

Хмельницький національний університет

Параска Г.Б., Прибега Д.В., Майдан П.С.

## **МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Навчальний посібник  
з курсів „Методологія і організація наукових досліджень” та  
„Методи та засоби експериментальних досліджень”

*Затверджено на засіданні  
кафедри машин та апаратів  
протокол №3 від 25.10.2016 р.*



**УДК 621**  
**ББК 65.9(4Укр)305.851.5я73**  
**М 545**

*Рекомендовано Хмельницьким національним університетом  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів  
(протокол №7 від 29.12.2016 р.)*

Рецензенти:

***В.П. Місяць***

доктор технічних наук, професор кафедри «Прикладної механіки та машин», Київського національного університету технологій та дизайну.

***Ю.Ю. Щербань***

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технології легкої промисловості», вищого навчального закладу Київський коледж легкої промисловості.

***А.І. Гордєєв***

доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування, Хмельницький національний університет.

Укладачі: Параска Г.Б., док. техн наук, проф.;

Прибега Д.В., канд. техн наук, доц.;

Майдан П.С., канд. техн наук, ст. викл.

Відповідальний за випуск: Поліщук О.С., канд. техн наук, доц.

**М 545 Методи та засоби експериментальних досліджень :  
навч. посіб. / Г.Б. Параска, Д.В. Прибега, П.С. Майдан. – Київ :  
Кондор-Видавництво, 2017. – 138 с.**

**ISBN**

В посібнику викладено лекційне, методичне та організаційне забезпечення самостійної роботи студентів при підготовці до лабораторних і практичних занять з курсів «Методологія і організація наукових досліджень» та «Методи та засоби експериментальних досліджень».

Для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за спеціальностями «Галузеве машинобудування» та «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**ISBN**

**УДК 621**

**ББК 65.9(4Укр)305.851.5я73**

© Колектив авторів, 2017.

© Кондор-Видавництво, 2017.

## Вступ

---

Швидкий розвиток машинобудування випереджає розвиток теоретичної бази, і тому багато машин часто створюються без достатніх розрахунків, а іноді й за їх відсутності. Так, проектування гідравлічних, пневматичних, електричних пристроїв наражається на складності теоретичних розрахунків. В цих випадках приходиться на допомогу експеримент, що дозволяє отримати дані для теоретичного або практичного розв'язання задачі.

Для проведення експериментів часто потрібна методика, що містить комплекс зв'язаних між собою одночасних вимірювань. Це, в свою чергу, висуває підвищені вимоги до чутливості і точності вимірювальних приладів. З іншого боку, розвиток спеціальних областей фізики, електротехніки і електроніки, комп'ютерної техніки і технологій відкриває можливості, яких раніше не мала вимірювальна техніка. На зміну застарілим приладам приходять більш досконалі, придатні для виконання складних експериментальних задач.

Такими приладами в багатьох випадках є електричні датчики, які перетворюють механічні величини, що вимірюються, в електричні. На сьогодні цей метод вимірювання механічних параметрів набув широкого розвитку.

Використання електричних методів надає електровимірювальній техніці нову якість. Датчики електричного методу вимірювання можуть бути практично безінерційними, тертя в таких датчиках зведено до мінімуму. Значно полегшилися задачі вимірювань надшвидкоплинних процесів. Реєстрація ведеться за допомогою комп'ютерних засобів з наступним автоматизованим процесом обробки результатів вимірювання.

# 1 Метрологічні характеристики механічних параметрів. Рівняння руху машин та їх елементів

---

Для встановлення механічних параметрів, які, перш за все, потрібно вимірювати, достатньо встановити, які величини входять в рівняння руху машин і визначають їх динамічний режим.

Як правило, рівняння руху машин записуються в формі рівнянь закону кінетичної енергії або в формі приведених моментів та сил (рівняння Лагранжа).

Рівняння Лагранжа в формі моментів [1], має вигляд:

$$M_{\partial} - M_c = J_n \varepsilon + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_n}{d\varphi}, \quad (1.1)$$

де  $M_{\partial}$  – приведені моменти відповідно рушійних сил і сил опору;  $M_c$  – приведений момент інерції механізмів, який складається з приведенного моменту інерції деталей  $J_n$ , що обертаються, і моменту інерції шарнірно-важільних механізмів, є величиною змінною, так як швидкості руху деталей шарнірно-важільного механізму змінюються в межах одного оберту головного вала, при цьому змінюються положення центрів ваг важелів відносно осі головного вала;  $\varphi, \omega, \varepsilon$  – відповідно кут повороту, кутова швидкість і кутове прискорення ланки приведення.

Рівняння Лагранжа в формі сил [1], має вигляд:

$$P_{\partial} - P_c = m_n \varepsilon + \frac{V^2}{2} \frac{dm_n}{ds}, \quad (1.2)$$

де  $m_n$  – приведена маса.

Рівняння руху в формі закону кінетичної енергії:

$$\int_{\varphi_0}^{\varphi_i} M_{\partial} d\varphi - \int_{\varphi_0}^{\varphi_i} M_c d\varphi = \frac{J_{ni} \omega_i^2}{2} - \frac{J_{no} \omega_o^2}{2}, \quad (1.3)$$

або

$$A_{gi} - A_c = T_i - T_o = \Delta T_{oi}, \quad (1.4)$$

де  $\varphi_o, \omega_o$  – початкові значення кута повороту  $\varphi$  і кутової швидкості вала приведення;  $\varphi_i, \omega_i$  – довільно вибрані значення кута

повороту  $\varphi$  і значення кутової швидкості при  $\varphi = \varphi_i$ ;  $A_{gi} = \int_{\varphi_0}^{\varphi_i} M_{\delta} d\varphi$  –

робота рушійних сил при повороті вала приведення на кут

$\varphi = \varphi_i - \varphi_0$ ;  $A_c = \int_{\varphi_0}^{\varphi_i} M_c d\varphi$  – робота сил опору при повороті вала

приведення на кут  $\varphi = \varphi_i - \varphi_0$ ;  $T_o = J_{no} \omega_o^2 / 2$  – кінетична енергія, яку

має механізм в початковому положенні при  $\varphi = \varphi_0$ ;  $T_i = J_{ni} \omega_i^2 / 2$  – кінетична енергія, яку має механізм в  $i$ -му положенні при  $\varphi = \varphi_i$ .

Із рівнянь (1.1–1.4) видно, що основними механічними параметрами є сили, моменти, кутові та лінійні переміщення, швидкості і прискорення ланок.

Для експериментального дослідження машини за різних умов навантаження необхідно і достатньо вміти вимірювати перераховані параметри. Всі інші вимірювання (визначення потужності, деформації, напруження, к.к.д., коефіцієнта тертя, вібрації, тиску і т.д.) зводяться до вимірювання перерахованих параметрів.

## 2 Методи експериментальних досліджень

---

### 2.1. Класифікація, типи і завдання експерименту

За числом змінних експерименти класифікуються на *одно-* і *багатофакторні*: при однофакторних експериментах зміні та реєстрації підлягає один фактор (одна незалежна змінна), при багатофакторних – кілька факторів або незалежних змінних [2].

Об'єкти досліджень в експериментах діляться на *статистичні* та *детерміновані, керовані і некеровані*. У статистичних об'єктах відгук (випадкова залежна змінна  $y$ ) знаходиться в стохастичному зв'язку з випадковими або не випадковими факторами  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Так у механічній обробці, прикладом зв'язку з випадковими факторами є залежність характеристик якості готових деталей від характеристик якості заготовок при їх обробці, а зв'язок з не випадковими факторами – залежність характеристик якості готових деталей від режимів обробки. Стохастичний зв'язок проявляється в тому, що зміна незалежної величини призводить до зміни закону розподілу залежної випадкової величини. Найпростішим її видом є зв'язок, при якому зі зміною незалежної змінної змінюється математичне очікування або середнє значення відгуку.

Для детермінованих об'єктів характерні функціональні зв'язки між не випадковими величинами, коли кожному значенню аргументу відповідає строго певне значення функції.

**Керованість** об'єкта визначається можливістю відтворення на ньому результатів досліду. Для перевірки цієї властивості можна провести експеримент при деяких обраних рівнях досліджуваних факторів, а потім повторити його кілька разів через нерівні проміжки часу і порівняти результати.

**Відтворюваність** результатів характеризується розкидом їх значень. Якщо він не перевищує деякої заздалегідь заданої величини (вимог до точності експерименту), то об'єкт задовольняє вимогу відтворюваності результатів експерименту.

Залежно від способу вибору рівнів факторів (значень незалежних змінних) експерименти діляться на *пасивні* і *активні*. Експеримент, в якому рівні факторів в кожному досліді задаються дослідником, називається активним. Експеримент, при якому рівні факторів в кожному досліді реєструються дослідником називається пасивним.

Експериментальні дослідження класифікують також на *якісні* (з метою встановлення тільки факту існування явища) і *кількісні, ла-*

**бораторні** та **промислові**. Останнім часом все більшого поширення набувають автоматизовані експериментальні дослідження.

Розрізняють також експерименти: **відсіювальні, порівняльні** (порівняння двох або декількох об'єктів і вибір кращого з них за заданими критеріями якості), **екстремальні** (відшукування екстремуму функції відгуку, за яким оптимізуються параметри об'єкта або режими протікання процесів за допомогою автоматичного управління), **описові** (визначення механізмів явищ і характеру протікання процесів для їх аналізу і подальшої постановки завдань синтезу) і експерименти зі складання діаграм стану (варіант описових експериментів).

Різновидом експериментальних досліджень можуть бути також різного роду випробування: попередні заводські випробування дослідного зразка; приймальні випробування доопрацьованих зразків, підготовлених до масового випуску (з дослідної партії або настановної серії); контрольні випробування при масовому виробництві машин та випробування зразків після капітального ремонту [3]. На всіх етапах випробувань виконуються різноманітні технологічні, експлуатаційні та технічні експерименти, передбачені програмами випробувань з різних видів оцінок. За результатами випробувань приймаються рішення про проведення доопрацювання машин, поліпшенні їх агрегування з енергетичними засобами, випуску дослідних партій для перевірки і постановки на виробництво.

При всьому різноманітті цілей, які може поставити перед собою дослідник, **завдання експерименту**, як правило, можна віднести до одного із зазначених подалі типів [4]:

- завдання вимірювання деякої величини за фіксованих умов (для отримання довідкових даних, які потім будуть використані в теоретичних або конструкторських розрахунках);

- завдання перевірки гіпотези (підтвердити або спростувати) за допомогою експерименту ту чи іншу теорію; довести, що вироби, виконані за новою технологією, перевершують за своїми параметрами старі зразки; виявити фактори, що впливають на цікаву для нас величину, наприклад, термін служби приладу; виявити зв'язок між різними характеристиками об'єктів (або підтвердити відсутність такого зв'язку) та інше. Завдання такого роду вирішуються за алгоритмом статистичної перевірки гіпотез;

- завдання з'ясування механізму явища;
- завдання оптимізації (типова задача конструкторських і технологічних розробок);
- динамічні вимірювання;
- класифікація спостережень, або розпізнавання образів.

Деякі з перерахованих типів завдань можуть бути як кінцевою метою експерименту, так і проміжним етапом при вирішенні завдань більш «високого» рівня.

## 2.2. Методологія експерименту

Однією з найбільш важливих складових частин наукових досліджень є експериментальні дослідження.

**Експериментальні дослідження** – один з основних способів одержання нових наукових знань [5]. В його основу покладено експеримент, що представляє собою науково поставлений дослід або спостереження явища в точно обумовлених умовах, що дозволяє спостерігати за його ходом, керувати ним, відтворювати його кожного разу при повторенні первинних умов. Від звичайного пасивного спостереження експеримент відрізняється активним впливом дослідника на явище, що вивчається.

**Метою** проведення експерименту може бути перевірка теоретичних положень (підтвердження робочої гіпотези), а також більш широке і глибоке вивчення теми наукового дослідження. Інколи виникає необхідність проведення пошукових експериментальних досліджень. Вони обумовлені тим, що інколи виникають труднощі в класифікації всіх факторів, що впливають на процес, який досліджується. На основі попереднього експерименту формується програма досліджень в повному обсязі.

Експериментальні дослідження діляться на **лабораторні** і **виробничі**.

**Лабораторні** дослідження проводяться з використанням типових приладів, спеціальних моделюючих пристроїв, стендів, обладнання і т.д.

Ці дослідження дозволяють найбільш повно і якісно, з достатньою кількістю повторень, вивчати вплив одних характеристик (параметрів) на процес (об'єкт) при варіюванні інших. Лабораторні дослідження при досить повному науковому обґрунтуванні експерименту дозволяють одержати якісну наукову інформацію (наукові знання) за мінімальних витрат. Однак такі експерименти не завжди повністю моделюють реальний хід процесу, що досліджується, тому інколи виникає потреба в проведенні виробничого експерименту.

Метою **виробничих** експериментальних досліджень є дослідження (вивчення) процесу в реальних умовах з врахуванням впливу різних випадкових факторів виробничого середовища. Такі експериментальні дослідження проводяться на об'єктах, що будуються, заводах, дорогах, будинках і спорудах. Враховуючи масштабність вироб-



ничих експериментальних досліджень, актуальною є ретельна підготовка до їх проведення.

Однією з різновидностей виробничих експериментальних досліджень є збір матеріалів в організаціях, які накопичують за стандартними формами ті чи інші дані. Такі матеріали легко піддаються обробці методами статистики і теорії ймовірності.

В ряді випадків ефективним методом проведення виробничих досліджень є анкетування. Для процесу, що вивчається, складається ретельно підготовлена методика. Основні дані збираються методом опитування виробничих організацій за попередньо складеною анкетой. Цей метод дозволяє зібрати дуже велику кількість даних або результатів вимірювань, але до них потрібно підходити дуже ретельно, можливі різні похибки.

