІ ПРИЛАДИ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ .....	24
4.1 Масштабна лінійка .....	24
4.2 Штангенциркуль .....	25
4.3 Мікрометр .....	27
4.4 Прилад для вимірювання маси .....	29
4.5 Зважування на технічних вагах .....	31
5 ЕЛЕКТРОННИЙ ОСЦИЛОГРАФ .....	33
5.1 Електронно-променева трубка .....	35
5.2 Генератор розгортки .....	37
5.3 Включення осцилографа .....	39
5.4 Звуковий генератор ГЗ-33 .....	40
5.5 Включення генератора .....	42
6 ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ .....	43
6.1 Основні характеристики електровимірювальних приладів .....	44
6.2 Чутливість .....	45
6.3 Межі вимірювань .....	45
6.4 Магнітоелектрична система .....	45
6.5 Характеристики магнітоелектричних гальванометрів і особливості їх конструкції .....	47
6.6 Електромагнітна система .....	48
6.7 Електродинамічна система .....	50
6.8 Індукційна система .....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....	52
ДОДАТОК А .....	53

## ПЕРЕДМОВА

Серед завдань, що стоять перед студентом у навчальній лабораторії, одне з найважливіших місць займає активне оволодіння основами виміральної техніки й напрацювання професійних навичок експериментатора. Це завдання вирішується, перш за все, кількісним накопиченням досвіду при виконанні багатьох різноманітних лабораторних робіт, особливо, якщо студенту надано достатню ступінь самостійності.

Рішення, що знайдені самостійно, були б найміцнішою базою для оволодіння мистецтвом експериментатора. Експериментальна робота може бути успішною тільки за умови раціональних, продуманих дій експериментатора. При неправильній роботі можуть виникати ситуації, які небезпечні для експериментатора та оточуючих людей, або для приладів, які застосовуються.

При підготовці до лабораторної роботи студент повинен оволодіти значною частиною теоретичного матеріалу самостійно. Вміло спланована самостійна робота сприяє формуванню особистих якостей студента: вмінню систематизувати, планувати, контролювати й регулювати свою діяльність без допомоги й контролю викладача. Самостійна робота дає можливість студенту працювати без поспіху, не боячись негативної оцінки товаришів чи викладача, а також обирати оптимальний темп роботи та умови її виконання.

Найважливіші правила експериментальної роботи – це дбайливе відношення до приладів, уважність і обережність при виконанні будь-яких операцій. У навчальній лабораторії фізики до роботи на навчальних установках допускаються студенти, які пройшли інструктаж і розписалися в журналі інструктажу з техніки безпеки (ТБ) для студентів. Робота на установках виконується тільки після проходження допуску, під безперервним спостереженням викладача та лаборанта. Інструктаж студентів із техніки безпеки проводиться 1 раз на семестр перед початком занять, викладачем, який проводить лабораторні заняття. Інструктаж оформлюється в журналі по ТБ для студентів, особистим підписом студента й викладача, що проводив інструктаж. Крім того, викладач перед допуском студентів до виконання кожної лабораторної роботи проводить інструктаж по ТБ і по вмінню застосовувати безпечні прийоми праці в даній лабораторній роботі. Студенти під час роботи в лабораторії несуть відповідальність за дотримання правил внутрішнього розпорядку, правил ТБ та за справність приладів, з якими вони працюють. Перед початком роботи студенту потрібно:

перевірити заземлення корпусів обладнання й приладів;

перевірити положення перемикачів мережевої напруги, що знаходяться на приладах;  
перевірити регулятори напруги джерел живлення повинні бути поставлені в крайнє ліве положення (нульове положення);  
перевірити регулятори меж вимірювальних приладів повинні знаходитися в крайньому правому положенні;  
зібрати схему включення приладів і дати перевірити її викладачеві або лаборанту, починати експеримент студент повинен тільки після дозволу викладача або лаборанта.

Студентам забороняється:

виконувати перемикання в схемах, що знаходяться під напругою;  
залишати без нагляду схему, що знаходиться під напругою;  
доторкатися до оголених проводів і контактів під час роботи установки;  
змінювати положення перемикачів мережевої напруги, що знаходяться на приладах;  
натискати одночасно дві клавіші одного клавішного перемикача.

При виявленні несправності на установці звертатися до відповідального лаборанта або викладача.

Після закінчення роботи здати працюючу установку викладачеві або лаборанту.

Дані методичні вказівки призначено для прискорення й полегшення процесу вироблення експериментальних навичок. Надати допомогу студенту при підготовці до лабораторного практикуму з розділів фізики: механіка, молекулярна фізика й термодинаміка, електрика й магнетизм, коливання й хвилі, оптика, фізика твердого тіла й атомна фізика. Тут наведено описи найбільш поширених приладів і вузлів вимірювальних установок, що зустрічаються у фізичному практикумі, а також вказівки по техніці їх налагодження та виконання вимірювань.

# 1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ПОМИЛОК І ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Загальна вимога при виконанні всіх лабораторних робіт із курсу фізики – це визначення необхідної фізичної величини із урахуванням похибок і помилок вимірювання.

Фізична величина – властивість, притаманна в якісному відношенні багатьом фізичним об'єктам (фізичним системам, їх станам і процесам, які відбуваються в них), але в кількісному відношенні індивідуальна для кожного об'єкта. Для кількісної оцінки фізичної величини (визначення її значення у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць) користуються різними методами вимірювань. Виміром називають знаходження значень фізичних величин дослідницьким шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Вимірювання бувають прямі й непрямі. При прямому вимірюванні необхідне значення фізичної величини знаходять безпосередньо за допомогою вимірювальних приладів, які проградуєвані у відповідних одиницях вимірювання (наприклад, вимірювання розмірів тіл за допомогою штангенциркуля). Непрямими називають вимірювання, при якому значення фізичної величини знаходять на підставі відомої функціональної залежності між вимірюваною величиною та величинами, що піддаються прямим вимірам.

## 1.1 Класифікація помилок і похибок вимірювань

Будь-які вимірювання супроводжуються похибками, як би ретельно вони не виконувалися. Точність вимірів залежить від точності застосовуваних приладів і обладнання, методів вимірювань, кваліфікації спеціаліста й зовнішніх умов, у яких вони виконуються. Підвищуючи точність приладів і обладнання, удосконалюючи методи спостережень, поліпшуючи кваліфікацію спостережника, можна досягти якнайменшої похибки вимірів, однак повністю уникнути похибок неможливо.

Похибки класифікують за:

- 1) умовами вимірювання;
- 2) походженням;
- 3) характером впливу на результати вимірів та за властивостями.

1. Залежно від умов вимірювання помилки можуть бути рівноточними й нерівноточними. Вимірювання виконують у різних фізичних умовах, при наявності наступних факторів (комплексу умов): 1) об'єкта; 2) суб'єкта; 3) приладу; 4) методу; 5) навколишнього середовища. Вимірювання, у процесі яких усі фактори лишаються незмінними називаються *рівноточними*.

Вимірювання, у процесі яких змінюється хоча б один фактор називаються *нерівноточними*.

2. Помилки вимірів за своїм походженням поділяються на:

- *інструментальні*;
- *особисті*;
- *зовнішні*;
- *методичні*;
- *похибки моделі*;
- *похибки класифікації об'єктів вимірювання*.

**Інструментальні помилки** обумовлені технологією виробництва приладів, їх недосконалістю, тобто відмінністю реального конкретного приладу від приладу ідеального, який лежить в основі його побудови.

Інструментальні похибки вимірів можуть бути поділені на три категорії: помилки, що зумовлені недосконалістю виготовлення окремих частин інструмента; помилки, що зумовлені не цілком точною юстировкою та встановленням інструмента в робоче положення; помилки, що зумовлені зміною властивостей інструмента з плином часу.

**Особисті похибки** обумовлені фізичними особливостями спостерігача (обмеженою чутливістю органів чуття, недостатньою кваліфікацією й досвідченістю, психіко-фізіологічними особливостями).

**Помилки зовнішнього середовища.** Зовнішні помилки обумовлюються різними несприятливими для вимірів факторами та умовами зовнішнього середовища. До них належать: температура, вологість та непрозорість повітря, атмосферний тиск, сильний вітер, рельєф місцевості, нестійкість ґрунту тощо.

**Методичні похибки** виникають внаслідок нехтування умовами вимірювання та закономірностями їх змін, конструктивними особливостями приладів.

**Помилки моделі** пов'язані з тим, що реальні фізичні об'єкти та процеси, з метою спрощення, подають у вигляді абстрактних побудов, які лише наближено відображають реальність.

**Помилки класифікації** виникають тоді, коли на об'єкт вимірювання переносять результати вимірювання інших об'єктів (спостереження ведуться на об'єкт  $A_1$  замість об'єкта  $A$ ).

3. За характером впливу на результати вимірів та за властивостями похибки поділяються на:

- *грубі*;
- *систематичні*;
- *випадкові*.

**Груба помилка** – промах виконавця, їх не можна допустити щодо величини, яка вимірюється, при даних умовах вимірів. Неуважність під час вимірювань призводить до прорахунків, описок, до вимірювання не

тих предметів, які належить виміряти тощо. Грубі помилки часто трапляються при обчисленнях. Зумовлені вони, головним чином, неухважністю та недбалістю спостерігача. Через це, для виявлення їх необхідно проводити повторні, контрольні виміри й обчислення. Але всі контрольні виміри будуть ефективними лише тоді, коли будуть проведені іншими способами або іншими інструментами. Виконавець повинен бути особливо уважним при вимірюваннях, які з тих чи інших причин виконують один раз.

До **систематичних** відносять помилки, які при вимірюваннях однорідних або тієї самої величини виникають з однаковою закономірністю залежно від тих факторів, які обумовлюють їх виникнення. Систематичні помилки поділяються на поправки та приладові похибки. Поправками називаються помилки, які при переході від одного виміру до другого не змінюються ні за величиною, ні за знаком, і поява яких пов'язана з постійно та незмінно діючими факторами. Приладовими похибками називаються помилки, які при вимірюванні будь-якої величини змінюють свій знак, але не змінюють величину.

**Випадкові помилки**, іноді їх називають неминучими, виникають у результаті спільного впливу великого числа факторів, при яких вимірюють. Наприклад, причинами виникнення різних за величиною випадкових помилок є: недосконалість вимірювальних приладів – грубі штрихи й різна величина поділок шкал, недостатнє збільшення труб і мікроскопів; недосконалість органів чуття – неточне окомірне визначення часток поділки шкал, неточне наведення сітки ниток на ціль тощо; нерівномірний вплив середовища – невелика, але часта зміна температур, напрямів і сили вітру, різна твердість ґрунту, різна освітленість спостережуваних предметів залежно від навколишнього фону, часу дня тощо; прийнята методика вимірювань – чим старанніше вимірюють, тим менші випадкові помилки; точність інструментів – чим точніший інструмент, тим менші випадкові помилки; кваліфікація виконавця та ін.

## **1.2 Математична обробка результатів прямих і непрямих вимірювань**

Нехай у результаті прямих вимірювань фізичної величини отримано ряд її значень:  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Знаючи цей ряд чисел, потрібно вказати значення, найбільш близьке до істинного значення вимірюваної величини, і знайти величину випадкової похибки. Найбільш вірогідним значенням вимірюваної фізичної величини (близьким до істинного) вважають середнє арифметичне:



$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1.1)$$

де  $x_i$  – результат  $i$ -го вимірювання;

$n$  – число вимірювань.

Випадкова помилка вимірювання може бути оцінена величиною абсолютної похибки  $\Delta x$ , яку обчислюють за формулою:

$$\Delta x = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (1.2)$$

де  $t_{\alpha, n}$  – коефіцієнт Стюдента, який залежить від числа вимірів  $n$  та довірчої ймовірності  $\alpha$ .

Значення довірчої ймовірності  $\alpha$  задає сам експериментатор. Ймовірністю випадкової події називається відношення числа випадків, сприятливого для даної події, до загальної кількості рівноможливих випадків. Ймовірність достовірної події дорівнює 1, а неможливої – 0.

Значення коефіцієнта Стюдента, відповідне заданій довірчій ймовірності  $\alpha$  і певному числу вимірювань  $n$ , знаходять за таблицею 1 додатка А.

З таблиці видно, що величина коефіцієнта Стюдента й випадкова похибка вимірювання тим менше, чим більше  $n$  і менше  $\alpha$ . Практично вибирають  $\alpha = 0,95$ . Однак просте збільшення числа вимірювань не може звести загальну погрішність до нуля, так як будь-який вимірювальний прилад дає похибку.

Пояснимо зміст термінів абсолютна похибка  $\Delta x$  і довірна ймовірність  $\alpha$ , використовуючи числову вісь. Нехай середнє значення вимірюваної величини  $\langle x \rangle$  (рис. 1.1), а обчислена абсолютна похибка  $\Delta x$ . Відкладемо  $\Delta x$  від  $\langle x \rangle$  справа й зліва. Отриманий числовий інтервал від  $(\langle x \rangle - \Delta x)$  до  $(\langle x \rangle + \Delta x)$  називається довірчим інтервалом. У середині цього довірчого інтервалу знаходиться істинне значення вимірюваної величини  $x$ .

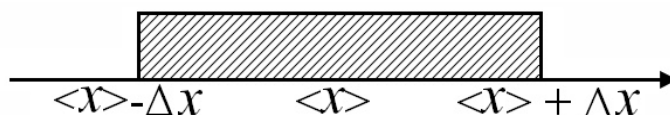


Рисунок. 1.1 – Числова вісь з отриманим числовим інтервалом

Якщо вимірювання тієї ж величини повторити тими ж приладами в тих же умовах, то істинне значення вимірюваної величини  $x_{іст}$  потрапить у цей же довірчий інтервал, але потрапляння буде не достовірним, а з імовірністю  $\alpha$ . Обчисливши величину абсолютної похибки  $\Delta x$  за формулою, справжнє значення  $x$  вимірюваної фізичної величини можна записати у вигляді:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x.$$

Для оцінки точності вимірювання фізичної величини підраховують відносну похибку, яку зазвичай у підрахунках наводять у відсотках за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100 \% . \quad (1.3)$$

У випадку непрямих вимірювань нехай фізична величина  $z$  пов'язана з іншими величинами  $x_1, x_2, \dots, x_k$  деякою функціональною залежністю:

$$z = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (1.4)$$

Серед величин  $x_1, x_2, \dots, x_k$  є величини, отримані при прямих вимірюваннях, і табличні дані. При цьому відомі абсолютні похибки  $\Delta x$  всіх прямих вимірювань, причому ці похибки малі в порівнянні з самими вимірюваними величинами. Тоді абсолютна похибка потрібної величини  $\Delta z$  обчислюється подібно повного диференціалу функції:

$$\Delta z = \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \cdot \Delta x_i. \quad (1.5)$$

Тільки на відміну від операції знаходження повного диференціала, всі мінуси, що виходять при диференціюванні, замінюються на плюси, а диференціали аргументів – на відповідні абсолютні похибки. Формула для розрахунку відносної похибки непрямого виміру:

$$\varepsilon = \frac{\Delta z}{z} = \frac{1}{z} \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \cdot \Delta x_i \quad (1.6)$$

Формула (1.6) знаходження відносної похибки збігається з формулою  $d(\ln z)$ , якщо в останній замінити диференціали аргументів на абсолютні похибки прямих вимірювань.