Залежно від теми наукових досліджень об'єм експериментальних досліджень може бути різним. В кращому випадку для підтвердження робочої гіпотези достатньо лабораторного експерименту, в гіршому – приходится проводити серію експериментальних досліджень: попередні (пошукові), лабораторні, полігонні, на об'єкті що експлуатується.

Перш за все, перед проведенням експериментальних досліджень необхідно розробити методологію експерименту.

**Методологія експерименту** – це загальні принципи, структура експерименту, його постановка і послідовність виконання експериментальних досліджень. Методологія експерименту включає в себе наступні основні етапи: розробка плану-програми експерименту, оцінка вимірювань і вибір засобів для проведення експерименту; проведення експерименту; обробка і аналіз експериментальних даних.

Проведена кількість етапів справедлива для традиційного експерименту. Поряд з цим широко використовується математична теорія експерименту, що дозволяє різко підвищити точність і зменшити об'єм експериментальних досліджень. В цьому випадку методологія експерименту включає такі етапи: розробка плану-програми експерименту; оцінка вимірювань і вибір засобів для проведення експерименту; математичне планування експерименту з одночасним проведенням експериментальних вимірювань; обробка і аналіз одержаних даних.

### **2.3. Розробка плану-програми експерименту**

**План-програма** експерименту включає найменування теми досліджень, робочу гіпотезу, методику експерименту, перелік необхідних матеріалів, приладів, пристроїв, список виконавців експерименту, календарний план робіт, кошторис досліджень. В ряді випадків в план-програму експерименту включаються роботи з конструювання і виго-

товлення приладів, апаратів, стендів, а також програми робіт (досліджень) на виробництві.

Оснoву плану-програми експерименту складає методика експерименту.

**Методика** представляє собою систему прийомів або способів для послідовного найбільш ефективного експериментального дослідження і включає в себе мету і задачі експерименту; вибір варійованих факторів; обґрунтування засобів і необхідної кількості вимірювань; опис проведення експерименту, обґрунтування засобів обробки і аналіз результатів експерименту.

**Визначення мети і задач експерименту** – один з найбільш важливих етапів. На основі аналізу інформації, гіпотези і теоретичних розробок обґрунтовується мета і задачі експерименту. Раніше одержана наукова інформація дозволяє в тій чи іншій мірі передбачати можливі результати, і таким чином визначати результати експерименту. Чітке обґрунтування задач експериментальних досліджень – запорука успішного їх розв'язання. Кількість задач не повинна бути великою (до трьох-чотирьох задач).

**Вибір варійованих факторів** – це встановлення основних і другорядних характеристик, що впливають на процес дослідження. Спочатку, як правило, аналізуються розрахункові (теоретичні) схеми процесу. На основі цього класифікують всі фактори і розміщують їх в ряд залежно від їх важливості. Правильний вибір основних і другорядних факторів відіграє важливу роль в ефективності експерименту, так як в багатьох випадках експеримент зводиться до знаходження залежностей між цими факторами.

Для скорочення тривалості та підвищення ефективності експерименту необхідно до його проведення встановити інтервали між значеннями факторів. Спочатку визначають загальні межі зміни незалежних факторів, обумовлені їх фізичною природою або можливостями обладнання. Наприклад, стосовно технології обробки металів такими обмеженнями є: температура плавлення або межа міцності досліджуваного металу, граничні значення частот обертання і подач верстата та ін. Потім визначають, як слід змінювати рівні факторів всередині цих областей [2, 3].

Існує два основні критерії, на основі яких проводиться вибір точок, що відповідають умовам проведення досліджу: 1) відносна точність даних на різних ділянках області планування; 2) характер експериментальної функції.

У багатьох випадках одержувані дані мають неоднакову точність на різних ділянках області експериментування. Наприклад, для

багатьох механічних систем випробування, що проводяться при зниженій потужності або малому тиску, напорі, будуть найменш точними.

Якщо аналіз помилок показує, що на якійсь ділянці області експериментування дані викликають найбільші сумніви, то, природно, намагаються заповнити цю ділянку великим числом дослідних точок.

Якщо точність вимірювань однакова для всіх факторів і відгуку, то бажано, щоб відстань між точками на експериментальній кривій була постійною на всій її довжині.

Вибір необхідних інтервалів між точками проводиться не для того, щоб отримати симетричну або зручну криву, а щоб забезпечити на всіх ділянках кривої однаково точність експериментальних даних.

**Обґрунтування засобів експерименту** – це вибір необхідних для спостереження і вимірювання приладів, обладнання, машин, апаратів і т.п. В окремих випадках виникає необхідність в створенні універсальних приладів, апаратів, пристроїв, стендів, машин. Відповідальною частиною цього етапу є встановлення точності вимірювання і похибок.

В методиці детально планується процес проведення експерименту. Спочатку складається послідовність проведення операцій вимірювань і спостережень. Потім описується детально кожна операція окремо з врахуванням обраних засобів для проведення експерименту. Велику увагу приділяють методам контролю якості операцій, що забезпечує при мінімальній кількості вимірювань високу надійність і задану точність. Розробляються форми журналів для запису результатів спостереження і вимірювання.

Важливим розділом методики є вибір методів обробки і аналізу експериментальних даних. Обробка даних зводиться до систематизації всіх цифр, класифікації, аналізу. Результати експериментів повинні бути зведені в зручні форми запису – таблиці, графіки, формули, номери, що дозволяють швидко зіставити одержані результати.

Особливу увагу в методиці повинно бути приділено математичним методам і аналізу дослідних даних – встановлення емпіричних залежностей, апроксимація зв'язків між варійованими факторами, знаходження довірливих інтервалів.

За суттю всі експерименти **невідтворні**: жоден зразок або прилад після використання не повертається до вихідного стану.

Але зміни в них у процесі експерименту настільки малі, що їх неможливо виявити. У цьому сенсі експеримент вважається відтворюваним і допускає вибір послідовності умов його виконання.

Є два основних типи однофакторного експерименту: **послідовний** і **рандомізований** (випадковий).

Суть **послідовного** експерименту полягає в тому, що рівень фактора змінюється стрибкоподібно. Після кожного кроку проводиться

аналіз результатів і на підставі цього аналізу приймається рішення про хід подальшої роботи [6].

Послідовний експеримент доцільний в наступних випадках [7]: 1) якщо відомо, що його неможливо відтворити; 2) коли випробовувана система (об'єкт) має деякі особливості, які можна виявити лише при отриманні даних в регулярній послідовності (при аналізі стабільності технологічного процесу механічної обробки); 3) якщо тривалість, вартість або складність експериментів такі, що рандомізований експеримент недоцільний.

Якщо ж рівень фактора змінюється випадковим чином, приймаючи або менші або більші значення, тоді план експерименту називається *рандомізованим*. Основною метою рандомізації є зведення ефекту деякого не випадкового фактора до випадкової помилки.

Рандомізація плану експерименту може бути досягнуто шляхом: 1) таблиці випадкових чисел [8]; 2) «ігрового» методу; 3) введення спеціальних блоків.

## 2.4. Обробка результатів вимірювань

### 2.4.1. Загальні положення про вимірювання

Під вимірюванням розуміють порівняння величини, що вимірюється, з іншою величиною, яка прийнята за одиницю вимірювання.

**Фізична величина** – це характеристика однієї з властивостей фізичного об'єкта (системи, явища або процесу). Значення фізичної величини є оцінкою розміру цієї величини у вигляді деякого числа прийнятих для неї одиниць.

Розрізняють істинне значення фізичної величини, яке ідеально відображає властивості матеріального об'єкта, і дійсне – значення, знайдене експериментально.

**Вимірювання** – це знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

Вимірювання діляться на *прямі* і *побічні*.

При *прямих* вимірюваннях величина, що вимірюється, порівнюється з одиницею вимірювання безпосередньо або за допомогою вимірювального приладу, що проградуєований у відповідних одиницях. До цих вимірювань відносяться вимірювання довжини лінійкою, штангенциркулем, плитками Йохансена і т.п., вимірювання маси на важільних вагах, з допомогою набору рівноваг, вимірювання проміжків часу за допомогою годинників або секундоміра і т.п.

$$y = Cx, \quad (2.1)$$

де  $y$  – значення вимірюваної величини;  $C$  – ціна поділки шкали приладу в одиницях вимірюваної величини;  $x$  – відлік в поділках шкали.

При **побічних** вимірюваннях величина, що вимірюється, вираховується з результатів прямих вимірювань інших величин, які зв'язані з нею функціональною залежністю. Прикладом побічних вимірювань можуть слугувати вимірювання швидкості рівномірного (або нерівномірного) руху за даними вимірювання довжини пройденого шляху і відповідного проміжку часу.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.2)$$

де  $y$  – шукана величина, що є функцією величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , вимірюваних прямим методом.

Можна стверджувати, що непряме вимірювання – це вимірювання, результат якого розраховується за формулою. Прикладами таких вимірювань є: визначення радіуса кулі  $R = D/2$ , площі його поверхні  $S = \pi D^2$  або об'єму  $V = \pi D^3/6$  за прямо вимірюваною величиною – діаметром кулі  $D$ .

Спільними називають виконані одночасно вимірювання двох або кількох однойменних величин для знаходження залежності між ними. Рівняння спільних вимірів має вигляд:

$$y_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, a, b, c, \dots), \quad (2.3)$$

де  $y_i, x_{1i}, x_{2i}$  – значення величин, виміряних одночасно (прямо чи опосередковано) в  $i$ -й вимірювальній операції;  $a, b, c, \dots$  – невідомі шукані величини.

Якщо число рівнянь перевищує число невідомих, то ці рівняння на відміну від звичайної системи рівнянь називають умовними. Для її вирішення використовують метод найменших квадратів.

Прикладом спільних вимірювань може слугувати знаходження залежності періоду  $T$  коливань математичного маятника від його довжини  $l$ :  $T = al^n$ , де  $a, n$  – невідомі параметри, які визначаються методом найменших квадратів.

**Моделлю об'єкта** вимірювання називається абстрактний, як правило, ідеалізований образ реального об'єкта.

**Метод вимірювань** – це сукупність прийомів порівняння вимірюваної величини з її одиницею. Метод вимірювань здійснюється відповідно до моделі об'єкта вимірювання і доступним набором технічних засобів.

При вимірюваннях будь-якої фізичної величини, як правило, необхідно виконати три послідовні операції:

- 1) перевірка і встановлення вимірювальних приладів;
- 2) спостереження показників і їх відлік;
- 3) визначення (обрахування) шуканої величини з результатів вимірювання і оцінка похибки вимірювання.

#### **2.4.2. Класифікація похибок**

Вимірюючи яку-небудь фізичну величину, ми не розраховуємо отримати її справжнє значення. Тому необхідно якимось чином вказати, наскільки отриманий результат може бути близьким до істинного значення, іншими словами, вказати, яка **точність вимірювання**.

Вплив перешкод на процес вимірювання призводить до того, що результати вимірювання завжди відрізняються від істинного значення вимірюваної величини і за цими результатами визначити справжнє значення не можна. Різниця між результатом вимірювання та істинним значенням називається **істинною похибкою вимірювання**. В силу того, що істинне значення невідоме, невідомою є і справжня похибка.

Враховуючи, що ні справжнє значення фізичної величини, ні справжню похибку в досліді визначити неможливо, задачу знаходження істинного значення формують як задачу знаходження деякого наближеного до істинного значення з вказівкою можливих найбільших відхилень цього наближеного значення від істинного. Знайдене в експерименті значення вимірюваної величини, наближене до істинного, називається **оцінкою** фізичної величини. Оцінка з зазначенням її можливого інтервалу відхилення від істинного значення (**довірчого інтервалу**, в якому з певним ступенем достовірності міститься істинне значення) називається **результатом вимірювання**.

Похибка вимірювання включає в себе безліч різних складових, які можна класифікувати за різними ознаками. На сьогодні класифікація похибок містить близько 30 видів. За впливом на результати вимірювань їх можна розділити на **систематичні** і **випадкові**. За характером зміни в часі – на **статичні** і **динамічні**. За джерелами виникнення – на **методичні, інструментальні, особисті**, які, у свою чергу, можуть бути як випадковими, так і систематичними. За можливістю виявлення і виключення з результатів вимірювання – на **виявлені** і **невиявлені, переборні** і **непереборні, виключені** і **не виключені**. За характером належності (близькості) результатів спостережень до основної сукупності – на **грубі** і **промахи**. Невиявлена похибка завжди неусувна. Виявлена похибка може бути як усуненою, так і непереборною. Так, випадкова похибка, а також систематична похибка відомої величини, але невідомо-

мого знака, мають певні чисельні значення, тобто відносяться до розряду виявлених. Тим не менш, вони не можуть бути усунені (виключені з результатів), тобто є неусувними.

Дано визначення основних видів похибок.

**Систематичні похибки** – похибки, пов'язані з обмеженою точністю виготовлення приладу (точність приладу), неоптимальним вибором методу вимірювання, неправильним встановленням приладу і т.д. Системні похибки з'являються при неврахуванні дій деяких зовнішніх факторів. Враховуючи, що причини, які викликають систематичні похибки, в більшості випадків відомі, то вони можуть бути максимально виключені, хоча на практиці це нелегко зробити.

Залежно від причин виникнення систематичні похибки поділяють на такі види:

1) похибки методу або моделі, які зазвичай називають методичними похибками. Наприклад, визначення щільності речовини без урахування наявних у ній домішок, використання формул, що не зовсім точно описують явище, та ін.;

2) похибки впливу зовнішніх факторів: зовнішніх теплових, радіаційних, гравітаційних, електричних і магнітних полів;

3) похибки, що виникають через неточності дій чи особистих якостей оператора (експериментатора), звані особистісними похибками;

4) інструментальні (приладові, апаратурні) похибки, зумовлені схемними, конструктивними і технологічними недосконалостями засобів вимірювання, їх станом в процесі експлуатації, Наприклад, зміщення початку відліку, неточність градуювання шкали приладу, використання приладу поза допустимими межами його експлуатації, неправильне положення приладу і т.п. За винятком зміщення початку відліку приладові похибки відносяться до розряду непереборних похибок.

Є й інші чинники, які можуть також змінити калібрування чутливого елемента, що призводять до систематичних похибок. У деяких чутливих елементах, старіння компонентів змінює реакцію чутливого елемента і отже калібрування. Пошкодження або неправильна експлуатація чутливих елементів можуть також змінити калібрування. Щоб запобігти цим систематичним похибкам, чутливі елементи повинні періодично повторно калібрувати. Систематичні похибки можуть також виникати, якщо процес самого вимірювання модифікує вимірювану величину. Ця проблема, обумовлена як агресивністю впливу, є ключовою в багатьох задачах вимірювання. Взаємодія між вимірюванням і пристроєм вимірювання завжди присутня; однак, у багатьох випадках, цей вплив можна звести до незначущого рівня. Наприклад, в електронних системах, енергетичний вплив вимірювального приладу може бути

зроблено незначним, використовуючи високий вхідний опір. Приклад агресивного впливу – великий теплий термометр при вимірюванні температури малого об'єму холодної рідини. Тепло переноситься від термометра і нагріває рідину, що призводить до неточного вимірювання.

Якщо сигнал змінений деяким способом, вимірювання буде відрізнятися від зчитувальної величини.

У механічних системах зміщення і тертя можуть модифікувати передачу сигналу. В електричних ланцюгах, опір або згасання можуть також модифікувати сигнал, приводячи до систематичної помилки. Нарешті, систематичні помилки або зсув можуть вноситися і спостерігачами при зчитуванні показань.

У загальному випадку систематична похибка обумовлена сумарним впливом перерахованих раніше факторів, багато з яких неможливо розрахувати, придушити або виявити у даному експерименті. Найпростішим способом виявлення сумарної систематичної похибки було б зіставлення результатів вимірювань, отриманих за допомогою серійного (робочого) і більш точного, зразкового приладів. Різниця результатів вимірювань дасть сумарну систематичну погрішність, що вноситься серійним приладом в результат вимірювання. Однак такий спосіб виявлення систематичної похибки був би занадто дорогим. Тому на практиці різні складові систематичної похибки намагаються усунути за допомогою експериментальних або математичних прийомів шляхом введення поправок в результати спостережень, за умови, що похибка цього виду за величиною і знаком відома. Після внесення поправок вплив систематичної похибки цього виду на результат і похибка вимірювання усувається повністю. Якщо ж систематична похибка невідома, але має відомі межі зміни, то її враховують у результаті вимірювання [9].

**Випадкові похибки** пов'язані з великою кількістю випадкових факторів, дія яких на різні виміри різна, що ускладнює попереднє їх врахування.

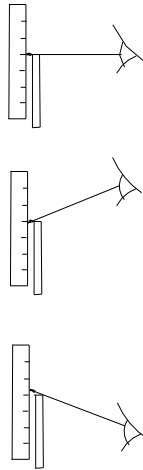
Прикладом випадкових похибок є так звана помилка паралакса, яка полягає в наступному. Для відліку поділок шкали приладу спостерігачу необхідно дивитись перпендикулярно до шкали, що проходить через кінець стрілки.

Але погляд спостерігача не завжди можна розмістити на вказаному перпендикулярі, тому можна одержати завищені і занижені значення (рис. 2.1).

Хоча виключати випадкові похибки окремих вимірів неможливо, математична теорія випадкових явищ дозволяє зменшити вплив цих похибок на кінцевий результат і встановити їх розумні значення. Далі буде показано, що для цього потрібно провести не одне, а декілька



вимірювань, при цьому менші значення похибок одержують за більшої кількості вимірювань.



**Рис. 2.1 – Варіанти спостереження**

**Груба похибка** – похибка вимірювання, значно перевищує похибки більшості результатів спостережень. Такі похибки можуть виникати внаслідок різкої зміни зовнішніх умов експерименту: раптової зміни температури, напруги в мережі і т.п. Грубі похибки виявляють статистичними методами і відповідні результати вимірювань, якщо не відображають закономірностей поведінки вимірюваної величини, виключають з розгляду.

**Прوماх** – це вид грубої похибки, що залежить від спостерігача і пов'язаний з неправильним користуванням засобами вимірювань: неправильними підрахунками показань приладів, описками при записі результатів, неуважністю експериментатора, плутаниною номерів зразків і т.п. Прوماхи виявляють не статистичними методами, результати спостережень, що містять промахи, як свідомо неправильні, виключають з розгляду.

Зазначені складові, як правило, не залежать одне від одного, що допускає їх окремий розгляд.

Комбінацію промахів, систематичних і випадкових помилок можна візуалізувати, розглядаючи мішень, наведену на рис. 2.2. Систематична похибка призводить до групи пострілів, зміщених щодо центра мішені (можливо збитий приціл або вплив вітру). Величина групи визначається джерелами випадкової похибки і є критерієм точності стрільби.

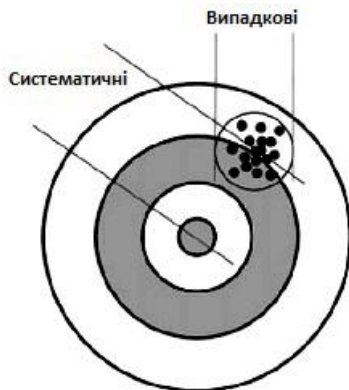


Рис. 2.2 – Промахи, систематичні та випадкові похибки

**Повна похибка вимірювання** – це сума зазначених складових, може бути представлена в абсолютному, відносному або нормованому вигляді.

**Абсолютна похибка** – це похибка вимірювання, виражена в одиницях вимірюваної величини. Поряд з абсолютною похибкою часто використовується термін абсолютне значення похибки, під яким розуміють значення похибки без врахування її знака. Ці два поняття різні.

**Відносна похибка** – це похибка вимірювання, виражена відношенням абсолютної похибки до результату вимірювання.

**Наведена похибка** – це похибка, виражена відношенням абсолютної похибки засобу вимірювання (похибка приладу) до деякої постійної величини, званої нормуючим значенням і має розмірність вимірюваної величини. Як нормуючий множник може виступати, наприклад, максимальне значення шкали приладу (верхня межа показань приладу). Поняття зведеної похибки відноситься тільки до засобів вимірювань.

Відносна і приведена похибки є безрозмірними величинами.

Одні складові похибки можуть бути усунені з результатів вимірювань, а інші – ні. Всі види непереборних похибок вносять вклад у повну похибку вимірювання, і для її знаходження необхідно знайти суму за певними правилами, які будуть розглянуті у подальшому.

Коли отриманий який-небудь експериментальний результат, він публікується і стає загальним надбанням. Кожен може користуватися ним, як йому завгодно. Одні можуть застосовувати його в розрахунках для будь-яких практичних цілей, інші – для перевірки теоретичних висновків. І в тому, і в іншому випадках необхідно знати, чи достатньо точний експериментальний результат. Якщо на підставі результату

робляться якісь висновки, то важливо знати якою мірою можна на них покладатися. Щоб можна було відповісти на подібні питання експериментатор зобов'язаний вказувати похибку вимірювання. Можна рахувати, що всякий експеримент слід проводити як можна більш точно, але такий підхід був би нереальний. Тому важливо планувати і проводити експеримент так, щоб точність остаточного результату відповідала його меті [9].

### 2.4.3. Оцінка випадкових похибок прямих вимірювань

В основі теорії випадкових похибок лежить два припущення, що підтвержені практикою [5, 10].

Перше припущення. За великої кількості вимірювань випадкові похибки однакової величини, але різного знаку (похибки як в сторону зменшення, так і в сторону збільшення) зустрічаються однаково часто.

Випадкова похибка окремого  $i$ -го вимірювання складає:

$$\Delta x_i = x_i - x, \quad (2.4)$$

де  $x_i$  – результати  $i$ -го вимірювання;  $x$  – дійсне значення величини, що вимірюється (нам невідоме).

Друге припущення. Великі (за абсолютною величиною) похибки зустрічаються рідше, ніж малі, тобто імовірність появи зменшується із зростанням величини похибки.

Згідно з (2.1), результати вимірювань можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} x_1 &= x - \Delta x_1, \\ x_2 &= x - \Delta x_2, \\ &\dots\dots\dots, \\ x_n &= x - \Delta x_n, \end{aligned} \quad (2.5)$$

Додавши ліву і праву сторони рівняння (2.5) почленно, одержимо:

$$\sum_{i=1}^n x_i = nx - \sum_{i=1}^n \Delta x_i. \quad (2.6)$$

Якщо ввести поняття середньоарифметичної величини:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.7)$$

то, розділивши кожену зі сторін рівняння (2.5) на кількість вимірювань  $n$ , після перестановки членів одержимо:

$$x = \bar{x} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i. \quad (2.8)$$

Якщо число  $n$  вимірювань достатньо велике (тобто  $n \rightarrow \infty$ ), то згідно з першим припущенням:

$$\lim \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0. \quad (2.9)$$

З виразів (2.8) і (2.9) виходить, що:

$$x = \bar{x} \text{ при } n \rightarrow \infty. \quad (2.10)$$

Тобто при нескінченно великій кількості вимірювань дійсне значення величини, що вимірюється, дорівнює середньоарифметичному значенню  $\bar{x}$  всіх результатів проведення вимірювань (при цьому допускається відсутність систематичних похибок). Однак, при обмеженій кількості вимірювань ( $n \neq \infty$ ) середньоарифметичне значення  $\bar{x}$  буде відрізнятися від дійсного значення  $x$ , тобто рівняння (2.8) буде не точним, а наближеним:

$$x \approx \bar{x}. \quad (2.11)$$

Оцінимо величину цього розходження.

Згідно з теорією імовірності замість наближеної рівності (2.11) можна записати:

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x, \quad (2.12)$$

або

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \quad (2.13)$$

де  $\Delta x$  – оцінка абсолютної похибки (ще невідома).

Інтервал ( $\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x$ ) назвемо довірливим інтервалом, в який попадає дійсне значення  $x$  величини вимірювання з цією імовірністю.

Надійністю результату серії вимірювань називається імовірність  $\alpha$  тому, що дійсне значення  $x$  величини вимірювання попаде в цей довірливий інтервал.

Для того, щоб одержати оцінку границь довірливого інтервалу для  $x$  за малих значень  $n$  використовують коефіцієнт  $t_\alpha$ . Цей коефіцієнт був запропонований в 1908 році англійським математиком і хімі-

ком В.С. Госсетом, що публікував свої роботи під псевдонімом Стьюдент – студент, – і одержав потім назву «коефіцієнт Стьюдента».

За недостатньо великої кількості вимірювань (практично, коли  $n < 20$ ) при заданій надійності  $\alpha$  коефіцієнт Стьюдента  $t_\alpha$  визначає залежність між похибкою результату  $\Delta x$  і середньоквадратичною похибкою результату серії вимірювань  $\Delta S_{\bar{x}}$ :

$$t_\alpha(n) = \frac{\Delta x}{\Delta S_{\bar{x}}}, \quad (2.14)$$

$$\text{де } \Delta S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (2.15)$$

Таким чином, при заданій кількості вимірювань  $n$  задаючись надійністю  $\alpha$  (наприклад,  $\alpha = 0,95$ ) за табличними даними визначаємо коефіцієнт Стьюдента  $t_\alpha$ . Після цього, використовуючи вираз (2.14), визначаємо похибку вимірювання  $\Delta x$ :

$$\Delta x = t_\alpha(n) \Delta S_{\bar{x}}, \quad (2.16)$$

а результат вимірювання запишемо у вигляді:

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x, \quad (2.17)$$

або

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (2.18)$$

Це означає, що дійсне значення  $x$  попадає в довірливий інтервал  $(\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x)$  з надійністю, що дорівнює  $\alpha$ .

Необхідно відмітити, що величина абсолютної похибки  $\Delta x$  результату вимірювання сама по собі ще не визначає точності вимірювання. Нехай, наприклад, при вимірюванні рулеткою довжини і діаметра олівця ми одержали результати:  $L = (18 \pm 0,5)$  см і  $D = (0,5 \pm 0,5)$  см. Хоча абсолютні похибки вимірювань однакові, точність вимірювань різна. Якщо в першому випадку вимірювання достатньо точні, то в другому випадку навпаки.

Для оцінки точності вимірювань вводиться поняття відносної похибки  $\varepsilon$ , що дорівнює відношенню абсолютної похибки  $\Delta x$  результату вимірювання до самого результату вимірювання  $\bar{x}$ :

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}}. \quad (2.19)$$

Звичайно ця похибка представляється у відсотках:

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100 \%. \quad (2.20)$$

#### 2.4.4. Оцінка випадкових похибок непрямих вимірювань

Запропонована методика визначення похибок непрямих вимірювань носить дещо наближений характер і буде більш достовірною при збільшенні кількості вимірювань. В найбільш відповідальних випадках при визначенні надійності результату непрямих вимірювань необхідно використовувати розподілення імовірності даної конкретної функції випадкових величин і звертатися до більш складних розділів математичної статистики (дисперсійний аналіз, перевірка гіпотез та ін.).

Запропонований порядок оцінки випадкових похибок непрямих вимірювань наступний:

1) для кожної серії вимірювань величин, що входять у визначення шуканої величини, проводиться обробка за методикою визначення похибок прямих вимірювань, при цьому для всіх вимірювань задається одне і те саме значення надійності  $\alpha$  ;

2) визначаємо границі довірливого інтервалу для результату непрямих вимірювань:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \Delta x_2^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}\right)^2 \Delta x_3^2}, \quad (2.18)$$

де  $\partial f/\partial x_1$ ,  $\partial f/\partial x_2$ ,  $\partial f/\partial x_3$  – частинні похідні функції  $f(x_1, x_2, x_3)$  по змінних  $x_1, x_2, x_3$  відповідно;  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  – абсолютні похибки прямих вимірювань.