Наприклад об'єм циліндра визначається за формулою:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h$$

тоді

$$V_{сер} = \pi \cdot R_{сер}^2 \cdot h_{сер}$$

Відносна похибка визначення об'єму циліндра може бути визначена за наступним алгоритмом:

1. Прологарифмуємо рівняння

$$\ln V_{сер} = \ln \pi + 2 \ln R_{сер} + \ln h_{сер}.$$

2. Знайдемо повний диференціал

$$d(\ln V_{сер}) = d(\ln \pi) + d(2 \ln R_{сер}) + d(\ln h_{сер}).$$

3. З урахуванням того, що  $d(\ln a) = \frac{da}{a}$  а число  $\pi$  є сталою величиною, рівняння матиме наступний вигляд:

$$\frac{dV_{сер}}{V_{сер}} = 2 \frac{dR_{сер}}{R_{сер}} + \frac{dh_{сер}}{h_{сер}}.$$

4. Диференціали аргументів замінюємо на відповідні абсолютні похибки та отримуємо формулу для розрахунку відносної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V_{сер}}{V_{сер}} = \left( 2 \frac{\Delta R_{сер}}{R_{сер}} + \frac{\Delta h_{сер}}{h_{сер}} \right).$$

Зазвичай у реальних вимірах присутні й випадкові й систематичні приладові похибки. Якщо обчислена випадкова похибка прямих вимірювань дорівнює нулю або менше приладової в два й більше число разів, то при обчисленні похибки непрямих вимірювань у розрахунок повинна прийматися апаратна похибка. Якщо ці похибки відрізняються менше, ніж у два рази, то абсолютна похибка обчислюється за формулою:

$$\Delta z = \sqrt{\Delta z_{вип}^2 + \Delta z_{пр}^2}. \quad (1.7)$$

## 2 ОБРОБКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 2.1 Запис результатів досліду

З урахуванням приладових і випадкових похибок результат вимірювань будь-якої лабораторної роботи у фізичному практикумі потрібно записати у вигляді:

$$z = \langle z \rangle \pm \Delta z. \quad (2.1)$$

Наявність помилки  $\Delta z$  визначає точність, з якою має сенс виконувати обчислення  $\langle z \rangle$ . Легко бачити, наприклад, що запис  $z = 2,86745 \pm 0,070$  безглуздий. Обчислення середнього значення в цьому випадку слід робити з точністю до другого знака після коми або максимум до третього знака. При помилці 0,070 останні дві цифри числа 2,86745 не означають рівно нічого. Цих цифр не варто було ні писати, ні обчислювати. Грамотний запис результату був би  $2,87 \pm 0,07$  або, можливо,  $2,867 \pm 0,070$ . При запису результатів досліду слід писати всі відомі цифри (навіть якщо це нулі!) і одну зайву, не цілком точно відому цифру. Ніяких наступних цифр (які можуть виникати при обчисленнях) писати ні в якому разі не слід.

Наведемо приклад: нехай при перевірці маси двуграмової гирі виявилось, що її маса дорівнює 2 г. І нехай ця перевірка проводилася один раз із точністю 1 мг, інший раз з точністю 10 мг, втретє 100 мг. Результат досвіду слід записати у першому випадку  $2,0000 \pm 0,0010$  г, у другому  $2,000 \pm 0,010$  г і в третьому  $2,00 \pm 0,10$  г. Інший приклад: при зважуванні вагона на залізничних вагах виявилось, що його маса дорівнює 68 т ( $\pm 0,5$  т). Не слід писати, що маса вагона дорівнює 68000 кг, так як це означало б, що останні три цифри (або принаймні дві з них) дійсно є нулями, у той час як про них нічого сказати не можна. Слід тому писати 68 т. або, краще, 68,0 т, або  $6,80 \cdot 10^4$  кг, або, нарешті,  $0,680 \cdot 10^8$  г, але не 68 000 кг і не 6800000 г і т. д. У багатьох випадках намагаються указувати величину помилки у відсотках від вимірювальної величини. Вага двуграмової гирі в першому випадку дорівнює  $2,0000 \text{ г} \pm 0,05 \%$ , у другому –  $2,000 \text{ г} \pm 0,5 \%$ , у третьому –  $2,00 \pm 5 \%$ . Похибка, виражена в частках вимірюваної величини, носить назву відносної похибки, на відміну від абсолютної похибки, що має розмірність вимірюваної величини (г, см і т. д.)

## 2.2 Середні величини

Вище були розглянуті випадки, коли випадкові помилки досліду приводять до розкиду результатів вимірювання навколо істинного значення. При цьому було з'ясовано, що найкращим значенням вимірюваної величини є середнє (арифметичне), що обчислене з результатів вимірювання. Не завжди, однак, розкид результатів пов'язаний із помилками вимірювання. Нехай, наприклад, ми хочемо виміряти діаметр дроту, перетин якої не є цілком точним колом або товщина якого дещо змінюється по довжині. Розкид результатів пов'язаний в цьому випадку не з похибками вимірювання, а з недосконалістю форми дроту. Чи має у цьому випадку сенс обчислювати середні значення, наприклад середній діаметр дроту?

Розглянемо шматок дроту, що складається з двох ділянок, які дещо відрізняються за діаметром. Нехай діаметр лівої ділянки дроту дорівнює 10,0 мм, діаметр правої ділянки дорівнює 10,2 мм, а довжина ділянок дорівнює 5 см. Об'єм дроту  $V$  дорівнює:

$$V = \frac{1}{4} \pi h_1 D_1^2 + \frac{1}{4} \pi h_2 D_2^2 = \frac{5}{4} \pi (1,00^2 + 1,02^2) \text{ см}^3. \quad (2.2)$$

Будемо вимірювати діаметр дроту штангенциркулем. У результаті вимірювання будуть виходити різні цифри: то 10,0 мм, то 10,2 мм. Ми можемо не звернути уваги на те, що результат 10,0 мм виходить завжди при вимірах на лівому кінці, а результат 10,2 мм – при вимірюваннях на правому кінці дроту, і приписати розкид результатів випадкових помилок досліду. Будемо вважати в цьому випадку, що дріт має усюди однаковий перетин, і обчислимо його середній діаметр  $d_{сер} = 10,1$  мм, при цьому об'єм дроту  $V_1$  буде дорівнювати :

$$V_1 = \frac{1}{4} \pi \cdot 10 (1,01)^2. \quad (2.3)$$

Розрахуємо різницю результатів вимірювань об'єму за формулами (2.2) і (2.3). Зауважимо, що

$$(1,00)^2 + (1,02)^2 = 2,0404$$

$$2(1,01)^2 = 2,0402.$$

Розбіжність становить, таким чином, всього 0,01%! Нехай вимірювання діаметра відбувалися при цьому з точністю 0,05 мм. Тоді похибка у вимірюванні  $V$  дорівнює:

$$\frac{\Delta V}{V} = 2 \frac{\Delta d}{d} = \frac{2 \cdot 0,05}{10} = 1 \%$$

Розбіжність лежить в істотно більш далеких знаках, ніж помилка досліду, і не грає ніякої ролі. Розбіжність таких результатів стане суттєвою тільки в тому випадку, якщо вимірювання діаметра зроблені з точністю  $1/2 \cdot 0,01 \% = 0,005 \%$ , тобто з точністю 0,0005 мм. Ступенева форма дроту при такій точності вимірювань, звичайно, обов'язково буде виявлена.

Нехай тепер тонка ділянка дроту має довжину 2 см, а товста ділянка – довжину 8 см. Істинний об'єм дроту дорівнює:

$$V = \frac{1}{4} \pi (2 \cdot 1,00^2 + 8 \cdot 1,02^2) = \frac{1}{4} \pi \cdot 10,3232 \text{ см}^3.$$

Передбачимо тепер, що при вимірюваннях наявність сходинки не було виявлено. Якщо вимірювання проводити велику кількість разів по всій довжині дроту, то результат 10,2 мм зустрічатиметься в 4 рази частіше, ніж 10,0, і середнє значення діаметра буде дорівнювати  $1/5(1 \cdot 10,0 + 4 \cdot 10,2) = 10,16$  мм. Знайдемо об'єм дроту:

$$V = \frac{1}{4} \pi \cdot 10 \cdot (1,016)^2 = \frac{1}{4} \pi \cdot 10,32256 \text{ см}^3.$$

Розбіжність між результатами складає в цьому випадку 0,006%, що знову істотно менше погрішності вимірювань.

Ми приходимо, таким чином, до несподіваного висновку. У багатьох випадках (практично майже завжди) при не дуже великому розкиді результатів немає потреби встановлювати, у чому лежить причина розкиду: у неточності вимірювань або у недосконалості вимірюваного об'єкта. В обох випадках усереднення результатів призводить нас до правильної відповіді. Сформульований вище висновок справедливий, звичайно, тільки в тому випадку, якщо методика вимірювань є правильною. У нашому випадку слід виміряти діаметр дроту рівномірно по всій його довжині. Вимірювання одного правого або одного лівого кінця негайно призведуть до помилкового результату. Як ми бачили вище, усереднення результатів є корисним методом, що дозволяє істотно поліпшити точність результатів. Не всяке, звичайно, усереднення має сенс. Корисно обчислити середній діаметр майже однорідного дроту, але

не має ніякого сенсу обчислювати середній діаметр мотків дроту, які є у наявності на складі, або середня вага гирь важків.

### 2.3 Графічні методи обробки результатів

Дуже важливим методом обробки результатів дослідів є представлення їх у вигляді графіка. Наведемо приклад із лабораторної роботи де вимірювання термічного коефіцієнта опору виконується за формулою:

$$R = R_0 + \alpha \cdot t. \quad (2.4)$$

Вимірюємо опір  $R$  при різних температурах і запишемо результати у вигляді таблиці (табл.2.1).

Результати вимірювання  $R$  при різних температурах

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$R, \text{Ом}$	100,2	100,4	100,82	101,1	101,86	101,84	102,42	102,75	102,96	103,43

Для визначення двох невідомих  $\alpha$  і  $R_0$ , які входять у формулу (2.4), досить виміряти опір при двох якихось температурах. Вимірювання, що зроблені при трьох температурах, призводять до трьох рівнянь, з яких потрібно визначити два невідомих. Через неминучі помилки дослідів ці три рівняння зазвичай виявляються несумісними. Перш за все зрозуміло, що несумісність рівнянь є мнимою та сталася через помилки дослідів. При обробці результатів, помилки дослідів слід по можливості виключити. Шукане значення  $\alpha$  повинно враховувати не якісь два, а всю сукупність даних, що наведені в таблиці, тобто потрібно знайти таке значення  $\alpha$ , яке найкраще задовольняє всім наявним експериментальним даним. Розглянемо графічне вирішення цієї задачі.

Наведені в таблиці експериментальні дані зображені на рис. 2.1 точками, розмір яких визначає величину стандартної помилки вимірювання температури (по горизонталі) і опору (по вертикалі). Масштаб графіка обраний так, щоб отримати приблизно рівні розміри по довжині й висоті. Розгляд результатів показує, що при температурі  $40^\circ\text{C}$  величина опору, мабуть, виміряна невірно. Цю точку слід перемерити. Помилку можна було б знайти і без графіка при уважному розгляді таблиці, проте на графіку вона проявляється значно виразніше. Тому бажано тому будувати графіки безпосередньо під час роботи. Якщо помилка виявлена занадто пізно, коли повторити вимірювання вже не можливо, точку потрібно обов'язково нанести на графік, але не слід брати до уваги при обробці.

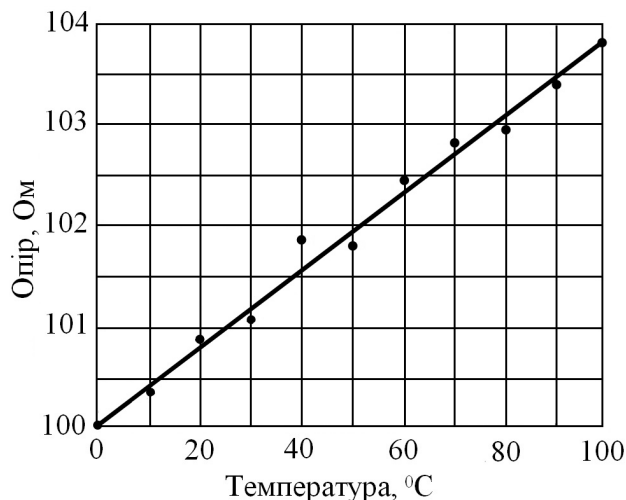


Рисунок. 2.1 – Графік залежності опору провідника від температури.

Теоретична залежність (2.4) повинна мати на нашому графіку вигляд прямої лінії. Розгляд результатів показує, що точки досить добре (у межах помилок досліду) лягають на пряму, що зображена на рис. 2.1. Проводити пряму слід так, щоб вона лежала як можливо ближче до точок і щоб по обидві її сторони виявлялася приблизно рівна їх кількість. Величину  $\alpha$  слід визначити, виходячи з нахилу проведеної прямої. Знаходження температурного коефіцієнта опору  $\alpha$  за допомогою графіка є одним із способів вирішення задачі про одночасне використання всіх наявних експериментальних даних. Це рішення має істотні переваги перед розрахунковими методами. При побудові графіка ми змогли швидко виявити помилку й виключили її вплив на результат. Побудова графіка переконала нас у тому, що наші дані не суперечать структурі формули (2.4), яка вказує на прямолінійний вигляд залежності  $R$  від  $t$ . Нарешті, ми змогли без складних обчислень визначити значення  $\alpha$  (нахил кривої), що враховує одночасно всю сукупність експериментальних даних. Обробка даних за допомогою графіка (рис. 2.1.) істотно полегшилася завдяки тому, що шукана залежність має прямолінійний характер. А як провести через них найкращу параболу або найкращу синусоїду? Масштаб по осях графіка завжди слід вибирати так, щоб теоретично очікувана залежність мала вигляд прямої лінії. Нехай, наприклад, ми вимірюємо шлях  $S$ , який проходить падаюче тіло, у залежності від часу польоту  $t$ , і хочемо визначити з наших результатів постійну земного тяжіння  $g$ . Формула має в цьому випадку вид

$$S = \frac{gt^2}{2}. \quad (2.5)$$

Якщо ми зобразимо результати досліду на графіку, по осях якого відкладені  $S$  і  $t$ , то точки розташуються довкола параболи, провести яку на



око дуже важко. Справа істотно полегшиться, якщо по осі абсцис відкладати не час  $t$ , а  $t^2$ , а по осі ординат шлях  $S$ , або відкладати по осі абсцис час  $t$ , а по осі ординат  $\sqrt{S}$ , або, нарешті, по осі абсцис  $\lg t$ , а по осі ординат  $\lg S$ .