Кінцевий результат запишемо у вигляді:

$$f(x_1, x_2, x_3) = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) \pm \Delta x. \quad (2.19)$$

Визначаємо відносну похибку серії непрямих вимірювань:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \times 100 \%. \quad (2.20)$$

Розглянемо декілька прикладів:

а) похибки суми двох величин:

$$\begin{aligned}
 x &= x_1 + x_2, \\
 \Delta x &= \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}, \\
 \varepsilon_x &= \frac{\sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}}{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

б) похибки різниці двох величин:

$$\begin{aligned}
 x &= x_1 - x_2, \\
 \Delta x &= \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}, \\
 \varepsilon_x &= \frac{\sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}}{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

в) похибки добутку двох величин:

$$\begin{aligned}
 x &= x_1 \cdot x_2, \\
 \Delta x &= \sqrt{x_2^2 \Delta x_1^2 + x_1^2 \Delta x_2^2}, \\
 \varepsilon_x &= \frac{\sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2}}{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

г) похибки відношення двох величин:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{x_1}{x_2}, \\
 \Delta x &= \sqrt{\frac{1}{x_2^2} \Delta x_1^2 + \frac{x_1^2}{x_2^4} \Delta x_2^2}, \\
 \varepsilon_x &= \sqrt{\varepsilon_{x_1} + \varepsilon_{x_2}}.
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

## 2.5. Огляд програмного забезпечення для виконання аналізу, обробки і представлення експериментальних даних

Розрахунок регресії або тим більше Фур'є – перетворення – це досить непросте завдання, навіть при вирішенні його в одній з систем програмування (не кажучи про проведення підрахунку на папері). Якщо у вас є досвід обробки даних такими традиційними шляхами, то ви будете приємно здивовані і вражені, наскільки простіше і швидше (і найчастіше якісніше) можна виконати цю роботу в Mathcad та інших спеціалізованих математичних програмах. Вся справа в тому, що серед вбудованих функцій програм вельми помітну частину займають функ-

ції, що реалізують основні з поширених в науці і техніці алгоритмів. І для того, щоб, наприклад, побудувати криву показової регресії для деякої вибірки, вам зовсім не потрібно пам'ятати складні і громіздкі методи, типу методу найбільшої правдоподібності або алгоритму найменших квадратів. Вам достатньо просто ввести в маркер графічної області  $\text{expfit}(x,y,t)$  і система, прорахувавши найбільш вдалі параметри наближення, побудує максимально коректну для ваших даних криву.

Всі інші типи обробки даних реалізуються в Mathcad настільки ж просто.

Розглянемо основні завдання, які можуть вам зустрітися при обробці (і представленні) даних, і деякі програми, які можуть допомогти вам:

- символні обчислення;
- проведення статистичної обробки даних (знаходження середніх значень, функцій розподілу, ...);
- завдання апроксимації, інтерполяції, екстраполяції, згладжування, ...;
- графічне представлення даних;
- написання звітів про виміри.

### ***2.5.1. Розрахунки і статистична обробка результатів***

**MathCAD** є представником нового покоління програмних засобів і призначений для інженерних і математичних розрахунків. Надзвичайно простий у використанні і легкий в освоєнні. Його інтерфейс настільки зручно зроблений, що користувач працює з робочим листом програми, як з аркушем паперу, де він пише формули і математичні вирази в їх звичайній інтерпретації. MathCAD може виконувати обчислення будь-якого ступеня складності і обмежений лише технічними можливостями вашої техніки. Крім чисельних розрахунків, він може виконувати і символні обчислення (тут це називається «символьна математика»). Є широкі графічні можливості, крім стандартних типів графіків можна будувати поверхні, лінії рівня і векторні поля. Крім того, розробники створили електронну книгу, яка називається «Центр ресурсів». У книзі розміщено численні приклади розв'язання типових задач, причому їх можна не тільки переглядати, але і переносити на свій робочий лист звичайною операцією копіювання або буксируванням. Таких електронних книг з різних областей науки і техніки існує велика кількість і їх можна копіювати з мережі Internet.

**MathCAD Explorer.** При розрахунках і читанні MathCAD документів можна використовувати безкоштовну програму MathCAD Explorer, але ця програма не дозволяє зберегти результати розрахунків. Останню версію програми ви можете завантажити або з сайту MathSoft, або з освітнього математичного сайту <http://www.Exponenta.ru>.



Існують дві більш спеціалізовані програми, призначені для графічного представлення і статистичної обробки різних даних. Програми легко інтегруються з MathCAD і можуть використовуватися з ним спільно доповнюючи один одного.

**S-Plus** – потужна програма для статистичної обробки та графічного представлення результатів вимірювань. Програма добре інтегрується з MathCAD і дозволяє отримувати графічне представлення розрахунків у вигляді, готовому для публікації у звіті або дипломному проекті.

**Axum** (полегшена версія S-Plus). Демонстраційні версії всіх програм можна завантажити на сайті MathSoft (<http://www.mathsoft.com>).

**Matlab – Scilab – Octave.** Системи комп'ютерної математики (СКМ) сьогодні стали найважливішим робочим інструментом в багатьох фундаментальних і прикладних науках. Їх використання істотно полегшує дослідникові життя, а часто взагалі є єдиним способом отримання яких-небудь значущих результатів. Однак для більшості вітчизняних користувачів комерційні СКМ вищого класу (MathCAD, Mathematica, Maple та ін.) занадто дорогі. Розумним і фактично безальтернативним виходом представляється безкоштовне програмне забезпечення й виявляється, в ньому також зустрічаються досить якісні розробки, однією з яких є Scilab. Пакет Scilab є вільно розповсюджуваною (разом з вихідними кодами) системою комп'ютерної математики. До недавня він розроблявся дослідними інститутами INRIA і ENPC, а з травня 2003 р. підтримку продукту взяв на себе спеціально створений для цієї мети Scilab Consortium, з Web-вузла якого (<http://scilabsoft.inria.fr/>) можна завантажити останню версію програми і повний комплект документації. Scilab випускається для операційних систем Windows (будь-яка 32-розрядна версія), найбільш популярних Unix/Linux і не потребує великих системних ресурсів: інсталяційний модуль має розмір до 20 МВ, а для встановлення потрібно трохи більше 40 МВ. Пакет не випадково має назву, співзвучну з Matlab – однієї з найбільш потужних комерційних СКМ. У обох додатків чимало спільного – від інтерфейсу і принципу взаємодії з користувачем через командний рядок до синтаксису мови. Таким чином, Scilab можна розглядати як полегшений варіант Matlab, який, втім, зберігає основні можливості останнього.

Scilab є типовим командним інтерпретатором і структурно складається з інтерпретуючої системи, приймаючої команди користувача і повертаючої результат, та двох бібліотек: власних функцій і додаткових – на мовах C і Fortran.

Хоча Scilab є безкоштовним продуктом, його обчислювальні можливості, забезпечені приблизно тисячею вбудованих функцій, цілком відповідають СКМ професійного рівня. Функції системи, що відносяться до деяких прикладних областей математики і техніки, зібрані

в додаткові пакети розширень (так звані *toolboxes*). Одні з них застосовуються досить широко (як, скажімо, методи чисельного розв'язання крайових задач для систем диференціальних рівнянь, лінійне і квадратичне програмування), інші мають вузьку специфічну спрямованість. З останніх назвемо пакети для цифрової обробки сигналів, аналізу динамічних систем, оптимізації зі спеціальними обмеженнями. Scilab є надійною і потужною платформою для створення недорогих, але цілком конкурентоспроможних рішень в області обробки даних, чисельної реалізації алгоритмів і візуалізації. Тому якщо перед вами стоять подібні завдання, варто звернути увагу на цю неординарну і доступну обчислювальну систему.

**Octave** – інтерактивна програмна система з відкритим вихідним кодом для числових розрахунків та побудови графіків. Вона призначена в основному для матричних обчислень: розв'язування систем рівнянь, обчислення власних векторів і власних значень і так далі. У багатьох реальних технічних завданнях дані можуть бути представлені як матриці та вектори, і рішення таких завдань зводиться до цих форм рішення. Крім того, Octave може представляти дані різним чином, а також має свою власну мову програмування, що дозволяє розширювати систему. Про Octave можна говорити як про дуже потужний, програмований, графічний калькулятор. Octave полегшить вирішення широкого кола числових завдань і залишить більше часу на експеримент і обдумування більш широких проблем.

Цінність Octave збільшується ще й у зв'язку з тим, що синтаксисом вона сумісна з Matlab, який зазвичай використовується в промисловості та науці.

Octave розроблена для розв'язування математичних задач чисельно. Це означає, що Octave може не завжди давати точне розв'язування задачі, і її не повинні порівнювати з програмами типу Mathematica або Maple, які дають символічні розв'язування, роблячи алгебраїчні маніпуляції. Це не означає, що Octave краще або гірше – вона використовується для вирішення свого кола завдань. Найреальніші математичні проблеми (особливо технічні!) не мають чітких символічних розв'язування.

Octave і Matlab широко використовуються інженерами і вченими в промисловості і в науці для того, щоб виконувати числові обчислення, і для того, щоб розробляти і перевіряти математичні алгоритми.

### **2.5.2. Побудова графіків**

Для графічного представлення результатів вимірювань і розрахунків можна використовувати всі раніше наведені програми. Також є спеціалізовані програми, які забезпечують створення графіків дуже

високої якості і дозволяють виконувати їх за всіма вимогами, які необхідні для публікацій в журналах або до оформлення курсових і дипломних проектів. Grapher, Origin, SigmaPlot, Gnuplot і т.д.

**Sigma Plot** – найбільш зручна програма, що дозволяє не тільки будувати різноманітні графіки, але і виконувати аналіз експериментальних даних (рис. 2.3).

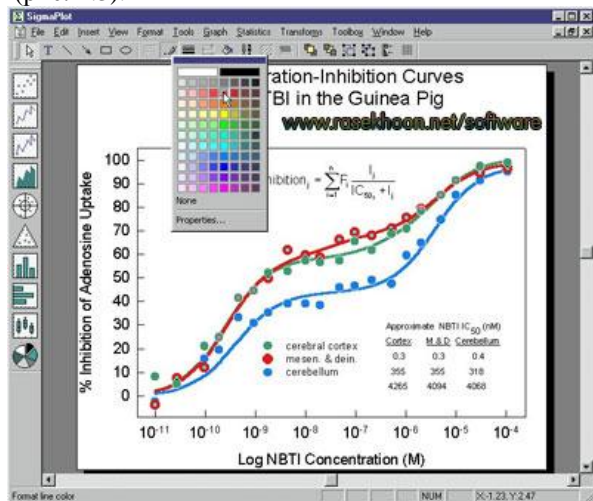


Рис. 2.3 – Програма побудови графіків і обробки даних SigmaPlot

**Origin** – володіє схожими можливостями, має широке поширення як в науковому так і інженерному середовищі.

**Gnuplot** – зручна і вільно поширювана програма. Особливо популярна програма в університетському і академічному середовищі. Програма консольна. Для побудови графіка необхідно створити звичайний текстовий файл, що містить команди.

Приклад командного файлу \*.plt, набраного у вбудованому редакторі Gnuplot (рис. 2.5) або в будь-якому текстовому редакторі:

```
set nokey
set terminal postscript enhanced mono
set output "F_2.eps"
set size 0.7,1
set origin 0,0
set multiplot
set pointsize 0.5
set origin 0,0
set size 0.7,1
```

```

set yrange [50:120]
set xrange [100:375]
set label "a" at 120,115
set xlabel "T, K"
set ylabel "C_{p}, J/mol{/Symbol \327}K"
plot 'Cp_BTZ35.dat' using 1:2 with points 6,
'Latt_BTZ35.dat' using 1:2 with lines 1
set origin 0.25,0.1
set size 0.4,0.4
set arrow from 100,0 to 370,0 nohead
set xrange [100:370]
set label "b" at 130,1.5
set xlabel "T, K"
set yrange [-0.5:2.0]
set ylabel "{/Symbol D}C_{p}, J/mol{\264}K"
plot 'btz35.txt' with points 6
unset multiplot

```

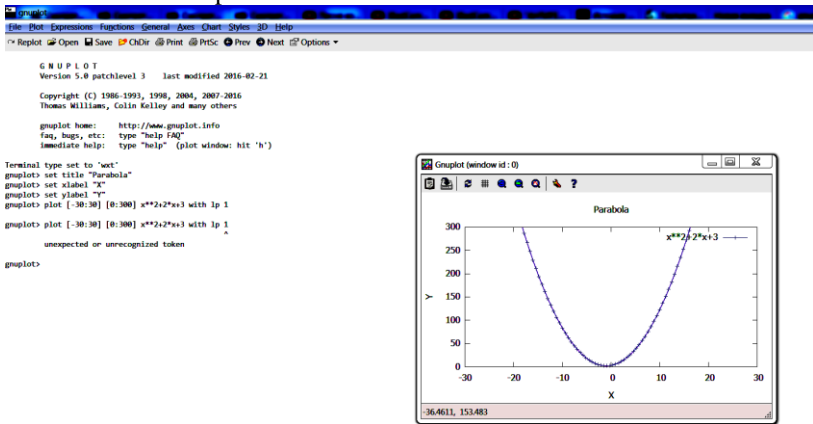


Рис. 2.4 – Програма GnuPlot та результати

### 2.5.3. Робота з текстом

**Microsoft Word** – фактично всі тексти набираються у цьому редакторі. Навряд чи має сенс розповідати про його переваги. Якщо вам необхідно набирати багато математичних формул, найкраще використовувати вбудовану програму **MathType**.

**OpenOffice.org** – це вільний набір офісних програм, до складу якого входять наступні компоненти:

- Writer (текстовий процесор і редактор HTML);

- Calc (електронні таблиці);
- Draw (графічний редактор);
- Impress (система презентацій);
- Редактор формул Match;
- Модуль доступу до даних.

OpenOffice.org є повноцінним офісним пакетом, що не поступається за своїми можливостями таким популярним програмам, як MS Office. Він містить компоненти для роботи з текстом, електронними таблицями, працює з базами даних, обробляє графіку, створює складні документи інтернет-публікацій.

**Latex (MikTeX (ProTeX) + TeXnicCenter).** TeX – система для верстки текстів з формулами (назва походить від грецьких «Технологія» і «Мистецтво», тому остання буква читається як українська Х).

Переваги:

- найвища друкарська якість при друці;
- як завгодно складні математичні формули;
- працює на всіх існуючих комп'ютерних платформах;
- гнучкі засоби для роботи з логічною структурою тексту.

Недоліки:

- не є системою типу WYSIWYG;
- результат потрібно друкувати на лазерному або PostScript принтері [9].

## **2.6. Імовірно-статистичні методи обробки експериментальних даних**

Зазвичай технологічні процеси протікають в умовах безперервно мінливих обставин: вимушені простої машин, пов'язані з поломкою або технічним обслуговуванням; нерівномірність роботи транспорту; зміна зовнішніх умов (наприклад, метеорологічних) і т.д. Ті чи інші події можуть відбутися чи ні. У зв'язку з цим доводиться аналізувати випадкові, імовірного або стохастичного зв'язку, в яких кожному аргументу відповідає безліч значень функції.

Спостереження показують, що, незважаючи на випадковий характер зв'язку, розсіювання параметрів має цілком певну закономірність. Для таких статистичних законів, теорія ймовірності дозволяє представити не результат однієї якої-небудь події, а середній результат випадкових подій, і тим точніше, чим більше число аналізованих явищ.

**Теорія ймовірності** вивчає випадкові події, математична статистика займається способами обробки й аналізу емпіричних подій.

**Основним завданням статистики** є підбір теоретичних кривих за наявним емпіричним законом розподілу досліджуваного пара-

метра. Ці дві споріднені науки становлять єдину математичну теорію масових випадкових процесів, яка широко застосовується в наукових дослідженнях.

### **2.6.1. Випадкові величини. Аксиоми теорії ймовірностей**

Під **випадковою величиною** розуміють величину, яка приймає в результаті випробування значення, яке принципово не можна передбачити виходячи з умов досліду. Зміна випадкової величини від досліду до досліду пов'язано з випадковими чинниками.

Розрізняють **дискретні** і **безперервні випадкові величини**. Можливі значення дискретних випадкових величин можна заздалегідь перерахувати. Значення неперервної випадкової величини не можуть бути заздалегідь перераховані, вони безперервно заповнюють певний проміжок. Щоб повністю охарактеризувати випадкову величину, необхідно не тільки вказати, які значення вона може приймати, але і як часто.

Нехай дискретна випадкова величина  $X$  приймає в результаті досліду значення  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Відношення числа дослідів  $m$ , в результаті яких випадкова величина  $X$  прийняла значення  $x_i$ , до загального числа виконаних дослідів  $n$  називається частотою появи події  $X = x_i$ . Частота  $m/n$  є випадковою величиною і змінюється залежності від кількості виконаних дослідів. Але при великому числі дослідів вона має тенденцію стабілізуватися біля деякого значення  $p_i$ , званого ймовірністю події  $X = x_i$ :  $p_i = P(X = x_i) \approx m/n$  [7, 11].

У математичній статистиці важливе значення має поняття про **частоту події**  $y(x)$ , що представляє собою відношення випадків  $n(x)$ , при яких мала місце подія, до загального числа подій  $n$ .

**Сумою декількох подій** ( $A_1 + A_2 + \dots + A_n$ ) називають подію, що складається в появі хоча б однієї з цих подій. Перерахуємо аксиоми теорії ймовірностей, які були сформульовані А.Н. Колмогоровим:

1) ймовірність появи випадкової події  $A$  є невід'ємним числом:  $P(A) \geq 0$ ;

2) ймовірність достовірної події  $U$  дорівнює одиниці:  $P(U) = 1$ , а ймовірність неможливої події  $V$  – нулю;

3) ймовірність того, що настане хоча б одна з декількох несумісних подій  $A_1, A_2, \dots, A_n$  дорівнює сумі ймовірностей цих подій (теорема додавання ймовірностей):

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n). \quad (2.25)$$

Добутком кількох подій  $A_1, A_2, \dots, A_n$  називається подія, яка складається з спільної появи всіх цих подій.

Випадкові події  $A_1, A_2, \dots, A_n$  називаються незалежними, якщо ймовірність будь-якої з них не залежить від того, відбудеться чи ні будь-яка з інших обставин. Ймовірність добутку декількох незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей цих подій:

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1) P(A_2) \dots P(A_n). \quad (2.26)$$

Подія  $A$  називається залежною від події  $B$ , якщо ймовірність події  $A$  змінюється залежно від того, відбулася подія  $B$  чи ні. Ймовірність події  $A$ , обчислена за умови, що сталася інша подія  $B$ , називається умовною ймовірністю події  $A$  і позначається  $P(A/B)$ .

### 2.6.2. Генеральна і вибіркова сукупності

Безліч змінюваних вхідних і вихідних змінних і змінних стану того чи іншого об'єкта утворюють *генеральну сукупність*, тобто сукупність всіх можливих їх значень в умовах цього експерименту.

Для отримання відомостей про генеральну сукупність здійснюють відбір (вимірювання) обмеженого числа вибірок з генеральної сукупності з того чи іншого плану. Одна або кілька таких вибірок утворюють *статистичний масив*. Зазвичай застосовуються *дві основні схеми отримання вибірок*: спостерігається одночасно досить багато об'єктів або один і той же об'єкт спостерігається багато разів (протягом певного проміжку часу) і при цьому вимірюється деяка кількість показників – випадкових величин або випадкових функцій. Відповідно до цього вибірка може бути *одноразова або поточна* [2–4].

Для забезпечення достовірної оцінки показників за вибірковими спостереженнями необхідно, щоб всі експерименти були взаємно незалежні. Необхідна репрезентативність (представництво) вибірових спостережень має місце тільки при постійних, що не змінюються умовах експерименту, випадковості місця і час взяття вибірки і розміру самої вибірки в порівнянні з генеральною сукупністю.

Вибірка називається *репрезентативною* (представницькою), якщо вона дає достатнє уявлення про особливості генеральної сукупності. Якщо про генеральну сукупність нічого не відомо, єдиною гарантією репрезентативності може слугувати випадковий відбір.

Відзначені умови вдається створити при проведенні лабораторних дослідів або в добре налагоджених виробничих умовах з керованими

ними чинниками. Вибірки можна брати одночасно (наприклад, на багатьох однотипних машинних агрегатах, що працюють в однакових умовах) або послідовно через рівні проміжки часу навімання від того чи іншого агрегату. На таку процедуру накладається лише два обмеження:

1) загальний проміжок здійснення замірів для аналізу не повинен бути занадто великим, щоб не відбулося змін у самому процесі (щоб не змінилися параметри стану об'єкта або системи) через зношення інструменту та інших причин;

2) число вибірок (відібраний масив об'єктів) має бути достатньо великим для отримання достовірних статистичних оцінок.

**Обчислення вибірових характеристик. Числові характеристики вибірки.** У результаті проведення  $n$  експериментів зі випадковою величиною  $\xi$  отримуємо  $n$  вибірових значень  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Вся сукупність цих значень називається **вибіркою**.

Після оцінювання похибок вимірювань фізичної величини отримуємо вибірку. Первинна обробка даних вибірки полягає у знаходженні максимального  $x_{\max}$  і мінімального  $x_{\min}$  значень вибірки (в Mathcad вони обчислюються відповідно функціями  $\max(\xi)$  і  $\min(\xi)$ ), розмаху варіювання  $R = X_{\max} - X_{\min}$ , а також у побудові варіаційного ряду – масиву вибірових значень, записаних у порядку зростання. Для виконання цих обчислень в Mathcad призначені відповідно функції  $\max(A)$ ,  $\min(A)$  і  $\text{sort}(A)$  [8].

Проміжок  $[x_{\min}, x_{\max}]$  розбивають на  $m$  інтервалів угруповання (найчастіше однакової довжини,  $m = 7-20$ ) і підраховують число  $n_j$  вибірових значень, які потрапили в  $j$ -й інтервал. Тепер кожен інтервал угруповання  $\Delta_j = (a_j, b_j)$  представлений своїми лівим  $a_j$  і правим  $b_j$  кордонами і числом  $r_{ij}$  елементів вибірки, що належать йому.

Кожен інтервал зручно подавати не двома межами, а одним числом – середнім значенням.

Якщо  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$  – довжини інтервалів групи, а  $x_1, x_2, \dots, x_m$  – їх середини і  $h_j = n/n$  – відносні частоти потрапляння спостережень в  $j$ -й інтервал угруповання, то можна побудувати графік ступінчастої функції:  $f(x) = h_j/\delta_j, x \in \Delta_j, j = 1, 2, \dots, m$ . Цей графік називається **гістограмою**.

Наступні чотири функції обчислюють числові характеристики вибірки, що міститься в масиві  $A$  розмірності  $mn$ .

Функція  $\text{mean}(A)$  обчислює значення **вибіркового середнього**:



$$\text{mean}(A) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} A_{ij}. \quad (2.27)$$

Функція  $\text{var}(A)$  обчислює зміщену точкову оцінку дисперсії, звану вибіркової дисперсією:

$$\text{var}(A) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (A_{ij} - \text{mean}(A))^2. \quad (2.28)$$

Функція  $\text{stdev}(A)$  визначає середньоквадратичне відхилення:

$$\text{stdev}(A) = \sqrt{\text{var}(A)}. \quad (2.29)$$

Для комплексних вибірових значень вибіркова дисперсія обчислюється за формулою:

$$\text{var}(A) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |A_{ij} - \text{mean}(A)|^2. \quad (2.30)$$

Функція  $\text{median}(A)$  обчислює медіану – величину, менше і більше якої у вибірці міститься однакова кількість елементів.

Функція  $\text{cvar}(A, B)$  обчислює значення **вибіркової коваріації**:

$$\text{cvar}(A) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (A_{ij} - \text{mean}(A))(B_{ij} - \text{mean}(B)). \quad (2.31)$$

Функція  $\text{corr}(A, B)$  визначає **коефіцієнт кореляції**:

$$\text{corr}(A, B) = \frac{\text{cvar}(A, B)}{\sqrt{\text{var}(A)}\sqrt{\text{var}(B)}}. \quad (2.32)$$

Приклад робочого документа Mathcad, де за допомогою описаних раніше функцій обчислено числові характеристики цих вибірових даних:

$$vmin := \min(v) \quad vmin = 120.991$$

$$vmax := \max(v) \quad vmax = 180.482$$

$$razmax := vmax - vmin \quad razmax = 59.491$$

$$v = \text{sort}(v)$$

$$vmean := \text{mean}(v) \quad vmean = 149.849$$

$$vvar := \text{var}(v) \quad vvar = 97.782$$

$$vstdev := \text{stdev}(v) \quad vstdev = 9.888$$

До числових характеристик вибірки відносяться **показники положення** (середнє значення вибірки, вибіркова медіана, мінімальний і максимальний елементи вибірки, а також верхня і нижня квартилі), **розкиду** (дисперсія вибірки або вибіркова дисперсія), стандартне відхилення, розмах вибірки, межквартильний розмах, коефіцієнт ексцесу (вибірковий ексцес) і **асиметрії** (коефіцієнт асиметрії)).

Середнє значення вибірки розраховується за формулою:

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

У Mathcad для обчислення вибіркового середнього значення вибірки, збереженої в матриці  $A$ , призначена функція  $\text{mean}(A)$ .

Вибіркова медіана є вирішенням рівняння  $F_n(x) = 0,5$ , тобто вибіркова медіана – це вибіркова квантиль рівня 0,5. Вибіркова медіана поділяє вибірку навпіл: ліворуч і праворуч від неї виявляється однакове число елементів вибірки. Якщо число елементів вибірки парне,  $n = 2^k$ , то вибіркову медіану визначають за формулою:

$$\frac{x_k + x_{k+1}}{2}.$$

При непарному обсязі вибірки як значення медіани приймають  $x_{k+1}$ . У Mathcad для обчислення вибіркової медіани вибірки, збереженої в матриці  $A$ , призначена функція  $\text{median}(A)$ .

До показників положення відносяться мінімальний і максимальний елементи вибірки, а також верхня і нижня квартилі (вони обмежують зону, в якій зосереджені 50 % елементів вибірки).

Для обчислення мінімального і максимального елементів вибірки, розміщеної в матриці  $A$ , в Mathcad призначені відповідно функ-

ції  $\min(A)$  і  $\max(A)$ . Вибірковою дисперсією називається величина  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ .

Однак у статистиці частіше як вибіркової дисперсії, використовується величина  $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ . У Mathcad для визначення дисперсії вибірки, збереженої в матриці  $A$  призначена функція  $\text{var}(A)$ , а величину  $s^2$  можна обчислити за формулою:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \text{var}(A).$$

Стандартне відхилення розраховується за формулою  $\sigma = \sqrt{s^2}$ .

Міжквартильний розмах дорівнює  $x_{0,75} - x_{0,25}$ , де  $x_{0,75}$  – 75 %-й квартиль, розв’язування рівняння  $F_n(x_{0,75}) = 0,75$ ;  $x_{0,25}$  – 25 %-й квартиль, розв’язування рівняння  $F_n(x_{0,25}) = 0,25$ . Вибірковий ексцес визначається за формулою  $E = \mu^4 (s^2)^{-2} - 3$ , де  $\mu^4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4$  – величина вибіркового центрального моменту четвертого порядку.

**Коефіцієнт асиметрії**  $a = \mu^3 / \sigma^3$ , де  $\mu^3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3$  –

величина вибіркового центрального моменту третього порядку.