У всіх цих трьох випадках точки будуть розташовуватися близько прямої лінії, яку неважко провести на око з достатньою точністю.

## 2.4 Корисні поради та вказівки

1. Отримати з робіт практикуму максимальну користь можна, тільки ставлячись до кожного завдання, як до невеликої самостійної наукової роботи. Описи завдань – тільки стрижні, навколо яких будується робота. Обсяг навичок і відомостей, які будуть отримані студентом при виконанні роботи, визначається головним чином не описом, а підходом студента до виконання роботи. Найцінніше, що може дати практикум, – вміння застосовувати теоретичні знання в експериментальній роботі, вміння думати з приводу своїх дослідів, вміння правильно побудувати експеримент і уникнути помилок, уміння бачити важливі й цікаві особливості й дрібниці, з яких нерідко виростають потім серйозні наукові дослідження, – всі ці навички студент повинен розвинути в собі сам у процесі наполегливої, вдумливої, свідомої, зосередженої праці.

2. Марно приступати до виконання роботи без чіткого уявлення про основні риси теорії досліджуваного явища. Не маючи ясності в основних теоретичних питаннях, студент не зможе надійно відокремити досліджуване явище від випадкових і несуттєвих перешкод, не зуміє навіть виявити, що установка несправна й непридатна до роботи.

Перед початком роботи за допомогою декількох простих дослідів, результат яких може бути заздалегідь надійно передбачений, студент повинен переконатися в справності апаратури. У перших завданнях практикуму ці досліді найчастіше будуть вказані в описах. У подальшому, студент буде повинен придумувати їх сам.

3. При виконанні роботи необхідно детально розібратися в пристрої апаратури, що застосовується. Потрібно ясно розуміти, чому з багатьох можливих схем досліду була обрана саме та, яка запропонована в описі. Потрібно до дрібниць розуміти будову застосовуваних приладів, призначення кожної деталі, кожного вирізу, кожного «гвинтика». У тих випадках, коли студент не може сам дійти до такого розуміння, слід звертатися за допомогою до викладача, але так чи інакше потрібно домогтися того, щоб пристрій приладів було цілком і до кінця з'ясовано. Головна умова успішного виконання вимірювань полягає в уважному й неквапливому ознайомленні з установкою перед вимірами, в її ретельній

перевірці та наладці. Ніколи не слід шкодувати часу на цю попередню стадію експерименту через страх не встигнути зробити вимірювання. Ці витрати часу завжди окупаються при подальшій роботі над завданням. Роботу з незнайомими приладами можна починати, лише прочитавши до кінця інструкції та з'ясувавши всі необхідні обережності. Не слід розкривати чутливих приладів, торкатися пальцями до оптичних поверхонь і тонких деталей, переносити з місця на місце гальванометри та ваги в неаретированому стані. Потрібно виробляти в собі вміння дбайливо поводитися з обладнанням.

З іншого боку, ознайомлення з приладом повинно бути активним, потрібно не лише оглянути й «зрозуміти» прилад, але налагодити й перевірити його, змастити, якщо потрібно, тертьові частини, встановити нульові показання стрілок, видалити бруд із оптичних поверхонь і т. д. Не можна розраховувати в цій справі на інших. Тільки та установка дійсно налагоджена, яка налагоджена самим експериментатором безпосередньо перед роботою. Якщо завдання не ладиться, потрібно обов'язково шукати й пробувати, висувати й перевіряти різні припущення до тих пір, поки несправність не буде виявлена. Той досвід і знання, які допомагають знайти й усунути неполадки, становлять золотий фонд експериментатора; їх не можна придбати ніяким іншим способом.

4. При збірці електричних схем слід спочатку під'єднати всі дроти, крім проводів, що йдуть від джерела живлення. Підключати джерела живлення (або включати прилади в мережу) можна тільки після того, як вся схема ретельно перевірена. На першому курсі цю перевірку повинен проводити викладач. Слід пам'ятати, що порушення правил включення електричних схем неминуче призводить до аварій та псування приладів.

5. Виміри повинні вироблятися з максимальною точністю. Тільки точні, достовірні результати дозволяють спостерігати явище у всій його повноті, надають найбільший інтерес обробці та обговоренню результатів. У точності вимірювань велику роль відіграє увага та зосередженість експериментатора, вміння вибрати розумний план роботи та спокійно, зручно організувати вимірювання. Потрібно правильно розташувати обладнання, забезпечити достатньо яскраве й рівномірне освітлення, вибрати зручну позу, періодично робити перерви у вимірах, своєчасно обдумувати попередні результати досліду і т. д. Поспішно зроблені виміри зазвичай нікуди не годяться. Прагнучи отримати найбільш точну картину явища, слід розумно погоджувати точність вимірювання різних величин одна з одною. Вимірюючи, наприклад, термічне подовження стрижнів, слід своєчасно збагнути, що навіть при великих змінах температури зміна довжини є маленькою. Тому важливо вимірювати подовження з максимальною досяжною точністю, але немає сенсу вимірювати температуру ні до сотих, ні навіть до десятих часток градуса. В описах

часто вказується, що дане вимірювання слід виробляти стільки-то разів. Ці вказівки є лише грубо орієнтовними. Число вимірювань повинен встановити сам експериментатор, ґрунтуючись на результатах своїх вимірювань. Добре налагоджені прилади вимагають звичайно меншого числа вимірювань і дають більш достовірні результати, ніж прилади, що налагоджені недостатньо ретельно. Взагалі, якщо в спостереженнях виходить великий розкид, краще спробувати налагодити установку, ніж виробляти довгий ряд вимірювань.

Якщо в задачі досліджується залежність однієї величини від іншої, число окремих точок на різних ділянках кривої вибирається з таким розрахунком, щоб детально досліджувати місця вигинів, максимумів, крутих стрибків. У тих ділянках, де крива йде плавно, ставити особливо багато точок не має великого сенсу. Область виміру змінних слід завжди брати якомога ширше, так як на кордонах широкого інтервалу часто наочніше виявляються недоліки апаратури й нові явища, вплив яких починає зазвичай позначатися істотно раніше, але не може бути там з достовірністю виявлено. Перед початком роботи корисно провести кілька попередніх вимірювань по всьому діапазону зміни змінних, щоб відразу познайомитися з основними рисами явища й правильно спланувати хід експерименту. У кінці роботи обов'язково треба повертатися до початку кривої та повторювати перші виміри. Це дозволяє перевірити стабільність роботи установки. Ще краще проробити всі вимірювання у зворотному порядку. При цьому можуть виявитися й нові цікаві подробиці в самому явищі (гістерезис).

6. Слід всіляко прагнути до акуратності й повноти чорнових (первинних) записів, які зроблені в лабораторії. Якими б розкиданими й неохайними ці дані не виглядали (вміння вести акуратний журнал первинних спостережень приходить не відразу), для них необхідно завести спеціальний зошит, який повинен пред'являтися викладачеві під час складання роботи. Домашня обробка спостережень може здійснюватися в тому ж або в іншому зошиті. На початку запису необхідно вказувати назву роботи, дату виконання, намалювати схему установки. Потрібно робити позначки про точність і чутливість приладів які застосовувались, про всі помічені неполадки. Записи вимірювань найкраще вести у вигляді таблиць із зазначенням одиниць виміру величин. Із запису має бути цілком зрозуміло, в якій послідовності виконувалися вимірювання. Перші начерки результатів повинні обов'язково робитися на самому початку роботи тут же, у лабораторному зошиті. Такі начерки дозволяють своєчасно помітити неполадки, розібратися в специфіці роботи й правильно спланувати послідовність і хід основних вимірів.

7. Обробка результатів повинна бути закінчена до початку наступної роботи. Суттєву допомогу при обробці надають графіки. Графіки слід

креслити на міліметровому папері з максимальною акуратністю. Потрібно уважно продумувати, які величини найкраще відкласти по осях координат, і вибрати зручний, розумний масштаб. Криві на графіку проводяться таким чином, щоб були ясно видно окремі точки, що були отримані в експерименті. Бажано проводити криві олівцем, щоб залишити можливість для введення поправок у процесі обговорення з викладачем. Результати, що отримані в різних серіях вимірювань, наприклад при прямому й зворотному ході, позначаються різними значками: точками, кружечками, хрестиками і т. д. При обробці результатів слід ретельно обмірковувати можливі джерела помилок. Проміжні обчислення повинні робитися з точністю, яка перевершує точність вимірювань, щоб уникнути внесення невиправданих помилок, які пов'язані з обчисленнями. При обчисленнях зазвичай зберігають на один знак більше, ніж буде залишено в остаточній відповіді.

8. Порівнюючи результати з даними таблиць або з результатами товаришів, не слід при розбіжності відразу рахувати свої дані помилковими. Потрібно ретельно продумати методіку вимірювань, намагаючись розкрити причини розбіжності, звертаючись до книг, вдаватися до допомоги викладача. При здачі роботи з «поганими» результатами студент, після обговорення з викладачем, часто отримує значно більше користі, ніж за наявності «добрих» результатів.

### 3 ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА УСТАНОВКИ

Вимірювання фізичних величин виконуються за допомогою пристроїв, що називаються вимірювальними приладами або вимірювальними установками.

Приладом називають засіб вимірювань, що призначений для отримання значень вимірюваної фізичної величини в установленому діапазоні й градуирований безпосередньо в одиницях вимірюваної величини. Вимірювальна установка зазвичай включає в себе кілька приладів і допоміжних пристроїв. Крім вимірювальних приладів застосовують ще й еталонні зразки, які відтворюють ту чи іншу фізичну величину – заходи або набори заходів. Сюди відносяться гирі, котушки, магазини опорів і індуктивностей, нормальні й гальванічні елементи (еталони електрорушійної сили) і т. д. Вимірювальні установки та прилади характеризуються межами вимірювання, чутливістю, ціною поділки шкали приладу, точністю.

#### 3.1 Чутливість

Будь-яке вимірювання є послідовністю більш-менш складних дій експериментатора та фізичних процесів в установці, результатом яких є переміщення будь-якого покажчика за шкалою. Положення покажчика відраховується спостерігачем.

Чутливістю приладу або установки називають відношення переміщення покажчика до викликаної зміни вимірюваної величини  $x$ . Переміщення зазвичай  $l$  вимірюється в міліметрах, але іноді в поділках довільної рівномірної шкали, що нанесена на прилад. На практиці часто буває корисно вводити замість лінійного переміщення  $l$  кут повороту покажчика  $\varphi$ , наприклад при визначенні чутливості дзеркального гальванометра зручно користуватися кутом повороту променя, що відбитий від дзеркала.

Отже, ми визначаємо чутливість  $E$ :

$$E = \frac{dl}{dx} \quad \text{або} \quad E = \frac{d\varphi}{dx}. \quad (3.1)$$

Іноді трактують поняття чутливості ще ширше, визначаючи її як відношення сигналів на вході й виході перетворювача; наприклад, чутливість термопари

$$E = d\varepsilon / dT,$$

де  $\varepsilon$  – ЕРС;

$T$  – температура.

Який сенс надається слову «чутливість» у кожному конкретному випадку, завжди буває зрозуміло з розмірності цієї величини.

У залежності від виду функції  $l = F(x)$  чутливість  $E$  може бути або постійною величиною ( $l \sim x$ ), або величиною, яка залежить від  $x$ . У першому випадку говорять, що прилад має лінійну шкалу, у другому нелінійну. Нелінійність шкали – зазвичай небажане явище, ускладнює вимірювання, але іноді вона буває і корисною: чутливість можна підвищити в потрібній області значень  $x$  за рахунок її зменшення в інших областях. Поряд із чутливістю  $E$  при багатьох видах вимірювань важливе значення має також поріг чутливості (або порогова чутливість), тобто мінімальна зміна вимірюваної величини, яка може бути зазначена даним приладом. Цей поріг, очевидно, тим нижче, чим більше  $E$ , але він залежить ще від конкретних умов спостереження – можливості розрізнити малі відхилення, стабільності свідчень, величини сухого тертя, яке гальмує відхилення рухомої системи приладу.

### 3.2 Ціна поділки шкали

Ціна поділки шкали у випадку приладів, шкала яких градуйована просто, у міліметрах (або в градусах, або в інших одиницях, що пропорційні лінійному переміщенню), є величина, зворотна чутливості  $E$ :

$$C = \frac{dx}{d\alpha}, \quad (3.2)$$

де  $\alpha$  – як і раніше має сенс лінійного  $l$  або кутового  $\varphi$  переміщення. Величина  $C$  зручніше, ніж  $E$  для перекладу відліків по приладу  $\alpha$  у відповідні значення вимірюваної величини  $x$ .

У паспортах і на шкалах приладів частіше вказується  $C$ , а не  $E$ . Однак слово «чутливість» частіше вживається, і часто кажуть: «Чутливість мікроамперметра 1 мкА на поділку». Оскільки розмірність вказана, це не може викликати непорозуміння. Прилади, що мають нелінійну залежність  $l$  (або  $\varphi$ ) від  $x$ , забезпечуються нерівномірною шкалою, відлік по якій пропорційний  $x$ . Ця шкала може бути цифрована безпосередньо в одиницях  $x$  або (якщо прилад призначений для вимірювання різних величин або в різних діапазонах зміни  $x$ ) у будь-яких довільних одиницях. Для такої шкали відлік  $\alpha$  вже не пропорційний переміщенню, а ціна поділки, що визначена як  $C = dx / d\alpha$ , не дорівнює  $E$ .