Приклад робочого документа Mathcad, де міститься обчислення характеристик вибірових даних:

$$n := 250$$

$$s2 := \frac{n}{n-1} \times \text{var}(v) \quad s2 = 98.174$$

$$\sigma := \sqrt{s2} \quad \sigma = 9.908$$

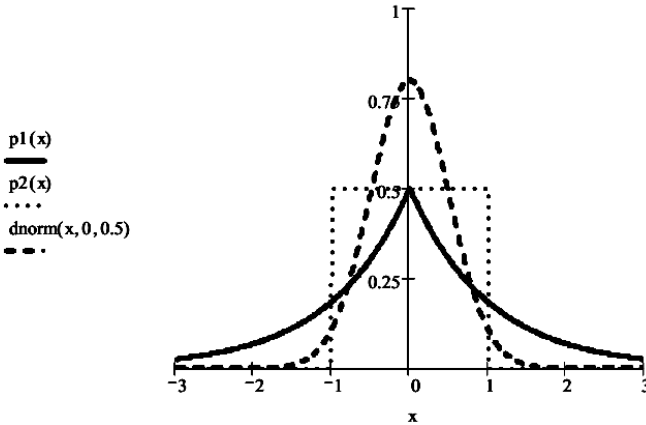
$$\mu3 := \frac{1}{n} \times \sum (v - v\text{mean})^3 \quad \mu4 := \frac{1}{n} \times \sum (v - v\text{mean})^4$$

$$E := \frac{\mu4}{s2^2} - 3 \quad E = 0.136 \quad \alpha := \frac{\mu3}{\sigma^3} \quad \alpha = -0.055$$

Для того щоб обчислити величини  $\mu_3$  і  $\mu_4$  необхідно натиснути на піктограму «Сума векторів», після чого під знаком суми  $\Sigma$  набрати з клавіатури відповідний вираз.

**Приклад 2.1.** Обчислити ексцес випадкової величини  $\xi$  із заданим розподілом. Подалі наведені обчислення ексцесу і графіки відповідних щільності ймовірностей для двох випадкових величин, перша має розподіл Лапласа, щільність ймовірностей якого  $p(x) = \frac{1}{2}e^{-|x|}$ , а друга розподілена рівномірно на відрізку  $[-1, 1]$ . Для порівняння разом з графіками щільності ймовірностей досліджуваних випадкових величин наведено графік щільності ймовірностей нормального розподілу  $N(0, 1)$ .

$$\begin{aligned}
 p_1(x) &:= \frac{1}{2} \cdot \exp(-|x|) & p_2(x) &:= \frac{1}{2} \\
 \mu_{21}(\xi) &:= 2 \cdot \int_0^{\infty} x^2 \cdot p_1(x) \, dx & \mu_{22}(\eta) &:= \int_{-1}^1 x^2 \cdot p_2(x) \, dx \\
 \mu_{41}(\xi) &:= 2 \cdot \int_0^{\infty} x^4 \cdot p_1(x) \, dx & \mu_{42}(\eta) &:= \int_{-1}^1 x^4 \cdot p_2(x) \, dx \\
 \gamma_1(\xi) &:= \frac{\mu_{41}(\xi)}{\mu_{21}(\xi)^2} - 3 & \gamma_2(\xi) &:= \frac{\mu_{42}(\xi)}{\mu_{22}(\xi)^2} - 3 \\
 \gamma_1(\xi) &\rightarrow 3 & \gamma_2(\xi) &\rightarrow \frac{-6}{5} \\
 p_1(x) &:= \frac{1}{2} \cdot (\exp(-|x|)) & p_2(x) &:= \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{if } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{if } |x| > 1 \end{cases}
 \end{aligned}$$



З наведених обчислень видно, що графік щільності ймовірностей розподілу з негативним ексцесом має більш «згладжений» максимум, ніж у щільності ймовірностей нормального розподілу, а щільність ймовірностей з позитивним ексцесом, навпаки, «гостріше», ніж щільність ймовірностей нормального розподілу [9].

### 2.6.3. Розподіл випадкової величини, теоретичний та емпіричний розподіл, їх табличне і графічне представлення

Дискретну випадкову величину можна повністю задати **ймовірнісним рядом**, вказавши ймовірність  $p_i$  для кожного значення  $x_i$ :

|       |       |       |       |     |       |
|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| $x_i$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | ... | $x_n$ |
| $p_i$ | $p_1$ | $p_2$ | $p_3$ | ... | $p_n$ |

Усяке співвідношення, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини і відповідними їм ймовірностями, називається **законом розподілу**.

Для неперервних випадкових величин вивчається ймовірність того, що в результаті досліду значення випадкової величини потрапить в деяку заздалегідь намічену сукупність чисел. Нехай ймовірність події  $X < x$ , де  $x$  – довільне дійсне число, а  $X$  – випадкова величина. Ця ймовірність є функцією від  $x$ :  $P(X < x) = F(x)$  і називається функцією розподілу випадкової величини [2–4].

У вигляді функції розподілу можна задати розподіл безперервною або дискретною випадковою величиною (рис. 2.5, а, б). Функція розподілу дискретної випадкової величини завжди є розривна східчаста функція, скачки якої відбуваються в точках, відповідних можливим

значенням випадкової величини, і дорівнюють ймовірностям цих значень (рис. 2.5, б). Сума всіх стрибків дорівнює одиниці.

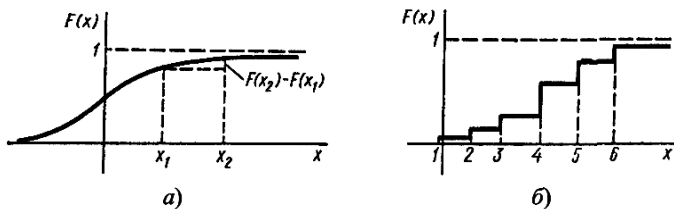


Рис. 2.5 – Функція розподілу неперервної випадкової величини (а) і дискретної випадкової величини (б)

Для неперервної випадкової величини часто вживається похідна функції розподілу – **щільність розподілу** випадкової величини  $X$ . Щільність розподілу є невід’ємною функцією (рис. 2.6).

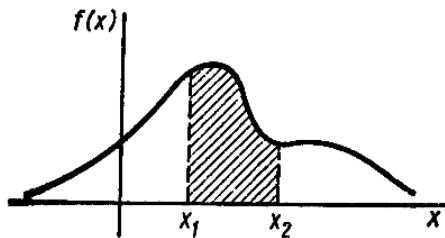


Рис. 2.6 – Щільність розподілу неперервної випадкової величини

Площа, обмежена віссю  $x$ , прямими  $x = x_1$  і  $x = x_2$  і кривою щільності розподілу, дорівнює ймовірності того, що випадкова величина прийме значення з інтервалу  $x_1 \dots x_2$ .

Функція розподілу  $F_n(x) = n_x/n$ , одержувана за вибіркою, називається емпіричною або вибірковою функцією розподілу.

Для кожної вибірки емпірична функція розподілу буде своєю, але всі емпіричні функції розподілу однієї і тієї самої випадкової величини будуть мати щось спільне, що є інформацією про функції розподілу цієї випадкової величини [9].

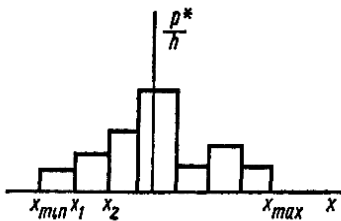
При обробці вибірок великих обсягів використовують метод «згрупованих даних»: вибірка обсягу  $n$  перетвориться в статистичний ряд. Для цього весь діапазон зміни випадкової величини у вибірці  $x_{\min} \dots x_{\max}$  ділиться на  $k$  рівних інтервалів. Число інтервалів можна вибирати за напівемпіричної формулою  $k = 1 + 3,21 \lg n$  з округленням до

найближчого цілого. Довжина інтервалу  $k$  дорівнює  $h = (x_{\max} - x_{\min})/k$ . Статистичний ряд записується у вигляді таблиці 2.1.

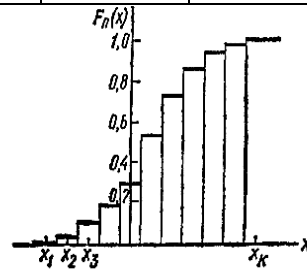
Графік (рис. 2.7), побудований за даними таблиці 2.1, називається гістограмою *емпіричного* чи *вибіркового розподілу*. На рис. 2.8 наведений графік функції  $F_n(x)$ , побудований за згрупованими даними.

**Таблиця 2.1 – Статистичний ряд**

| Інтервал | Довжина інтервалу     | Середина інтервалу<br>$x_i^* = (x_{i-1} + x_i)/2$ | Число точок в інтервалі<br>$n_i$ | Відносна частота потрапляння випадкової величини в $i$ -й інтервал |
|----------|-----------------------|---|----------------------------------|--|
| 1        | $(x_{\min}; x_1)$     | $x_1^*$   | $n_1$                            | $p_1^*$  |
| 2        | $(x_1; x_2)$          | $x_2^*$   | $n_2$                            | $p_2^*$  |
| ...      | ...                   | ...   | ...                              | ...  |
| $i$      | $(x_{i-1}; x_i)$      | $x_i^*$   | $n_i$                            | $p_i^*$  |
| ...      | ...                   | ...   | ...                              | ...  |
| $k$      | $(x_{k-1}; x_{\max})$ | $x_k^*$   | $n_k$                            | $p_k^*$  |
| $\Sigma$ |                       |   | $n$                              | 1  |



**Рис. 2.7 – Гістограма розподілу**



**Рис. 2.8 – Графік функції  $F_n(x)$ , побудований за згрупованими даними**

Величина інтервалу групи істотно впливає на вид гістограми. При малій їх ширині в кожен інтервал потрапляє незначне число спостережень або навіть не потрапляє жодного, в результаті гістограма стає

сильно «порізаною» і погано передає основні особливості досліджуваного розподілу. При занадто великих інтервалах групи, також скрадаються характерні риси групи.

Інша форма графічного представлення групування даних – полігон частот. **Полігон частот** є ламаною лінією, що сполучає точки з абсцисами, рівними серединам інтервалів угруповання, і ординатами, рівними відповідним частотам.

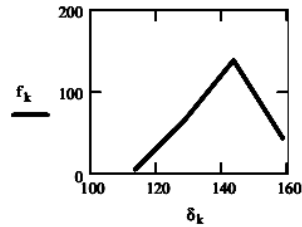
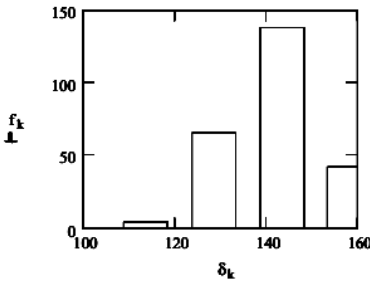
Приклад робочого документа Mathcad, де знаходяться гістограми та полігони частот.

$$mx:=4$$

$$\Delta := \frac{\text{razmax}}{mx} \quad \Delta = 14.873$$

$$j:=0..mx \quad k:=0..mx-1$$

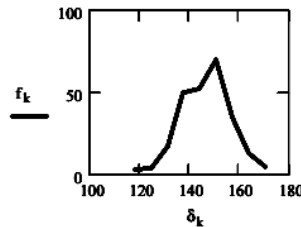
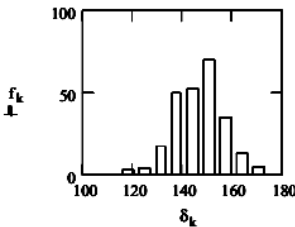
$$\delta_j := v_{\min} + \frac{\Delta}{2} \times (2 \times j - 1) \quad f := \text{hist}(\delta, v)$$



$$my:=9 \quad \Delta := \frac{\text{razmax}}{my} \quad \Delta = 6.61$$

$$j:=0..my \quad k:=0..my-1$$

$$\delta_j := v_{\min} + \frac{\Delta}{2} \times (2 \times j - 1) \quad f := \text{hist}(\delta, v)$$



Для того щоб побудувати полігон частот необхідно скопіювати гістограму і виділити на ній вісь ординат. Подвійним клацанням по цій осі відкривається діалогове вікно (рис. 2.9) на вкладці «Сліди».



Далі необхідно змінити властивості підпису «trace1», зокрема вказати тип «lines».

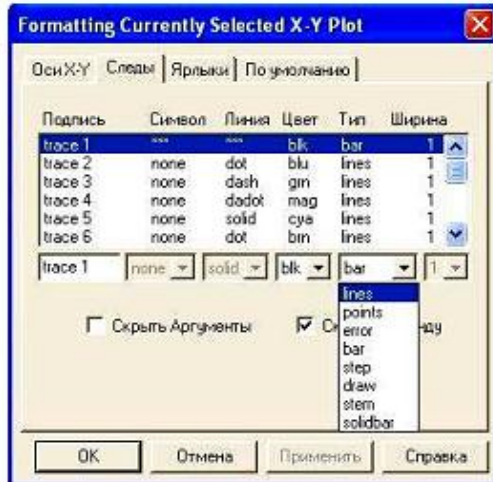


Рис. 2.9 – Перетворення графічного зображення гистограми в полігон частот

#### 2.6.4. Характеристики теоретичного та емпіричного розподілу випадкової величини

На практиці випадкову величину часто визначають за допомогою **числових характеристик** – чисел (речових), що виражають характерні особливості випадкової величини, званих моментами випадкової величини.

Початковий момент  $k$ -го порядку визначається за наступними формулами:

– для дискретної випадкової величини: 
$$m_k = \sum_{i=1}^n x_i^k p_i, k = 1, 2, \dots;$$

– для неперервної випадкової величини: 
$$m_k = \int_{-\infty}^{\infty} x^k f(x) dx.$$

При  $k = 1$  початковий момент називається **математичним очікуванням** (середнім значенням) випадкової величини. Математичне очікування позначають  $M[X]$ ,  $m_x$ ,  $t$  і для:

– дискретних випадкових величин: 
$$m_1 = M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i;$$

– неперервних випадкових величин:  $m_x = M[X] = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$ .