Вона має сенс постійного для всієї шкали перевідного множника – коефіцієнта пропорційності між відліком  $\alpha$  і  $x$ :

$$x = C\alpha. \quad (3.3)$$

Зауважимо, що в нашому визначенні «поділ» – це відрізок, що прийнятий за одиницю при цифровці шкали. Іноді говорять про поділ шкали, маючи на увазі мінімальний розподіл – відрізок між сусідніми штрихами шкали.

### 3.3 Точність приладу

Точність приладу визначається похибкою вимірювання цим приладом. У багатьох випадках прилади градууються так, щоб ціна найменшого поділу шкали декілько перевищувала максимальну помилку градуювання. У цьому сенсі між точністю й чутливістю існує округлена відповідність. Однак такого принципу градуювання дотримуються далеко не завжди, тому плутати точність і чутливість ні в якому разі не слід. Точність приладу вказується в його паспорті або на його шкалі. Вказується максимальна абсолютна або відносна похибка градуювання.

Прилади в залежності від точності поділяються на класи: перший (вищий), другий і т. д. Допустимі похибки для кожного класу визначаються державними стандартами за приладами відповідного типу. Для деяких типів приладів і пристроїв (наприклад для електровимірювальних) клас точності виражається числом, безпосередньо вказує в обумовленій стандартній формі основну похибку градуювання, тобто максимальну помилку, яка допускається при роботі в нормальних умовах (граничні межі температури, вологості, напруженості зовнішніх полів, частоти й форми струму і т. д.).

## 4 ДЕЯКІ ПРИЛАДИ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У сучасній науці й техніці використовується багато різноманітних приладів для вимірювання довжин і мас з великим ступенем точності. У ряді лабораторних робіт необхідна точність вимірювань довжин і мас порівняно незначна. У таких випадках користуються більш простими приладами, такими, як масштабна лінійка, штангенциркуль, мікрометр, сферометр, технічні ваги.

Одиницею довжини в Міжнародній системі одиниць, що прийнята в Україні, є метр. Метр – довжина, яка дорівнює 1650763,73 довжин хвиль у вакуумі випромінювання, відповідного переходу між рівнями  $2P_{10}$  та  $5d_5$  атома криптону 86 (Міжнародна система одиниць ГОСТ 9867-61).

Одиницею маси в Міжнародній системі одиниць, що прийнята в Україні, є кілограм. Кілограм визначається як маса міжнародного еталона кілограма, що зберігається в Міжнародному бюро мір і ваг (розташоване в м. Севр поблизу Парижа) і представляє собою циліндр діаметром і висотою 39,17 мм з платино-іридієвого сплаву (90 % платини, 10 % іридію).

### 4.1 Масштабна лінійка

У лабораторному практикумі при виконанні робіт з механіки («Відпрацювання методики проведення вимірів і розрахунку їхніх помилок за допомогою установки для визначення питомого опору резистивного проводу», «Перевірка другого закону Ньютона при поступальному русі», «Дослідження удару двох куль», «Вивчення обертального руху твердого тіла», «Вивчення законів динаміки обертального руху й визначення моментів інерції твердих тіл за допомогою маятника Максвелла», «Визначення моменту інерції маховика), молекулярної фізики й термодинаміки («Визначення  $C_p/C_v$  для повітря методом Клемана – Дезорма», «Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса», «Визначення середньої довжини вільного пробігу і ефективного діаметра молекул повітря»), електрика й магнетизм («Визначення електрорушійної сили елемента методом компенсації», «Визначення питомого опору металів по спаду напруги», «Визначення індукції магнітного поля котушки») застосовуються для вимірювання довжини сталевий або дерев'яної лінійки, яка розділена на сантиметри і міліметри. Ділення шкали лінійки не можуть бути дуже дрібними – інакше вони будуть практично невидимі. Так, наприклад, на масштабній лінійці практично неможливо нанести поділ частіше, ніж через 0,5 мм. Окомірна



помилка при відліку по лінійці становить кілька десятих часток міліметра. З цієї причини за допомогою лінійки можна робити вимірювання з точністю 0,5 мм, тобто з можливою максимальною помилкою в 0,5 мм у більшу чи меншу сторону. Для підвищення точності відліку використовуються різні пристосування, які забезпечені інтерполяційними шкалами. До найбільш вживаних інтерполяційних шкал відносяться лінійний ноніус і мікрометричний гвинт.

## 4.2 Штангенциркуль

Штангенциркуль використовується для вимірювання лінійних розмірів тіл у лабораторному практикуму з фізики у розділах механіка («Вивчення обертального руху твердого тіла», «Вивчення законів динаміки обертального руху та визначення моментів інерції твердих тіл за допомогою маятника Максвелла», «Визначення моменту інерції маховика») та молекулярна фізика й термодинаміка («Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса»).

Лінійним ноніусом називається невелика додаткова шкала, яка може переміщатися вздовж основної шкали. Обидві шкали повинні бути рівномірними.

Розглянемо пристрій і принцип роботи з вимірювальним приладом, що обладнаний такою додатковою інтерполяційною шкалою. До таких пристроїв відноситься штангенциркуль, який складається з міцної масштабної лінійки  $F$ , що розділена на сантиметри й міліметри (рис. 4.1). На початку лінійки укріплені нерухомі губки  $A$  і  $A^1$ . За лінійкою переміщується движок  $D$ , який становить одне ціле з губками  $E$  і  $E^1$ . Ці губки, що паралельні губкам  $A$  та  $A^1$ , можуть підходити до них впритул. Движок фіксується в потрібному положенні гвинтом  $B$ . У вирізі движка є скіс  $C$ , край якого припадає проти поділок масштабної лінійки. На ньому нанесені поділки дещо меншого масштабу, ніж ділення основної шкали. Це доповнення до масштабної лінійки дозволяє підвищити точність вимірювань і є, як сказано вище, лінійним ноніусом.

Шкала ноніуса будується так, щоб  $m$  ділень ноніуса відповідали  $m - 1$  поділу основної шкали. Позначимо ціну поділки основної шкали  $x_0$ , а шкали ноніуса –  $x$ . Тоді очевидно, що

$$mx = (m - 1)x_0. \quad (4.1)$$

Звідки

$$x = x_0 - x_0 / m. \quad (4.2)$$

Різниця між ціною поділки основної шкали та ціною поділки ноніуса називається точністю ноніуса.

$$\Delta x = x_0 - x = x_0 / m. \quad (4.3)$$

Іншими словами, точність ноніуса дорівнює ціні поділки шкали масштабної лінійки, що поділена на число ділень ноніуса.

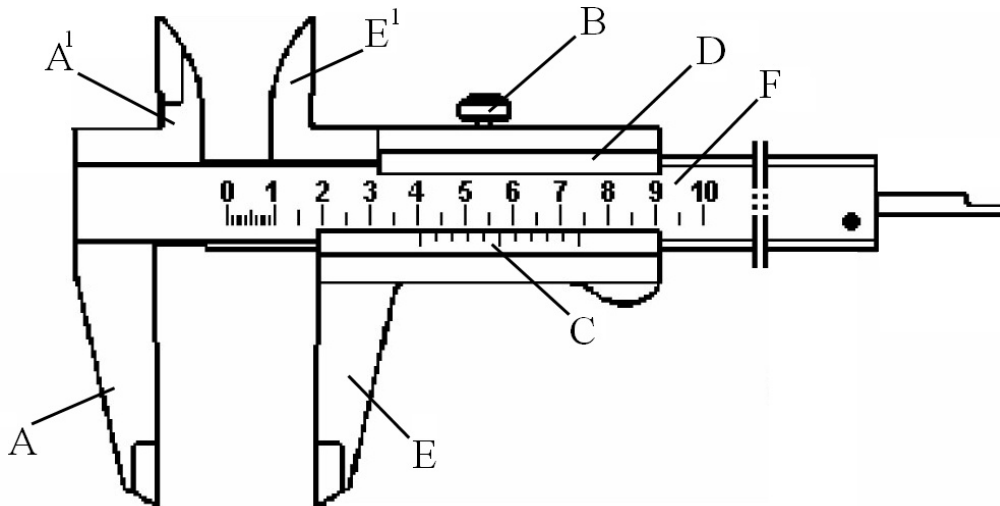


Рисунок. 4.1 – Схема штангенциркуля

Наприклад  $m = 10$ , а  $x_0 = 1$  мм. Якщо ми поєднаємо нульове ділення шкали такого ноніуса з нульовим діленням основної шкали, то 10-й поділ ноніуса виявиться поєднаним із 9-м поділом масштабної лінійки. При цьому 1-й поділ ноніуса не дійде до першого поділу лінійки на 0,1 мм, друге ділення ноніуса не дійде до другого поділу лінійки на 0,2 мм і т. д. (рис. 4.2).

При суміщенні  $n$ -го поділу ноніуса з  $(k + n)$  діленням масштабної лінійки, початок шкали ноніуса виявиться між  $k$  і  $k + 1$  діленням основної шкали (див. рис. 4.2). При цьому зсув початку шкали ноніуса щодо  $k$ -го поділу основної шкали буде, очевидно складати  $n$  десятих часток мм (у загальному випадку). Звідси впливає таке правило відліку довжини за допомогою ноніуса: вимірювана довжина  $l$  дорівнює числу цілих поділок основного масштабу, які містяться в ній ( $kx_0$ ), що складений із точністю ноніуса, що помножений на номер ( $n$ ) його ділення, що збігається з одним із поділів основного масштабу:

$$l = kx_0 + nx_0 / m. \quad (4.4)$$

Якщо при вимірюванні не виявиться ні одного поділу ноніуса, – яке збігалось б точно з поділом основної шкали, відлік береться по тому з поділів, що ближче всіх інших розташований по відношенню до одного з

поділів масштабної лінійки. Величина розбіжностей таких поділів, очевидно, не буде перевищувати  $\Delta x/2$ . Звідси випливає, що похибка відліку по ноніусу дорівнює половині його точності. Шкали штангенциркуля наносяться таким чином, що при зрушених губках нуль шкали ноніуса й нуль основної шкали збігаються. При вимірюванні довжини штангенциркулем предмет поміщають між губками, губки зсувають до зіткнення з предметом і закріплюють їх в такому положенні затискним гвинтом В. Потім проводять відлік довжини за допомогою ноніуса. Ноніус штангенциркуля має звичайно ціну поділки 0,1 або 0,05 мм. Похибка градування штангенциркуля – 0,1 і 0,05 мм відповідно.

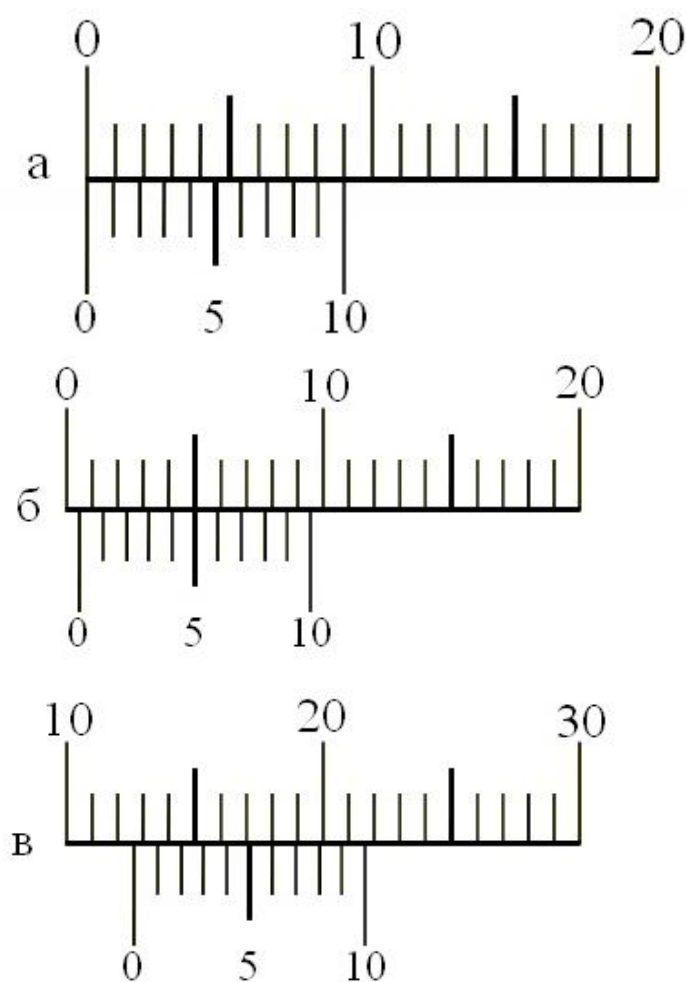


Рисунок. 4.2 – Зображення поділок ноніуса та масштабної лінійки

### 4.3 Мікрометр

Для більш точних вимірювань лінійних розмірів у лабораторних роботах «Відпрацювання методики проведення вимірів і розрахунку

їхніх помилок за допомогою установки для визначення питомого опору резистивного проводу», «Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса» і «Визначення питомого опору металів по спаду напруги» використовується мікрометр.

Мікрометр являє собою масивну сталеву скобу (рис. 4.3), на кінцях якої знаходяться один проти одного нерухомий упор А і мікрометричний гвинт В. Мікрометричний гвинт дає можливість відраховувати більш дрібні долі поділки основної шкали, ніж ноніус. Він являє собою особливо ретельно виготовлений гвинт із точно відомим кроком (відстанню між витками); зазвичай крок дорівнює 0,5 або 1 мм. Головка гвинта являє собою лімб або барабан із поділками, що дозволяють точно відраховувати кути повороту. Якщо крок гвинта дорівнює  $l$ , а головка розділена на  $n$  поділів, поворот на одну поділку відповідає поздовжньому переміщенню на  $l/n$ . Це і є ціна розподілу мікрометричного гвинта. Відлік цілих оборотів проводиться за поздовжньою шкалою, що нанесена на втулці або скріплена в лінійці.



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд мікрометра

При роботі з мікрометричними гвинтами необхідно мати на увазі, що гвинти завжди мають вільний хід, від якого важко позбутися. Тому при вимірюванні довжин необхідно підводити покажчик до обох кінців вимірюваного відрізка з однієї й тієї ж сторони. Проводячи повторні вимірювання, слід відсувати гвинт назад, на відстань, що перевищує вільний хід, і потім знову підводити його з того ж боку. Зрозуміло, що корисно повторити вимірювання при зворотному напрямку руху гвинта, але при цьому кожному з кінців вимірюваного відрізка будуть відповідати інші відліки, тільки їх різниця не повинна залежати від напрямку руху гвинта.