Частіше, ніж початкові моменти, застосовуються **центральні моменти**. Центральний момент  $k$ -го порядку визначається формулою:

– для дискретної випадкової величини:  $\mu_k = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^k p_i$ ;

– для неперервної випадкової величини:

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^k f(x)dx.$$

Перший центральний момент завжди дорівнює нулю,  $\mu_1 = 0$ . Другий центральний момент називається **дисперсією**. Дисперсією випадкової величини називається математичне очікування квадрата відхилення випадкової величини від її математичного очікування:

$$D[X] = M[(X - m_x)^2]. \quad (2.33)$$

– для дискретної випадкової величини:

$$D[X] = \mu_2 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i$$

– безперервної  $D[X] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x)dx$ .

Дисперсію ще позначають так  $D_x, \sigma_x^2, \sigma^2$ .

Середнє квадратичне відхилення (або стандарт) пов'язане з дисперсією:  $\sigma_x = \sqrt{D[X]} = \sqrt{\mu_2}$ .

**Коефіцієнт асиметрії** (рис. 2.10):

$$\gamma_1 = \mu_3 / \sigma_x^3, \text{ де } \mu_3 = m_3 - 3m_1m_2 + 2m_1^3.$$

**Коефіцієнт ексцесу** (рис. 2.10):

$$\gamma_2 = (\mu_4 / \sigma_x^4) - 3, \text{ де } \mu_4 = m_4 - 4m_1m_3 + 6m_1^2m_2 - 3m_1^4.$$

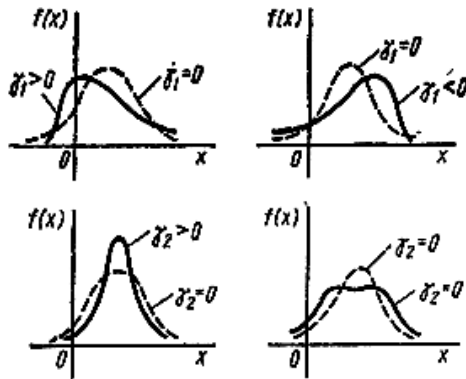


Рис. 2.10 – Щільність розподілів з ненульовими коефіцієнтами асиметрії і ексцесу

Якщо у випадкової величини  $X$  існують перший і другий моменти, то можна побудувати нормовану випадкову величину:

$$X_0 = (X - m_x) / \sigma_x.$$

Для *нормованої випадкової величини*  $M[X_0] = 0, D[X_0] = 1$ .

Друга група параметрів характеризує окремі значення функції розподілу. До них відносяться *квантили*. *Квантилем*  $x_p$  *розподілу випадкової величини*  $X$  *з функцією розподілу*  $F(x)$  *називається розв'язування рівняння*  $F(x_p) = p$ . Найбільш важливе значення має квантиль  $x_{0,5}$  званий *медіаною розподілу* (рис. 2.11). Ордината медіани розсікає площу між кривою щільності ймовірності і віссю абсцис навпіл.

*Розмахом*  $R$  або широтою розподілу користуються як мірою розсіювання в емпіричних розподілах при малому числі спостережень (менше 10):  $R = x_{\max} - x_{\min}$ .

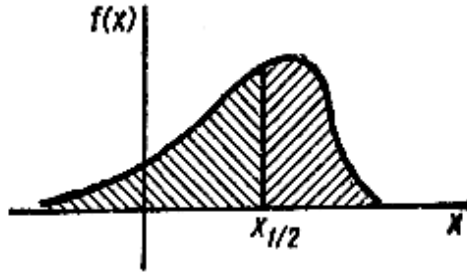


Рис. 2.11 – Медіана розподілу

У статистиці найчастіше використовують математичне очікування (характеристику становища значень випадкової величини на числовій осі) і дисперсію (або середнє квадратичне відхилення), яка визначає характер розкиду значень випадкової величини.

**Приклад 2.2.** Обчислити вибіркоче середнє, медіану, вибіркочу дисперсію, стандартне відхилення, вибіркочий ексцес і коефіцієнт асиметрії. Подалі наведений фрагмент робочого документа Mathcad, що містить необхідні обчислення:

$$\begin{aligned} \text{mean} &:= \text{mean}(\xi) \quad s2 := \frac{n}{n-1} \cdot \text{var}(\xi) \quad \sigma := \sqrt{s2} \quad \text{mean} = 149.849 \quad s2 = 98.174 \\ \sigma &= 9.908 \quad \mu3 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\xi_i - \text{mean})^3 \quad \mu4 := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\xi_i - \text{mean})^4 \quad \text{median} := \\ &= \text{median}(\xi) \quad E := \frac{\mu4}{s2^2} - 3 \quad \alpha := \frac{\mu3}{\sigma^3} \quad \text{median} = 150.69 \quad E = 0.136 \quad \alpha = -0.055. \end{aligned}$$

### 3 Електричні вимірювання неелектричних величин

Однією з найбільш прогресивних областей експериментальної вимірювальної техніки (технологій) є електричні вимірювання неелектричних величин [4]. З іншого боку, розвиток науки і техніки на сучасному етапі неможливий без використання електричних вимірювань неелектричних величин. Ці вимірювання потрібні при проведенні досліджень, розробці, експериментальній перевірці, контролі якості продукції і автоматизації.

Електричні вимірювання неелектричних величин полягають у перетворенні цих величин в електричні з використанням різних фізичних явищ.

В таблиці 3.1 наведено приклади неелектричних величин для демонстрації їх максимальних  $x_{\max}$  і мінімальних  $x_{\min}$  значень, що можуть бути виміряні.

**Таблиця 3.1 – Приклад неелектричних величин**

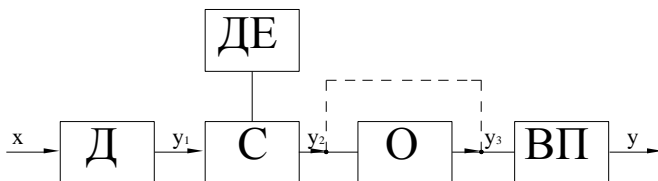
| Величина                                 | $x_{\min}$          | $x_{\max}$     |
|--|---------------------|----------------|
| Видовження $\varepsilon$ , мкм/м         | $10^{-2}$           | $10^4$         |
| Відстань $S$ , м                         | $10^{-6}$           | 10             |
| Кут повороту $\alpha$ , град             | $360 \cdot 10^{-6}$ | 360            |
| Частота обертання $n$ , хв <sup>-1</sup> | $4 \cdot 10^{-2}$   | $4 \cdot 10^5$ |
| Прискорення $a$ , м/с <sup>2</sup>       | $10^{-5}$           | $10^6$         |
| Сила $F$ , Н                             | $2 \cdot 10^{-5}$   | $10^6$         |
| Тиск $P$ , Па                            | 1                   | $10^9$         |
| Час $T$ , с                              | $10^{-10}$          | $10^9$         |
| Температура $T$ , К                      | $10^{-6}$           | $10^{12}$      |

Максимальне значення відповідає найбільшому значенню, яке може бути потрібним, мінімальне – найменшому, яке ще можна виміряти.

Визначені за даними таблиці відношення  $x_{\max} / x_{\min}$  досягають значення  $10^6$ – $10^{19}$ . Забезпечити вимірювання однієї величини в усьому діапазоні одним універсальним приладом практично неможливо і економічно недоцільно.

Різні вимірювальні системи і методи вимірювання потрібні не тільки для різних величин, але і для діапазонів їх вимірювання. Тому для оптимального вибору і правильного використання вимірювальних пристроїв необхідно мати загальні представлення про елементи вимірювання неелектричних величин.

**Вимірювальні ланцюги.** На рис. 3.1 зображена принципова структурна схема для елементарного вимірювання неелектричних величин. Вимірювальний ланцюг складається з таких елементів, як датчик Д, система чи пристрій погодження С, числовий реєстратор (пристрій для числової обробки) О, вихідний пристрій ВП.



**Рис. 3.1 – Структура пристрою для електричних вимірювань неелектричних величин:** Д – датчик (наприклад, датчик сили); С – система погодження (наприклад, підсилювач електричного сигналу); О – пристрій для фіксації і обробки даних (наприклад, осцилограф, процесор, ЕОМ); ВП – вихідний пристрій (наприклад, самописець, шлейфовий осцилограф); ДЕ – джерело енергії (наприклад, генератор струму);  $x$  – вхідна вимірювальна величина;  $y$  – вихідна величина

Чутливий елемент (зонд, вимірювальний елемент) представляє собою спеціальний перетворювач неелектричної величини в електричну, ввімкнений до вимірювального ланцюга.

Датчик включає в себе чутливий елемент і всі інші елементи, необхідні для перетворення фізичної величини в електричну. В деяких випадках чутливий елемент є датчиком, наприклад, тензорезистор, термоелемент.

При перетворенні неелектричної величини в електричну використовують два принципи: вплив на електричні параметри (пасивні чутливі елементи) і генерування електричного сигналу (активні чутливі елементи).

### 3.1. Резисторні чутливі елементи і датчики

Чутливим елементом у цьому випадку є резистор, опір якого при температурі  $20^{\circ}\text{C}$  вираховується за виразом [12, 13]:

$$R = \rho l / S = l / \sigma S, \quad (3.1)$$

де  $l$  – довжина провідника;  $S$  – переріз провідника;  $\rho$  – питома електрична провідність при вказаній температурі.

При температурі  $T$ , що відрізняється від температури  $20^\circ \text{C}$ , опір визначається з виразу:

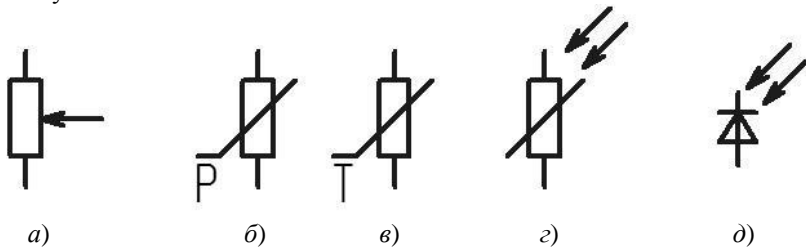
$$R = R_{20}[1 + \alpha(T - 20^\circ \text{C})], \quad (3.2)$$

де  $R_{20}$  – опір при температурі  $20^\circ \text{C}$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору.

При безпосередній фізичній дії на резисторний чутливий елемент можна змінити його опір за рахунок механічної сили (зміна довжини  $l$  або перерізу  $S$ ), температури  $T$  або оптичного випромінювання (вплив на питому електричну провідність  $\rho$ ). Зміну опору чутливого елемента можна виміряти різними способами.

### 3.1.1. Види резисторних чутливих елементів

На рис. 3.1 зображено умовні графічні позначення резисторних чутливих елементів.



**Рис. 3.2 – Позначення резисторних чутливих елементів:**

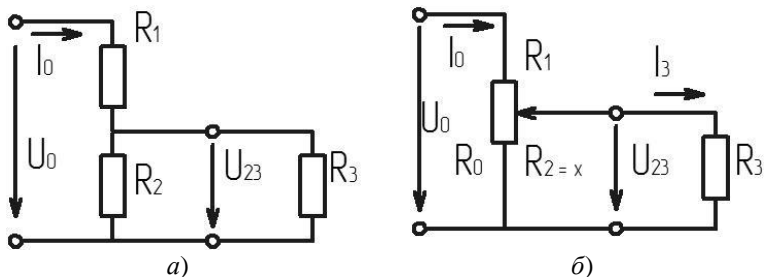
*a* – датчик переміщення або кута повороту; *b* – резисторний тензодатчик; *в* – терморезистор, *г* – фоторезистор, *д* – фотодіод

Аналогові резисторні чутливі елементи виготовляють з провідників, напівпровідників або провідникових рідин. Вони мають опір від 1 до  $10^6$  Ом.

Цифрові датчики представляють собою комутатори, наприклад механічні, тиристори, транзистори, що керуються електричними сигналами, або фотоелектричні пристрої, що керуються світлом, при цьому їх опір змінюється від нуля до нескінченності.

### 3.1.2. Схеми вимірювання з подільниками напруги

В схемах з подільниками напруги (рис. 3.3) опір  $R_0$  приєднується до джерела живлення. Сигнал вимірювання знімається з нижнього плеча або рухомого контакту подільника. При послідовному з'єднанні плечей подільника сигнал, що знімається з нього, пропорційний опорі  $R_{23}$ .



**Рис. 3.3** – Навантажені подільники напруги з опором  $R_1$  і  $R_2$  (а), з рухомими контактами (б)

Напруга, що знімається з подільника:

$$U_{23} = U_0 R_{23} / (R_1 + R_{23}), \quad (3.3)$$

де

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{(R_2 + R_3)}. \quad (3.4)$$

Для навантаженого подільника (рис. 3.3, а):

$$\frac{U_{23}}{U_0} = \frac{R_2 R_3 / (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 R_3 / (R_2 + R_3)}. \quad (3.5)$$

В ненавантаженому подільнику  $R_0 = R_1 + R_2$  та  $R_3 = \infty$ , тому  $U_2 / U_0 = R_2 / R_0$ .

В лінійному подільнику з опором  $R_0$  і напругою живлення  $U_0$  (рис. 3.3, б) віддаль рухомого контакту до кінця резистора  $x$  у відносних одиницях змінюється від 0 до 1. Визначимо відношення напруги  $U_{23} / U_0$  залежно від  $x$ :

$$\frac{U_{23}}{U_0} = \frac{R_2}{R_1 [R_2 R_3 + 1] + R_2}. \quad (3.6)$$

Залежність напруги  $U_{23}$  від  $R_2$  нелінійна.

При  $R_2 = x R_0$  та  $R_1 = (1 - x) R_0$  одержимо:

$$\frac{U_{23}}{U_0} = \frac{x}{1 + (x - x^2) R_0 / R_3}. \quad (3.7)$$



Ввівши коефіцієнт навантаження  $c = R_3 / R_0$ , можна записати:

$$\frac{U_{23}}{U_0} = \frac{cx}{c + x - x^2}. \quad (3.8)$$

Відхилення  $U_{23}/U_0$  навантаженого подільника від  $U_2/U_0$  ненавантаженого, або відносна похибка напруги:

$$\Delta U = \frac{U_{23}}{U_0} - \frac{U_2}{U_0} = \frac{cx}{c + x - x^2} - x = \frac{x^3 - x^2}{c + x - x^2}. \quad (3.9)$$

Мала відносна похибка (практично лінійна характеристика) досягається за умови  $R_3 \gg R_0$  ( $I_3 \ll I_0$ ).