При вимірюванні з мікрометричним гвинтом трапляються досить часто помилки у відліку. Наприклад, якщо крок гвинта дорівнює 0,5 мм, дуже легко зробити помилку при відліку по поздовжній шкалі. Щоб

уникнути подібних помилок, необхідно дотримуватися наступного правила. Спочатку проводиться наблизений відлік по основній шкалі з оцінкою долі поділки на око. Результати цього відліку обов'язково записуються. Потім проводиться остаточний відлік за ноніусом або головкою мікрометричного гвинта. Запис результатів ведеться за такою формою(табл. 4.1).

Вимірювання з мікрометричним гвинтом

Шкала	Барабан	Відлік
5,9	0,7	$0,7 \pm 0,005$
5,8	49	5,99
6,0	11	6,11
6,0	0,8	6,08

$$d = 6,07 \pm 0,005 \text{ мм}$$

### *Порядок роботи з мікрометром*

Вимірюваний предмет поміщають між гвинтом В і протилежним йому упором А і, обертаючи гвинт, доводять його до зіткнення з предметом. Крок гвинта зазвичай дорівнює 0,5 мм, барабан розділений на 50 частин, тобто ціна ділення барабана – 0,01 мм. Похибка градування мікрометрів становить 0,005 мм. Зазвичай мікрометри виготовляються на межі вимірювань 0 – 25, 25 – 50, 50 – 75 мм і т. д.

Барабан слід обертати, прикладаючи зусилля не до нього самого, а до голівки D. Вона з'єднується з гвинтом за допомогою «трещітки», яка передає зусилля тільки до тих пір, поки воно не досягне визначеної іншої величини. Коли ж ця величина досягнута, подальше обертання головки відбувається «вхолосту» і не змінює свідчення мікрометра.

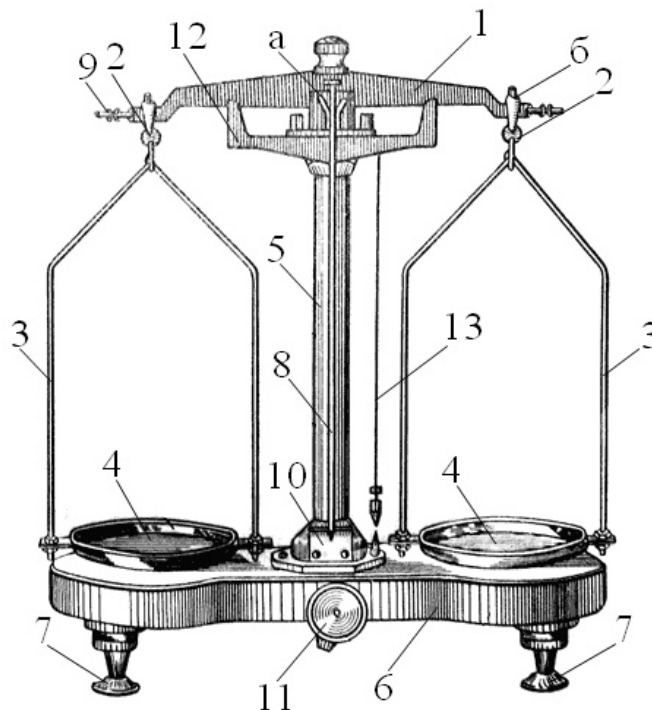
Таким чином, остаточний результат вимірювання завжди відповідає постійному тиску гвинта на предмет. Після того як предмет, що вимірюється, затиснутий за допомогою трещітки між упором і гвинтом, за шкалою втулки відраховуються ціле й напівціле число міліметра; до цього відліку має бути додано число сотих часток міліметра, що відраховані за шкалою барабана С. Перш ніж приступити до вимірювань за допомогою мікрометра, потрібно переконатися в тому, що при доведенні гвинта до упору за допомогою трещітки, виходить по обох шкалах нульовий відлік.

## **4.4 Прилад для вимірювання маси**

Визначення ваги тіла на технічних вагах здійснюється студентом при виконанні лабораторної роботи «Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву краплі».

Для визначення маси тіл застосовуються ваги. У лабораторній практиці найбільш часто вживаються два типи ваг: аналітичні, що дозволяють зважувати тіла масою до 200 г із точністю порядку 0,1 мг, і технічні, які мають точність від 0,01 до 0,1 м. Оскільки така точність зважування найбільш часто виявляється достатньою, обмежимося описом технічних ваг.

Технічні ваги (рис. 4.4) складаються з наступних основних частин: коромисла 1, двох чашок 4 з підвісками 3 та сержками 2, колонки 5 на дерев'яній або пластмасовій підставці 6 з установочними гвинтами 7. На коромислі жорстко укріплені три сталеві призми. Ребро опорної призми *a* (у центрі) служить віссю обертання коромисла, ребра вантажопідіймальних призм *b* (по краях) служать точками прикладання сили ваги вантажу, що зважується або гир. Під середньою призмою коромисла укріплена стрілка 8, що відзначає за шкалою 10 положення коромисла. Положення рівноваги коромисла можна регулювати, поєднуючи його центр інерції поворотом важеля, що насаджений на вертикальну вісь над середньою призмою. В інших моделях ваг для тієї ж мети є тарировочні гайки 9 які нагвинчують на шпильки, що укріплені на кінцях коромисла.



Рисинук 4.4 – Технічні ваги

Сережки в нижній частині мають подвійні гачки для навішення підвісок з чашками, а у верхній частині – сталеві подушки, за допомогою яких сережки спираються на ребра вантажопідіймальних призм. Завдяки такій шарнірній підвісці, чашки можуть розгойдуватися й на своєму підвісі незалежно від коромисла.

Середня призма коромисла спирається на сталеву подушку, що укріплена на стержні, що проходить всередині колонки. Нижнім кінцем стрижень впирається в ексцентрик, який можна повертати рукояткою 11, піднімаючи й опускаючи стрижень. При опущеному стержні коромисло лягає на спеціальні упори 12, що змонтовані на колоні, а чашки на підставку ваг – ваги арретировані. Ніжки з установочними гвинтами 7 дозволяють встановлювати колону ваг у вертикальне положення, що перевіряється по схилу 13.

#### 4.5 Зважування на технічних вагах

Перед зважуванням перевірте справність ваг. Для цього обережно звільніть ваги від аретира й стежте за стрілкою. У справних вагах коромисло (а отже, і стрілка) почне плавно гойдатися біля положення рівноваги (яке може й не збігатися з середнім поділом шкали). Якщо положення рівноваги дуже сильно зміщене відносно середнього ділення шкали, можна (з дозволу викладача або лаборанта) відрегулювати ваги. Для цього, арретировав їх, слід повернути важіль на коромислі або пересунути одну з тарувальних гайок. Потім знову перевірити ваги. Домагатися того, щоб положення рівноваги стрілки точно збігалось із середнім поділом шкали не потрібно, достатньо, щоб стрілка коливалася в межах шкали.

Визначте нульову точку, тобто, той поділ шкали  $n_0$ , який відповідає положенню рівноваги ненавантажених ваг. Не слід чекати поки коливання коромисла загаснуть, становище рівноваги визначається як центр, біля якого відбуваються гойдання. Нульову точку слід шукати до й після зважування. Зміни його положення повинні лежати в межах допустимої по паспорту варіації.

Покладіть на ліву чашку тіло, що зважується, а на праву – гирі. Накладати гирі слід починаючи з найбільшою й не однієї не пропускаючи. Помістивши гирі на чашку ваг, потрібно злегка відпустити арретир, не допускаючи відхилення, і зараз же знову арретировав ваги. При недовантаженні гиря залишається на чашці, при перевантаженні – знімається, потім на чашку поміщається наступна гиря і т. д., поки не буде випробувана мінімальна гиря важків. Підбираючи найдрібніші гирі,

стежте за коливаннями стрілки й визначайте положення рівноваги навантажених ваг  $n_0^1$ , домагаючись рівності)  $n_0 = n_0^1$ .

Основною величиною, що характеризує ваги, є їх чутливість. Чутливістю ваг називається відношення тангенса кута відхилення стрілки (або пропорційного йому числа поділок, на яке переміщається стрілка за шкалою) до ваги того додаткового перевантаження, який викликає це відхилення.

На практиці чутливість ваг часто характеризують величиною вантажу, що відхиляє стрілку ваг від положення рівноваги на одну поділку. Очевидно, що чим менше цей вантаж, тим вище чутливість.

Якщо самі дрібні з наявних гир не впливають на стан рівноваги, похибка підбору маси можна визначити як половину мінімальної гирі, що викликає помітне відхилення. Якщо ж чутливість висока і мінімальна гиря важків викликає помітне відхилення, то похибка буде дорівнювати половині маси мінімальної гирі.



## 5 ЕЛЕКТРОННИЙ ОСЦИЛОГРАФ

Принцип роботи електронного осцилографа вивчається в розділі фізики «Електрика і магнетизм» при виконанні лабораторної роботи «Вивчення роботи електронного осцилографа». Як пристрій для дослідження електричних сигналів електронний осцилограф використовується в роботах: «Вивчення релаксаційних коливань у схемі з газорозрядною лампою», «Дослідження коливань у простому коливальному контурі», «Дослідження коливань звукової частоти за допомогою електронного осцилографа», «Визначення швидкості звука в повітрі методом акустичного резонансу».

Електронний осцилограф являє собою прилад, що має виключно широку область застосування. Основною частиною приладу є електронно-променева трубка, в якій пучок електронів, які швидко летять, може відхилятися в двох взаємно перпендикулярних напрямках під дією поперечних електричних або магнітних полів. У результаті світло пучка на екрані описує криву, яка зображує функціональну залежність між напруженістю відхиляючих полів.

Найчастіше застосовують осцилограф для вивчення залежності різних величин від часу. Електронний осцилограф незамінний для спостереження й дослідження електричних процесів. За його допомогою можна дослідити форму кривих, що описують процеси, порівнювати амплітуду й частоту різних змінних напруг. Можна осцилограф використовувати також як пікового вольтметра для вимірювання напруги й струму, хоча точність прямих вимірювань напруг за допомогою осцилографа невелика. Однак важлива перевага осцилографа – безінерційність у дуже широкому діапазоні частот і напруг будь-якої форми, а головне – можливість одночасно з вимірюванням пікового значення спостерігати форму тимчасової залежності напруги – у багатьох випадках спокутують недолік точності. Застосовуючи спеціальні перетворювачі, за допомогою осцилографа можна також дослідити швидкі неелектричні процеси, наприклад, механічні коливання. Блок-схема осцилографа представлена на рис. 5.1. Основний блок осцилографа – електронно-променева трубка (ЕПТ), в якій виникає й фокусується електронний промінь, там же розташовані системи, за допомогою яких можна управляти рухом променя, відхиляючи його у вертикальному й горизонтальному напрямках. Рухомий промінь залишає на екрані трубки, що покрита спеціальним складом, що світиться слід. Інші основні блоки осцилографа – блок попереднього підсилення, блок розгортки (БР) і блок живлення (БЖ), що забезпечує напругою всю схему осцилографа.

Осцилограф має два входи. Сигнал, що поданий на вхід 1, надходить на підсилювач  $У1$ , а потім подається на вертикальну систему електронно-променевої трубки, що відхиляє. Сигнал, що поданий на вхід 2, надходить на підсилювач  $У2$ , а потім подається на горизонтальну систему електронно-променевої трубки, що відхиляє. Надалі вхід 1 будемо називати –  $Y$  входом, вхід 2 –  $X$  входом.

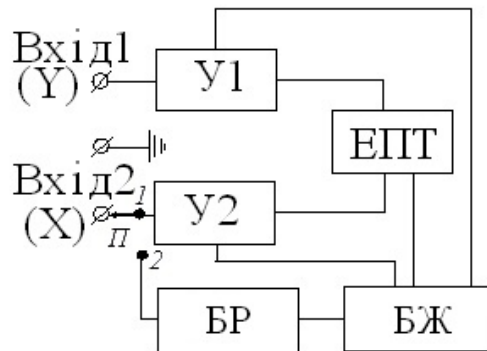


Рисунок 5.1 – Блок-схема осцилографа

Розрізняють два основні режими роботи осцилографа. У першому режимі на входи  $X$  і  $Y$  подаються два зовнішніх сигнали. Перемикач  $\Pi$  встановлений у положення 1. У результаті складання цих сигналів, що діють по двох взаємно перпендикулярних напрямках, на екрані електронно-променевої трубки з'являється лінія. У другому режимі на  $Y$  – вхід подається один зовнішній сигнал. Перемикач  $\Pi$  поставлений у положення 2.

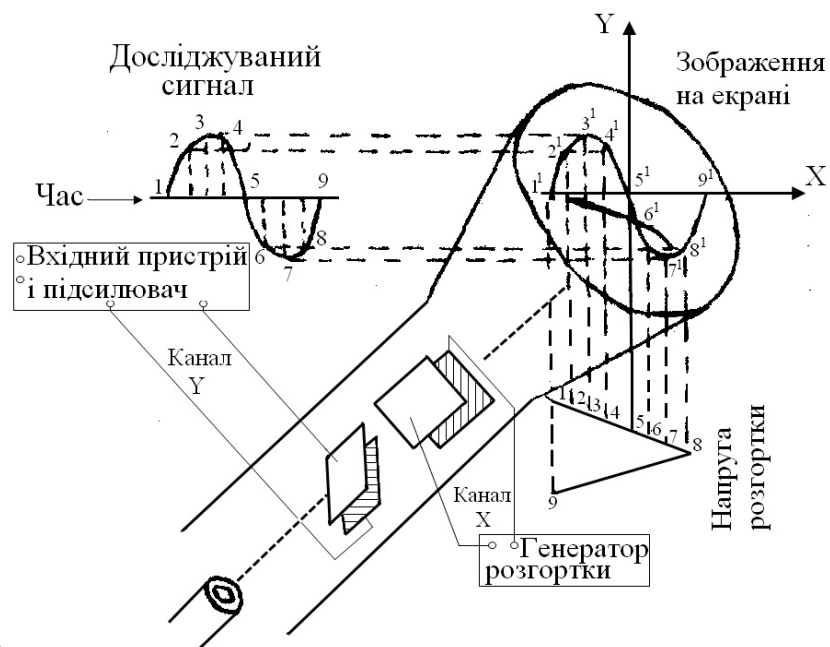


Рисунок 5.2 – Схема отримання розгорнутого в часі зображення

На підсилювач У2 подається вихідна напруга генератора розгортки, що забезпечує переміщення променя в горизонтальному напрямку по лінійному закону. На екрані електронно-променевої трубки виникає лінія, що характеризує зміну зовнішнього сигналу в часі. Крім перерахованих вище основних блоків, що наведені на рис. 5.1, в осцилографі використовуються додаткові пристрої. Принцип отримання розгорнутого в часі зображення, що досліджується на екрані осцилографа показаний на рис. 5.2.

## 5.1 Електронно-променева трубка

Електронно-променева трубка є основним вузлом будь-якого осцилографа. Вона являє собою скляну колбу, що відкачана до високого вакууму, усередині якої змонтовані електроди.

Пристрій найпростішої трубки з електростатичним керуванням показано на рис. 5.3. Електронний пучок створюється електронною гарматою, що складається з підігрівача 1, катода 2, який охоплює циліндричний керуючий електрод 3, який називають керуючим електродом або модулятором і двох анодів 4 і 5. Електрони, що вилітають з отвору модулятора, як з точкового джерела, прискорюються двома послідовно розташованими циліндричними анодами. Поле між анодом 4, який фокусує, та анодом 5, який пришвидшує електрони еквівалентно комбінації збиральної й розсіючої лінз. Змінюючи потенціал фокусуєчого анода можна регулювати фокусну відстань лінз. При виході з електронної гармати електрони повинні опинитися в просторі, що вільний від збуджуваних полів. Тому трубку поміщають у металевий екран, а для того щоб не було поля між заземленим екраном і другим анодом, останній зазвичай заземлюють.

Пучок електронів із заданою швидкістю, що визначається різницею потенціалів між катодом і другим анодом, проходить між двома парами відхиляючих пластин 6 і 7. Відхилення променя залежить від напруги, що прикладена до пластин і швидкості електронів. Екран електронно-променевої трубки зазвичай покривають сірчистим цинком, який під дією падаючих на екран електронів, світиться зеленим світлом.

Однією з характеристик електронно-променевих трубок є їх чутливість, тобто величина відхилення променя на екрані трубки в міліметрах при нарузі 1 В на відповідній парі пластин. Чутливість на горизонтально й вертикально відхиляючих пластинах трубок не однакова. У перших вона звичайна на 10 – 20 % нижче, так як вони розташовані ближче до екрану.

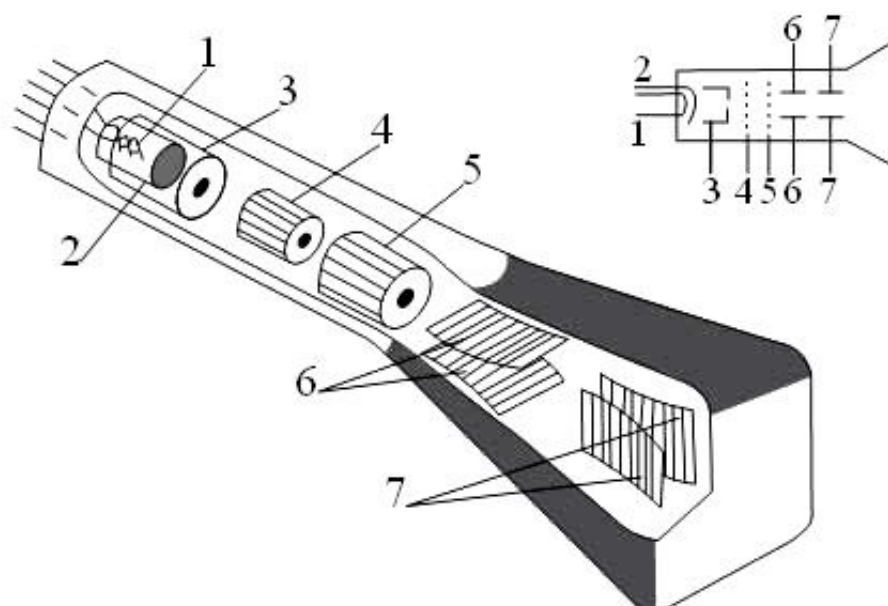


Рисунок 5.3 – Схема електронно-променевої трубки

У кращих трубках чутливість досягає величини порядку 1мм/В. Щоб дослідити слабкі сигнали осцилографи забезпечуються підсилювачами. Зазвичай вони мають невеликий коефіцієнт підсилення – до декількох десятків, але дуже широку смугу пропускання – від десятка герц до сотень кілогерц, або до декількох мегагерц і дуже рівномірну частотну характеристику, тобто коефіцієнт підсилення майже не залежить від частоти.

Коефіцієнт підсилення може регулюватися, звичайно, за допомогою потенціометра, що поставлений на вході підсилювача.

Для кількісних вимірів напруг необхідно знати чутливість осцилографа. Для калібрування підсилювачів, тобто для визначення чутливості, в осцилографах передбачається спеціальне джерело калібрувальної напруги. Зазвичай це синусоїдальна напруга частотою 50 Гц із ланцюгів живлення, що стабілізована для зменшення залежності від коливань напруги мережі. Калібрована напруга регулюється потенціометром (ручка «Калібрування напруги») подається на вхід підсилювача вертикального відхилення, коли перемикач «Дільник» знаходиться в положенні «Калібр», калібрована напруга подається без ступінчастого дільника, безпосередньо на вхід потенціометра «Підсилення». Таким чином, якщо, не чіпаючи ручки цього потенціометра, домогтися того, щоб розмах синусоїди калібрувального сигналу на екрані дорівнював досліджуваному сигналу, то при положенні ручки подільника «1:1» і «50,0 мм» величину останнього можна безпосередньо відрахувати за шкалою імпульсних напруг.

## 5.2 Генератор розгортки

Для вивчення часового ходу процесів потрібно подавати на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа напругу, яка лінійно залежна від часу – напругу розгортки. У більшості випадків для вивчення періодичних процесів застосовують лінійну безперервну розгортку – періодичну пилоподібну напругу (рис. 5.4, а). Період розгортки підбирається як ціле, кратне періоду досліджуваного сигналу, щоб слід електронного пучка на екрані з кожним повторенням циклу розгортки накреслював одну й ту ж траєкторію. Така напруга створюється за допомогою генератора розгортки. У генераторі розгортки використовується процес змінної зарядки або розрядки конденсатора. Принципова схема генератора показана на рис. 5.4, б. Конденсатор С підключається поперемінно до джерела постійної напруги через більший опір  $R_1$ , через який він повільно заряджається, і до меншого опору  $R_2$ , через який він швидко розряджається.

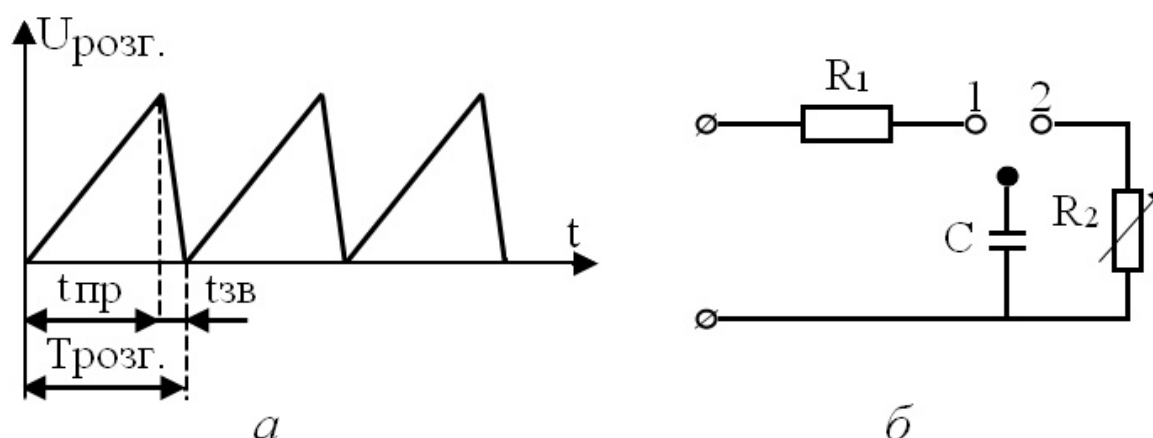


Рисунок 5.4 – а – графік пилоподібної напруги; б – принципова схема генератора

При мінімальному значенні розгортаючої напруги (див. рис. 5.4, а) промінь знаходиться на екрані осцилографа в крайньому лівому положенні. При зростанні пилоподібної напруги промінь переміщається з постійною швидкістю зліва направо по горизонтальній прямій (вісь часу). Коли напруга спадає, промінь здійснює зворотний хід. Період лінійної розгортки  $T_{розг} = t_{пр} + t_{зв}$ . Для отримання високоякісного зображення досліджуваного процесу необхідно виконання умови  $t_{зв} \ll t_{пр}$ . Зворотний хід променя на екрані не видно, так як в осцилографі є пристрій, що гасить промінь під час зворотного ходу.

Дослідження неперіодичних імпульсів виконується за допомогою затриманої розгортки. У цьому випадку пилоподібна напруга подається на

горизонтально відхиляючи пластини лише тоді, коли досліджуваний імпульс надходить на вхід осцилографа. Після того, як під дією напруги, що розгортає, промінь здійснить один цикл прямого і зворотного ходу, розгортка припиняється і «чекає» приходу нового імпульсу, що запускає її.

Напруга розгортки повинна включатися дещо раніше, ніж досліджуваний сигнал надійде на вертикально відхиляючі пластини. Передбачена в осцилографі затримка затримує досліджуваний імпульс по відношенню до початку розгортки.

Для отримання на екрані трубки чіткого й не розмитого зображення необхідно правильно вибрати синхронізацію розгортки. Процес синхронізації полягає в примусовому впливі зовнішнього сигналу на генератор розгортки. У результаті генератор починає генерувати з частотою, яка дорівнює й кратна частоті впливаючої напруги.

Осцилографи мають три види синхронізації: внутрішню, зовнішню й від мережі. У режимі внутрішньої синхронізації синхронізація здійснюється досліджуваною напругою. Зовнішня синхронізація здійснюється напругою від зовнішнього джерела. У більшості випадків найбільш зручно синхронізувати розгортку самим досліджуваним сигналом, тобто користуватися внутрішньою синхронізацією.

Для вимірювання тривалості імпульсу виробляється модуляція електронного променя за яскравістю калібраційними мітками часу. Знаючи тривалість маркерної мітки та їх кількість, яка укладається за час  $t$ , визначають відповідний час. Використовуючи калібраційні мітки часу, можна зробити вимірювання часових параметрів, що характеризують імпульсний сигнал. На рис. 5.5 зображений імпульсний сигнал довільної форми.

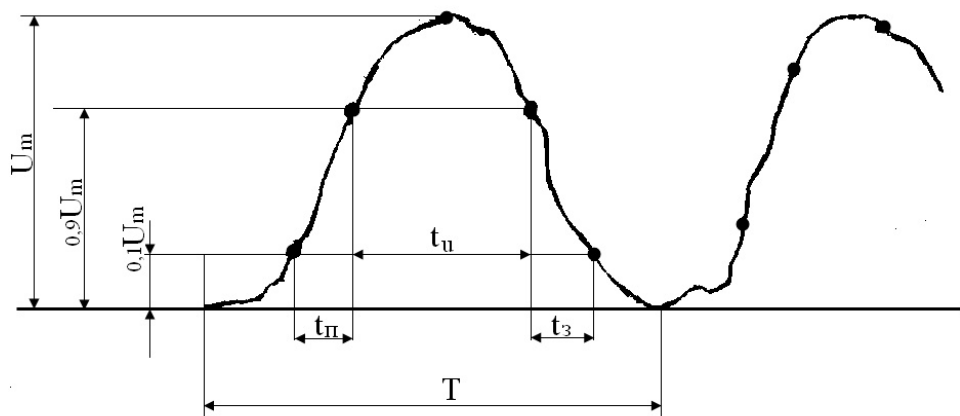


Рисунок 5.5 – Зображення імпульсного сигналу

Для нього можуть бути виміряні наступні параметри: амплітуда імпульсу, найбільша висота по вертикалі без обліку викидів; тривалість імпульсу ( $t_u$ ) – час між початком і кінцем імпульсу на рівні 0,9 від амплітудного значення; час переднього  $t_n$  і заднього  $t_z$  фронту, тобто час, протягом якого імпульс збільшується від 0,1 до 0,9 амплітудного значення або спадає від 0,9 до 0,1; період проходження імпульсу  $T$ . З отриманих даних може бути обчислена частота імпульсів  $\nu = 1/T$  і шпаруватість  $Q = T/t_n$ . Ціна мітки зазвичай дається у мкс. Правильний вибір оптимальної ціни мітки забезпечує зручність відліку і необхідну точність вимірювання.

### 5.3 Включення осцилографа

Перш ніж підключити осцилограф до мережі, необхідно перевірити, чи відповідає положення мережевого перемикача номінальній напрузі й частоті мережи (220 В, 50 Гц). Корпус приладу має бути заземлений (для заземлення служить клема на передній панелі приладу).

Слід ознайомитися з розташуванням ручок управління й перевірити, чи ясно ви розумієте їх маркування (рис. 5.6).

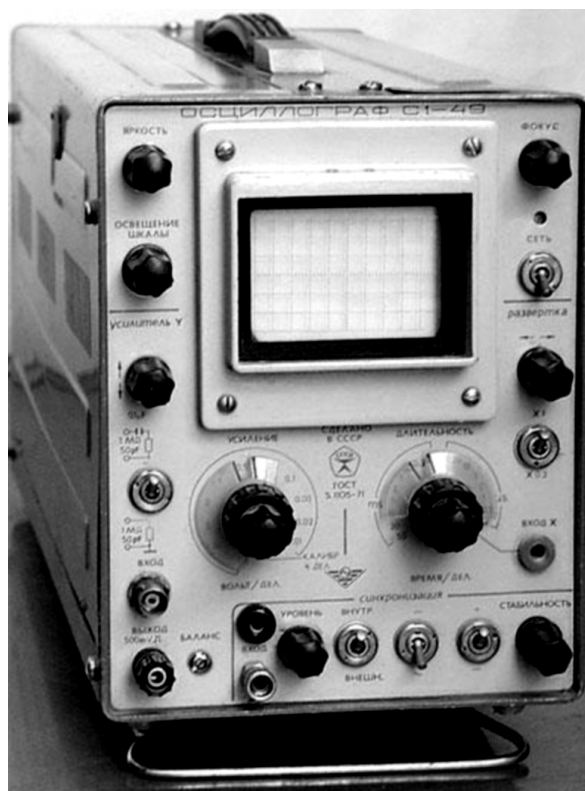


Рисунок 5.6 – Зображення передньої панелі осцилографа С1-49

Перед включенням треба поставити ручки зміщення променя в середнє положення, вивести потенціометри «Яскравість», «Підсилення», поставити перемикач «Синхр.» у положення «Зовніш.». Після цього можна включити тумблер «Мережа». Почекавши 2-3 хвилини, щоб дати катодам ламп і трубки час нагрітися, можна ввести потенціометр регулювання яскравості до появи світлої плями на екрані, потім сфокусувати пучок і вивести його в центр екрану. Необхідно пам'ятати, що нерухомий пучок може пропалити екран. Тому зайве збільшувати яскравість пучка не слід. Крім того, потрібно намагатися не залишити пучок нерухомим: коли досліджуване напруга не подана на вхід осцилографа, слід включити генератор розгортки. При дотриманні цих правил можна тримати осцилограф включеним на весь час роботи, вимикаючи його тільки при дуже тривалих перервах. Перед підключенням досліджуваного сигналу до осцилографа ручки «Підсилення» повинні бути повернені до відмови вліво і вводити їх треба поступово.

#### 5.4 Звуковий генератор ГЗ-33

Генератор ГЗ-33 являє собою джерело синусоїдальних електричних коливань звукових і ультразвукових частот. Блок-схема звукового генератора наведена на рис. 5.7. У задаючому генераторі збуджуються синусоїдальні електричні коливання, частота яких 20-200000 Гц у залежності від налаштування. Амплітуда коливань регулюється підсиленням потужності. Потім коливання подаються на вольтметр і на дільник напруги до 100 дБ. Живлення генератора проводиться від мережі змінного струму напругою 220 В. Потужність, яку споживає генератор не перевищує 150 Вт.

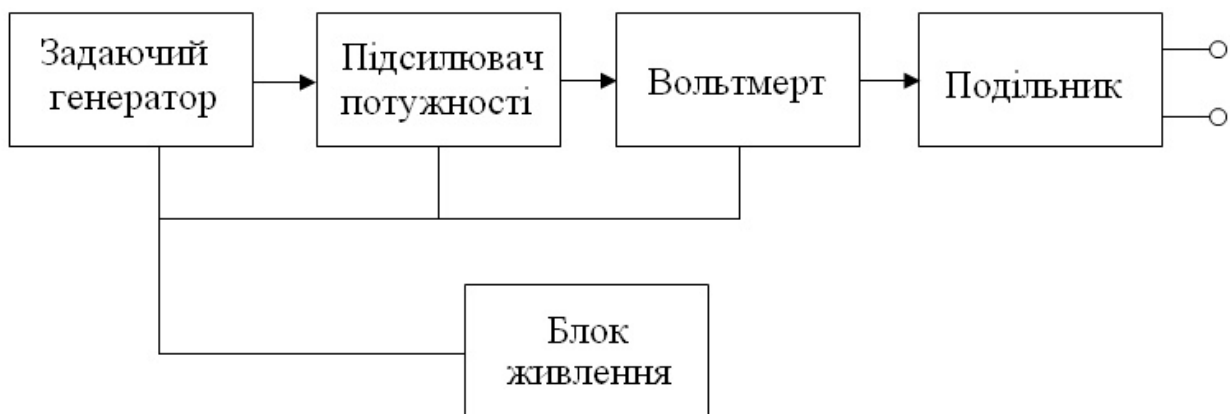


Рисунок 5.7 – Блок-схема звукового генератора



Ручки управління звуковим генератором виведені на його панель (рис. 5.8). Частота коливань встановлюється поворотом ручки перемикача (1) «Множник» (ступеневе регулювання) і поворотом лімба (2) (плавне регулювання). Для визначення частоти генератора в герцах відлік за шкалою лімба потрібно помножити на показання перемикача «Множник». Обертанням ручки (3) «Налаштування» можна плавно змінити частоту в межах 1,5 від встановленої.

Коливання які збуджуються в генераторі подаються на клеми (4) «Вихід». Напруга на виході плавно регулюється ручкою (5) «Реєстр. Вих. Напр.», і ступенями через кожні 10 дБ за допомогою перемикача аттенюатора (6) (дільника), що має гравіювання, «Межі шкали» – «Ослаблення дБ».

Перемикач меж шкали в залежності від вихідного опору проводиться перемикачем (7) «Вихідний опір»

В залежності від напруги проводиться перемикач меж шкали вольтметра перемикачем (8) «Шкала прибору».



Рисунок 5.8 – Зовнішній вигляд звукового генератора ГЗ-33

При роботі на опорах навантаження значно більше ніж 600 Ом, для правильного відліку вихідної напруги слід включити внутрішнє навантаження тумблером (9) «Внутр. Навант.».

## 5.5 Включення генератора

Вилку шнура включити в мережу змінного струму напругою 220 В частотою 50 Гц. Тумблер (10) включення мережі поставити в положення «Вімкнено», при цьому повинна загорітися сигнальна лампочка (11) (див. рис. 5.8). До роботи слід приступити після попереднього прогріву протягом 20 – 30 хвилин.

Після прогріву генератора ручкою «Множник» і поворотом лімба встановити потрібну частоту:

1. Частоти першого піддіапазону 20-200 Гц встановлюються поворотом шкали лімба, при цьому перемикач «Множник» знаходиться в положенні  $\times 1$ . Частота в герцах відповідає відліку шкали;

2. Частоти другого піддіапазону 200-2000 Гц встановлюються поворотом шкали лімба, при цьому перемикач «Множник» знаходиться в положенні  $\times 10$ , відлік шкали множиться на 10;

3. Частоти третього піддіапазону 2000-20000 Гц встановлюються поворотом шкали, при цьому перемикач «Множник» знаходиться в положенні  $\times 100$ , відлік шкали множиться на 100;

4. Частоти четвертого піддіапазону 20000-200000 Гц встановлюються поворотом шкали, при цьому перемикач «Множник» знаходиться в положенні  $\times 1000$ , відлік шкали множиться на 1000.

За допомогою ручки «Реєстр. Вих. Напр.», а при необхідності й ручки «Межі шкали – ослаблення дБ» відрегулювати амплітуду напруги на виході генератора. Опір вихідного пристрою генератора повинен бути узгоджений з опором навантаження, що поданий на клеми «Вихід». Перемикач «Вих. Опір» необхідно поставити в положення, яке найбільш відповідне величиною навантаження.

## 6 ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Електровимірювальним приладом називається пристрій, що призначений для вимірювання електричних величин – струму, напруги та ін. Електровимірювальні прилади використовуються у всіх лабораторних роботах розділу фізики «Електрика та магнетизм», а також в оптиці й фізиці твердого тіла.

Електровимірювальні прилади класифікуються за родом вимірюваної величини, принципу дії, виду струму, точності, способу відліку та іншими ознаками, які визначаються їх будовою, призначенням, способом застосування та властивостями. Велика частина цих характеристик складає так звані паспортні дані, які повинні вказуватися на шкалах або панелях приладів.

З основних технічних вимог, які пред'явлені до електровимірювальних приладів, слід вказати наступні: бажано, щоб прилад споживав малу потужність і не вносив помітних змін у електричний ланцюг.

Рід вимірюваної величини вказується переважно у вигляді позначення одиниць виміру, в яких градуйований прилад. Позначення даються за міжнародним стандартом, наприклад V, W, kA, A, та, mA і т. д.

Фізичної природою вимірюваної величини визначається назва приладу. Так, прилади для вимірювання сили струму називаються амперметрами. У залежності від чутливості вони можуть називатися мікро-, мілі- або кілоамперметрами: назва визначається тим, в яких одиницях градуйована шкала.

Особливо чутливі прилади, що не мають стандартного градуювання, називаються гальванометрами, їх чутливість або ціна поділу шкали вказується в паспорті.

Прилади для вимірювання напруги називаються вольтметрами (або мікро-, мілі-, кіловольтметра); електростатичні вольтметри без стандартної градуювання називаються електрометри.

Прилади для вимірювання струму й напруги є найбільш поширеними та найбільш важливими. Крім того, існує ще велика кількість приладів, більшість яких заснована на вимірюванні струмів і напруг. Найбільш важливі з них: прилади для вимірювання потужності – ватметри; прилади для вимірювання роботи струму – лічильники електричної енергії; прилади для вимірювання опору – омметри; прилади для вимірювання частоти змінного струму – частотаміри; прилади для вимірювання зсуву фаз у ланцюгах змінного струму – фазометри.

Крім того, є велика кількість приладів для вимірювання неелектричних величин електричними методами; до них відносяться,

наприклад, термометри опору й термоелектричні термометри. Вони не є електровимірювальними приладами, хоча й включають такі прилади в свою конструкцію.

Існують також калібровані й багатограничні прилади, призначення та межі вимірювання яких змінюються в залежності від способу включення (приєднання до тих чи інших клем, перемикачі). Часто поєднують в одному приладі амперметр і вольтметр, причому для кожного з них зазвичай є ще більше, чи менше, число меж вимірювання. Дуже поширені в лабораторній практиці переносні комбіновані ампервольтметри, (авометри або тестери). У залежності від того, яке фізичне явище покладено в основу дії приладу, електричні вимірювальні прилади поділяються на такі системи: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, феродинамічну, індукційну, термоелектричну, вібраційну, теплову, детекторну, електронну, фотоелектричну, електролітичну.

## 6.1 Основні характеристики електровимірювальних приладів

Згідно з ГОСТ 1845-59 всі електровимірювальні прилади поділяються на 8 класів: 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 1,5, 2,5; 4,0.

Належність приладу до даного класу характеризується найбільшим припустимим значенням основної (наведеної) похибки, яка визначається за формулою:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_m} 100 \%, \quad (6.1)$$

де  $\gamma$  – зведена похибка, виражена у відсотках;

$\Delta A$  – максимальна абсолютна похибка;

$A_m$  – верхнє значення показань приладу.

Випускаються прилади, що застосовуються в основному для перевірки та градуювання робочих приладів (зразкові прилади) – 0,05; 0,1; лабораторні прилади масового вживання; – 0,2; 0,5; 1,0; технічні прилади – 1,5; 2,5; 4,0.

Прилади нижчої точності служать для оціночних вимірів і називаються зазвичай показчиками. Прилади спеціального призначення, наприклад різновимірювальні, можуть мати клас точності, що відрізняється від перерахованих вище стандартів.

## 6.2 Чутливість

Чутливістю електровимірювального приладу називається відношення лінійного або кутового переміщення покажчика до вимірюваної величини, що викликала це переміщення, тобто:

$$S = \frac{n}{x}, \quad (6.2)$$

де  $n$  – кутове або лінійне переміщення;  
 $x$  – вимірювана величина.

## 6.3 Межі вимірювань

Значення вимірюваної величини, при якому стрілка приладу відхиляється до кінця, шкали, називається межею вимірювання цього приладу. У простому випадку межі вимірювань зазначаються градуюванням шкали приладу. У приладах з нерівномірною шкалою при цьому відзначається точками робочі ділянки шкали. У приладах з кількома межами вимірювань, багатограничних або багатошкальних, верхня межа вимірюваної величини вказується у відповідній клеми або на перемикачі; шкала в цьому випадку градуюється без вказівки найменування вимірюваної величини, і ціну поділки необхідно обчислити. Так, у вольтметра на 3, 15, 150 В на шкалі може бути нанесено 150 поділок, а клеми позначаються: «+» або «-» (загальна клема), «3», «15», «150».

Ціна поділки приладу дорівнює значенню вимірюваної величини, що відповідне одному поділу шкали приладу.

## 6.4 Магнітоелектрична система

У приладах цієї системи використовується взаємодія між провідником зі струмом і постійним магнітом. У даний час застосовуються майже виключно магнітоелектричні прилади з рухомою катушкою, (система Дебре і д'Арсонваля) (рис. 6.1). Раніше зустрічалися прилади (гальванометри) також і з рухомим магнітом, але їх не будемо описувати.

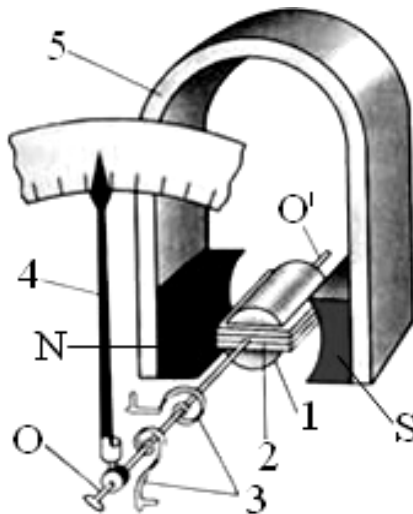


Рисунок 6.1 – Пристрої приладу магнітоелектричної системи

Вимірювальний прилад магнітоелектричної системи влаштований таким чином. Беруть легку алюмінієву рамку 2 прямокутної форми, намотують на неї катушку з тонкого дроту. Рамку кріплять на двох півосях  $O$  і  $O'$ , до яких прикріплена також стрілка приладу 4. Вісь утримується двома тонкими спіральними пружинами 3. Сили пружності пружин, що повертають рамку до положення рівноваги за відсутності струму, підібрані такими, щоб були пропорційними куті відхилення стрілки від положення рівноваги. Катушку поміщають між полюсами постійного магніту 5 з наконечниками форми полого циліндра. Усередині катушки розташовують циліндр 1 з м'якого заліза. Така конструкція забезпечує радіальний напрямок ліній магнітної індукції в області знаходження витків катушки (див. рис. 6.1). У результаті при будь-якому положенні катушки сили, що діють на неї з боку магнітного поля, максимальні та при незмінній силі струму – постійні.

Коли по катушці тече струм, на неї з боку магнітного поля діють сили, які прагнуть повернути рамку й поставити її в положення, в якому магнітний потік, що охоплюється струмом, максимальний. Момент сил  $M_{від}$  (відхиляє момент) пропорційний силі струму, а також площі рамки, числу витків і напруженості (точніше індукції) магнітного поля в зазорі. Очевидно, що якщо будь-яким способом виміряти момент  $M_{від}$ , то можна буде визначити силу струму, який тече по катушці.

Можливість вимірювання моменту відхилення забезпечується тим, що рамка утримується в своєму початковому положенні пружними силами. Момент пружних сил залежить від кута відхилення рамки  $\varphi$ ; у силу закону Гука він може вважатися пропорційно цьому кутку. Очевидно, що рамка буде відхилятися до тих пір, поки момент, що повертає  $M_{нов}$  не врівноважить моменту  $M_{від}$ . Таким чином, рівноважний кут відхилення буде залежати від сили струму. Відлічується

цей кут за шкалою за допомогою скріпленої рамкою стрілки або дзеркала; можна визначити силу струму, якщо прилад попередньо проградували.

Для вимірювань на постійному струмі застосовуються майже виключно магнітоелектричні прилади. Їх перевагами є висока чутливість, велика точність, рівномірність шкали. Зовнішні поля слабо впливають на показання магнітоелектричних приладів, так як рамка їх знаходиться в майже замкнутому просторі й у сильному полі власного магніту.

## 6.5 Характеристики магнітоелектричних гальванометрів і особливості їх конструкції

Гальванометри відрізняються від приладів меншою чутливістю способом підвісу рухомої системи – вона підвішується на тонку нитку з фосфористої бронзи. Для зменшення моменту повертання нитка робиться у вигляді стрічки шириною близько 0,3 – 0,5 мм і товщиною в кілька сотих міліметра. При тій же площі перетину, таким чином при тій же міцності на розрив і при цьому ж граничному струмі, така стрічка має набагато меншу крутильну жорсткість, ніж нитка круглого перерізу. Знизу рухома система відтягується другою ниткою, яка має звичайно ще меншу твердість. Ці ж дві нитки служать струмопровідними проводами.

Катушки гальванометра мають велике число витків дуже тонкого дроту, тому внутрішній опір цих приладів зазвичай великий – кілька десятків Ом; у більш чутливих – кілька сотень Ом, іноді навіть кілька тисяч Ом.

Гальванометри можуть однаково застосовуватися як для вимірювання струмів, так і для напруг. Відповідно для них можна знайти чутливість до струму (амперову), яка визначається числом поділок шкали, що відповідні току в 1 А (або краще в 1 мкА, так як струми порядку 1 А великі для гальванометра), і чутливість до напруги (вольтну), яка визначається числом поділок, що відповідають напрузі в 1 В (1 мВ, 1 мкВ).

Більш зручними величинами, ніж чутливість, є так звані «сталі гальванометра», – струмова стала:

$$C_I = \frac{1}{E_I} = \frac{I}{\phi} \quad (6.3)$$

і стала по напрузі

$$C_U = \frac{1}{E_U} = \frac{U}{\phi}, \quad (6.4)$$

які по суті представляють собою ціну поділки приладу.

Зв'язок між амперовою та вольтовою чутливістю неважко встановити, якщо відомо внутрішній опір приладу  $R_g$ .

Вочевидь

$$E_U = \frac{E_I}{R_g}, \quad C_U = C_I R_g. \quad (6.5)$$

За способом відліку кута відхилення рамки  $\phi$  гальванометри діляться на стрілочні й дзеркальні. У стрілочних гальванометрах кут  $\phi$  вимірюється в поділках шкали, які називаються іноді радіусом шкали, навіть якщо вони й не дорівнюють кутовим градусам. У дзеркальному гальванометрі з рамкою закріплено дзеркало, і кут визначається по зсуву світлового зайчика за шкалою. У цьому випадку кут відхилення прийнято виражати в міліметрах на метр (міліметри відхилення зайчика за шкалою, що встановлена на відстані 1 м від дзеркала). Таким чином, чутливість буде виражатися в мм/м/мА і в мм/м/В. Чутливість дзеркальних гальванометром на 3 – 4 порядки вище стрілочних. Струмова чутливість дзеркальних гальванометрів зазвичай лежить у інтервалі  $10^8 - 10^{10}$  мм/м/А і може досягати  $10^{11}$  мм/м/А. Чутливість до напруги у кращих гальванометрів досягає величини порядку  $10^7$  мм/м/В. Слід мати на увазі, що гальванометри з найвищою чутливістю до струму мають не дуже високу чутливість до напруги, і навпаки. Це викликано тим, що при підвищенні струмової чутливості необхідно збільшити число витків котушки, одночасно зменшуючи перетин дроту (для збереження загальних розмірів котушки). Неважко бачити, що опір зростає як квадрат числа витків, тоді як струмова чутливість пропорційна числу витків. Відповідно чутливість до напруги обернено пропорційна числу витків.

Крім перерахованих вище характеристик, у паспорті гальванометра вказуються ще період коливань рухомої системи та критичний опір. Ці величини дуже важливі при роботі, так як визначають час, що необхідний для вимірювання. Завжди бажано, щоб час встановлення нового положення рівноваги після зміни струму був мінімальним. Для цього потрібно, по-перше, щоб період власних коливань рухомої системи був малим і, по-друге, щоб коливання швидко загасали.

## 6.6 Електромагнітна система

У приладах цієї системи (рис. 6.2) вимірюваний струм, проходячи по котушці 1, створює магнітне поле, в яке втягується сердечник 2 з м'якого заліза. Сердечник виконується зазвичай у вигляді тонкого листка,



ексцентрично насадженого на вісь 3. Втягуючись в катушку, він обертається на осі й повертає скріплену з ним стрілку 4. Сила, що діє на сердечник, пропорційна напруженості поля та намагніченості осердя; остання ж, у свою чергу, пропорційна напруженості. Таким чином, відхиляючий момент пропорційний квадрату напруженості  $i$ , отже, квадрату сили струму. Обертальний момент створюється спіральними пружинами 5, як і в магнітоелектричних приладах, тобто момент, що обертає, пропорційний куту відхилення  $M_{нов} = k\phi$ . Якщо ж коефіцієнт пропорційності у формулі для  $M_{від}$  не залежав від  $\phi$ , то шкала приладу була б квадратичною. Насправді сили, що діють на сердечник, залежать від його положення. Цю залежність зазвичай використовують для того, щоб зробити шкалу більш рівномірною. Якщо  $\phi \sim I^2$ , то на початку шкали чутливість мала; це можна частково виправити, надаючи сердечникові таку форму, щоб відхиляючий момент був максимальний при малих кутах відхилення.

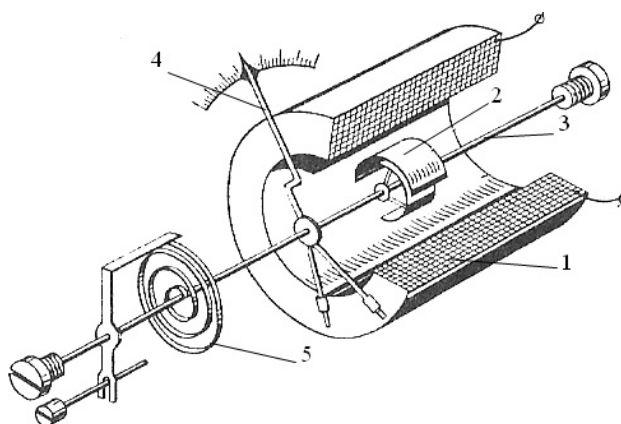


Рисунок 6.2 – Пристрій електромагнітної системи

Як заспокоювач у електромагнітних приладах застосовується повітряний демпфер – поршень, що пов'язаний із віссю та який рухається з невеликим зазором у закритій коробці. Тертя повітря яке витісняється з коробки крізь проміжок створює гальмуючий момент, що заспокоює коливання рухомої системи.

До переваг електромагнітних приладів відносяться простота конструкції й дешевизна, а також витривалість до перевантажень, оскільки в них немає струмонесучих рухомих частин. Головна ж їх перевага – можливість роботи на змінному струмі. Оскільки напрямок намагніченості осердя змінюється одночасно зі зміною поля, знак відхилення моменту не залежить від напрямку струму. Недоліки електромагнітної системи – нерівномірність шкали, невисока точність (це пов'язано з гістерезисом у залізі сердечника) і чутливість до зовнішніх магнітних полів.

## 6.7 Електродинамічна система

Вимірюваний струм проходить через дві котушки – нерухому 1 і рухому 2, що знаходиться всередині (рис. 6.3). Катушки можуть включатися або послідовно (у вольтметрах), або паралельно (в амперметрах). Відхиляючий момент, що створений силами магнітної взаємодії, пропорційний добутку струмів у катушках, тобто квадрату загального струму через прилад. Конструкція рухомої системи така ж, як у магнітоелектричних приладах, заспокоювач 3, як у електромагнітній системі, найчастіше повітряний, рідше – індукційний.

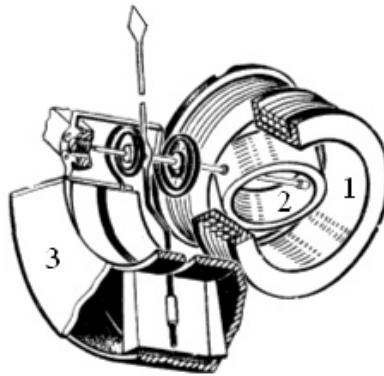


Рисунок 6.3 – Пристрій електродинамічної системи

Достоїнствами електродинамічних приладів є можливість вимірювання змінних струмів і більша, ніж у електромагнітних приладів точність (через відсутність феромагнітних деталей). Основні недоліки – мала чутливість, нестійкість до перевантажень, сильний вплив зовнішніх магнітних полів, нерівномірна шкала, порівняльна складність конструкції. Для зменшення впливу зовнішніх магнітних полів застосовуються астатичні системи та магнітні екрани, для підвищення чутливості – феромагнітні магнітопроводи (феродинамічна система).

Електродинамічна система часто використовується в приладах для вимірювання потужності – ватметрів. Включаючи нерухому катушку як амперметр, а рухому як вольтметр, отримують момент відхилення, пропорційний потужності, що споживається в досліджуваному ланцюзі.

## 6.8 Індукційна система

Індукційний прилад складається з двох нерухомих електромагнітів 2 і 3 (рис. 6.4) і рухомого алюмінієвого диска 4, що укріплений на одній осі зі стрілкою. При проходженні змінних струмів  $I_1$  і  $I_2$  по катушках електромагнітів створюються два магнітні потоки  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ , що зсунуті

один відносно іншого по фазі, яка пронизує диск. Ці потоки при своїй зміні індукують у диску вихрові струми  $I_{e1}$  і  $I_{e2}$ . У результаті взаємодії вихрових струмів з магнітними полями обох електромагнітів (струму  $I_{e1}$  з потоком  $\Phi_2$  і струму  $I_{e2}$  з потоком  $\Phi_1$ ) виникає обертаючий момент  $M$ , під впливом якого відбувається поворот рухомої частини приладу. Протидіючий момент у вольтметрах, амперметрах і ватметрах створюється спіральною пружиною 1 або розтяжками.

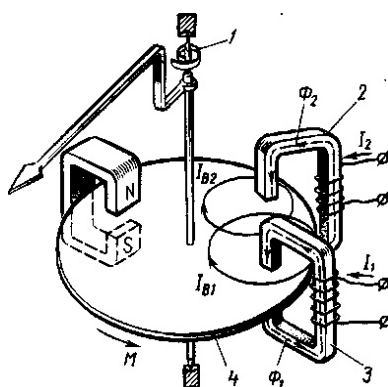


Рисунок 6.4 – Пристрій індукційного приладу

Середнє за період значення обертаючого моменту  $M$  пропорційно добутку діючих значень магнітних потоків  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  і синусу кута зсуву фаз  $\varphi$  між цими потоками:

$$M = C \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \sin \varphi, \quad (6.6)$$

де  $C$  – стала для приладу величина.

Щоб отримати найбільше значення обертаючого моменту, кут зсуву фаз між потоками встановлюють  $90^\circ$  шляхом включення в ланцюзі котушок додаткових активних і реактивних опорів. За цієї умови середній обертаючий момент у вольтметрах і амперметрах буде пропорційний добутку діючих значень струмів  $I_1$  і  $I_2$ , що протікають по катушках електромагнітів.

Перевагою індукційних приладів є висока стійкість до перевантажень, великий обертаючий момент і мала чутливість до зовнішніх магнітних полів. До недоліків відносяться: порівняно невисока точність й залежність показань від частоти змінного струму і температурних впливів. Індукційні прилади використовують, головним чином, в якості ватметрів і лічильників електричної енергії та в промислових установках і на електровозах змінного струму.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Соловьев В. А. Основы измерительной техники: учеб. пособие / В. А. Соловьев, В. Е. Яхонтова. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 216 с.
2. Рудо Н. М. Весы, теория, устройство, регулировка и проверка / Н. М. Рудо. – М.: Машгиз, 1957. – 138 с.
3. Физический практикум / под ред. В. И. Иверновой. – М.: Наука, 1967. – 352 с.
4. Зайцев С. А. Контрольно-измерительные приборы и инструменты / С. А. Зайцев, Д. Д. Грибанов, А. Н. Толстов, Р. В. Меркулов. – М.: Академия, 2011. – 464 с.
5. Мардин В. В. Справочник по электронным измерительным приборам / В. В. Мардин, А. И. Кривоносов. – М.: Связь, 1978. – 416 с.

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 Коефіцієнти Стьюдента  $t_{\alpha,n}$ 

$n$	$\alpha$	
	0,9	0,95
2	6,31	12,7
3	2,92	4,3
4	2,35	3,18
5	2,13	2,78
6	2,02	2,57
7	1,94	2,45
8	1,90	2,37
9	1,86	2,31
10	1,83	2,26
11	1,81	2,23
12	1,80	2,20
13	1,78	2,18
14	1,77	2,16
15	1,76	2,15
16	1,75	2,13
17	1,75	2,12
18	1,74	2,11
19	1,73	2,10
20	1,73	2,09
21	1,73	2,09
22	1,72	2,08
23	1,72	2,07
24	1,71	2,07
25	1,71	2,06
26	1,71	2,06
27	1,71	2,06
28	1,70	2,05
29	1,70	2,05
30	1,70	2,05

ЕЛЕКТРОННЕ НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ

**Уколов Олексій Іванович**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ДО  
ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З ФІЗИКИ  
(ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0701 «ТРАНСПОРТ І ТРАНСПОРТНА  
ІНФРАСТРУКТУРА» ДЛЯ СТУДЕНТІВ НАПРЯМІВ  
ПІДГОТОВКИ 6.070106 «АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ» ТА  
6.070101 «ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ ТРАНСПОРТУ)»,  
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0601 «БУДІВНИЦТВО ТА  
АРХІТЕКТУРА» - НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.060101  
«БУДІВНИЦТВО», ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ 0401 «ПРИРОДНИЧІ  
НАУКИ» - НАПРЯМ ПІДГОТОВКИ 6.040106 «ЕКОЛОГІЯ,  
ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА  
ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ»)**

Підписано до випуску 26.10.2012 р. Гарнітура Times New Roman.  
Умов. друк. арк. 3,37. Зам. № 321.

---

Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»  
Автомобільно-дорожній інститут  
84646, м. Горлівка, вул. Кірова, 51  
E-mail: [druknyf@rambler.ru](mailto:druknyf@rambler.ru)

Редакційно-видавничий відділ

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовників і розповсюджувачів  
видавничої продукції ДК № 2982 від 21.09.2007 р.