Як правило, в ланцюгах вимірювання дотримується умова  $R_3 \geq 100R_0$  (відповідно  $I_0 \geq 100I_3$ ), а відносна похибка напруги не перевищує 0,15 %. При виборі параметрів подільника напруги, призначеного для проведення експериментів, як правило, достатньо взяти  $R_3 \geq 10R_0$ , при цьому похибка повинна бути меншою 1,5%.

### 3.1.3. Мостові схеми

Для спрощення розрахунку вимірювальних мостових схем використовують наступні припущення. Рахують, що внутрішній опір джерела живлення постійної напруги (рис. 3.4) суттєво малий ( $R_i = 0$ ).

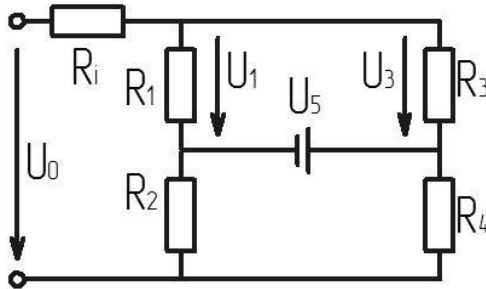


Рис. 3.4 – Мостова схема:  $U_0$  – напруга живлення;  $R_i$  – внутрішній опір джерела живлення;  $R_1 - R_4$  – опори плечей моста;  $R_5$  – опір діагоналі

Опір резистора в діагоналі моста  $R_5$  набагато більший опорів інших резисторів моста  $R_1 - R_4$ , тобто можна прийняти, що  $R_5 \approx \infty$ .

За таких припущень кожна зі сторін моста  $R_1 - R_2$  і  $R_3 - R_4$  представляє собою ненавантажені подільники напруги загального джерела живлення.

**Умова рівноваги.** Рівновага моста (при  $U_5 = 0$ ) описується відомим співвідношенням:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3, \quad (3.10)$$

або

$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4. \quad (3.11)$$

Мости з обмежувачими резисторами. Для зменшення області регулювання міст виконують з обмежувачими резисторами  $R_{E3}$  і  $R_{E4}$  (рис. 3.5, а), ввімкненими послідовно з датчиком опору  $R$ . Визначивши відстань рухомого контакту  $x$  від середини датчика одержуємо опори плечей моста:

$$R_3 = R_{E3} + R(1+x)/2 \quad (3.12)$$

і

$$R_4 = R_{E4} + R(1-x)/2. \quad (3.13)$$

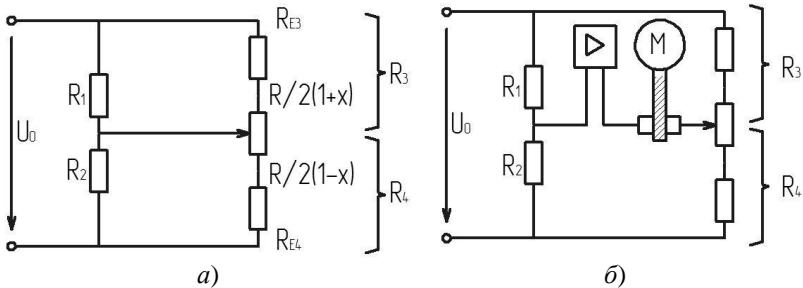


Рис. 3.5 – Схеми мостів з ручним (а) і автоматичним (б) врівноваженням

Діапазон зміни опору  $R_1$  лежить в межах від  $R_{1\min}$  до  $R_{1\max}$ .

При  $x = +1$  одержуємо  $R_{1\max}$ :

$$R_{1\max} = R_2(R_{E3} + R) / R_{E4}, \quad (3.14)$$

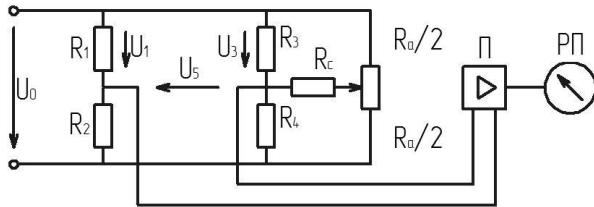
а при  $x = -1$  одержуємо  $R_{1\min}$ :

$$R_{1\min} = R_2 R_{E3} / (R_{E4} + R). \quad (3.15)$$

При цьому способі врівноваження проводиться вручну. Він підходить до вимірювання статичних величин.

Автоматичні мости. При розбалансуванні моста (рис. 3.5, б) напруга діагоналі  $U_5$  через підсилювач діє на зрівноважувальний двигун  $M$  до тих пір, коли положення контакту резистора  $R$  не стане таким, щоб  $U_5 = 0$ . Такі автоматичні мости придатні для вимірювання статичних і квазістатичних процесів.

Мостова схема з вимірюванням напруги діагоналі. Для вимірювання малих змін опору часто використовують мостову схему (рис. 3.5) з реєстрацією діагональної напруги приладом РП. Для попередження частого регулювання опорів моста  $R_1 - R_4$  схема доповнена зрівноважувальними резисторами  $R_a$  і  $R_c$ . При напрузі діагоналі, що дорівнює, наприклад,  $\pm 1\%$  напруги джерела живлення обирають  $R_c \geq 25R$ , при цьому  $R = R_3 = R_4$ . Для лінійного балансування повинна виконуватися умова  $R_a \ll R_c$ .



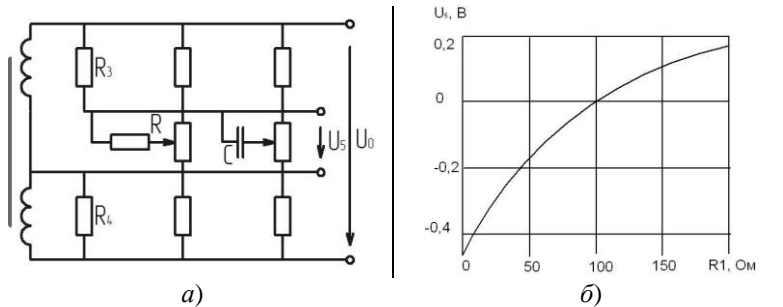
**Рис. 3.6 – Схема моста з вимірюванням напруги діагоналі за допомогою підсилювача П і реєстраційного приладу РП**

Перевагою такої схеми з балансуєчим ланцюгом є те, що зміна опору в контактах зрівноважувального резистора практично не впливає на діагональну напругу. Однак, схема має недоліки: знижується чутливість за рахунок шунтування резисторів  $R_3$  і  $R_4$ , і крім того на чутливість впливає опір провідників, що з'єднують міст з компенсувальними резисторами.

Міст зі змінним опором одного плеча. Розрахуємо напругу діагоналі  $U_5$  моста без врахування зрівноважувальних резисторів (рис. 3.7, а).

При вимірюванні фізичної величини внаслідок зміни опорів  $R' = R_1 + \Delta R_1$  змінюється падіння напруги на опорі і виникає напруга непогодження моста  $U_5$ :

$$U_5 = U_0 \left[ \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right]. \quad (3.16)$$



**Рис. 3.7 – Міст зі змінним опором одного плеча (а)**

**і його характеристиками (б) при  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 100 \text{ Ом}$  і  $U_0 = 1 \text{ В}$**

Для спрощення обрахунків приймаємо, що перед вимірюваннями міст симетричний і зрівноважений, тобто  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ , тоді:

$$U_5 = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} U_0. \quad (3.17)$$

При незначних змінах опору ( $\Delta R \ll R$ ) кінцевий вираз для напруги має вигляд:

$$U_5 \approx \frac{0,25\Delta R}{R} U_0. \quad (3.18)$$

Напруга діагоналі при малих змінах опору приблизно прямопропорційна зміні опору  $\Delta R$ .

При великих змінах  $R_1$  залежність  $U_5(R_1')$  нелінійна (рис. 3.7, б).

### 3.2. Індуктивні чутливі елементи та датчики

Індуктивність дроселя з числом витків котушки  $N$ , магнітною проникливістю  $G$  та відносною магнітною проникливістю матеріалу  $\mu$  осердя довжиною  $l$  і перерізом  $A$  визначається з виразу [14]:

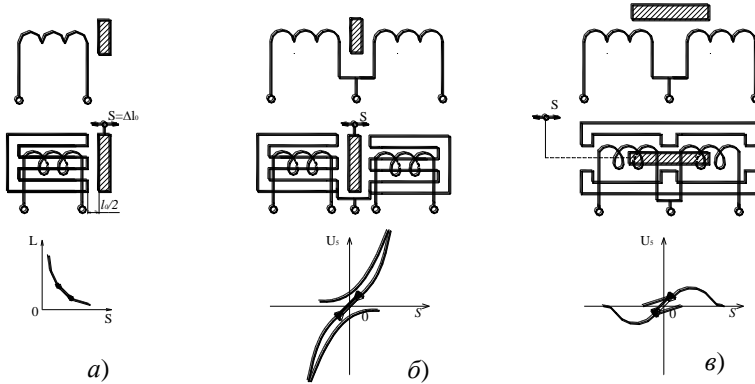
$$L = N^2 G = N^2 \frac{\mu \mu_0 A}{l}, \quad (3.19)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнітна стала.

На значення індуктивності можна впливати зміною перерізу  $A$ , довжини  $l$  магнітного ланцюга (наприклад, в описаних далі датчиках переміщення), відносної проникності, наприклад, в магнітоеластичних датчиках для вимірювання сили.

### 3.2.1. Види індуктивних чутливих елементів

**Дроселі.** На рис. 3.8 схематично представлено будову індуктивних чутливих елементів для вимірювання переміщення  $s$ , а також наведено їх характеристики [14, 15].



**Рис. 3.8 – Індуктивні дросельні датчики з рухомих сердечником (зверху – схеми, всередині – будова, внизу – характеристики): а – найпростіший дросель; б – диференціальний дросель з поперечним осердям; в – диференціальний дросель з повздовжнім осердям;  $s$  – переміщення;  $l_0$  – розмір зазору;  $L$  – індуктивність;  $U_s$  – вихідна напруга моста**

В простіших дроселях залежність індуктивності від розміру повітряного зазору  $l_0$  має гіперболічний характер. Тому для лінеаризації можна використовувати тільки малі зміни  $l_0$  як величини зміни переміщення. Як рухомий елемент використовують феромагнітну або немагнітну провідну пластину, що пронизується магнітним потоком. Якщо при розрахунку індуктивності враховується тільки розмір повітряного зазору  $l_0$  (як правило, магнітний опір осердя значно менший по відношенню до опору повітряного зазору і ним можна знехтувати, тобто  $l/\mu \ll l_0$ ), то  $L \approx N^2 \mu_0 A (l_0 \pm \Delta l_0) = L \pm \Delta L$ .

Вимірювання індуктивності проводиться за допомогою або моста з несучою частотою, або високочастотного коливального контуру.

Елементарні дроселі в схемах з несучою частотою 5 або 50 кГц мають індуктивність 5 або 0,5 мГн, індуктивний опір  $x_L = 157$  Ом і активний опір 20–200 або 2–20 Ом. Вони використовуються як безконтактні датчики переміщення.

В **диференціальних** дроселях з поперечним (рис. 3.8, б) або повздовжнім (рис. 3.8, в) розміщенням осердя діагональна напруга

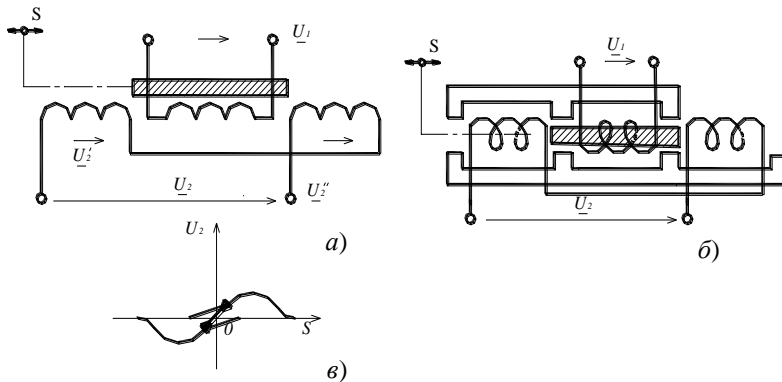
$U_5 = 0$ , якщо осердя перед початком вимірювання знаходиться в середньому положенні. При зміщенні в осьовому напрямі виникає напруга  $U_5$  обумовлена несиметричністю датчика. В дроселі з повздовжнім осердям напруга  $U_5$  спочатку досягає максимуму, а потім падає до нуля. Враховуючи це на практиці використовують лінійну ділянку характеристики  $U_5 = f(s)$ .

**Диференційні** дроселі з поперечним осердям мають номінальне переміщення  $s_N$  від 20 мкм до 1 мм. Дроселі з повздовжнім переміщенням осердя мають  $s_N$  від 1 до 500 мм, при цьому номінальне переміщення складає приблизно 0,8 довжини котушки, яка дорівнює довжині осердя.

Диференційні дроселі використовуються як датчики переміщення, що жорстко зв'язані з об'єктом вимірювання, а дроселі з вигнутими осердями – для вимірювання кута повороту  $\alpha$  до  $90^\circ$ .

### 3.2.2. Трансформаторні чутливі елементи

**Диференційні трансформатори.** Датчики переміщення, що наведені на рис. 3.9, вмикають первинну обмотку, до якої підведена напруга  $U_1$  і дві зустрічно ввімкнуті вторинні, з однаковими або різними індуктивними напругами  $U_2'$  і  $U_2''$ . Вторинна напруга  $U_2 = U_2' - U_2''$  подається на вхід схеми погодження.

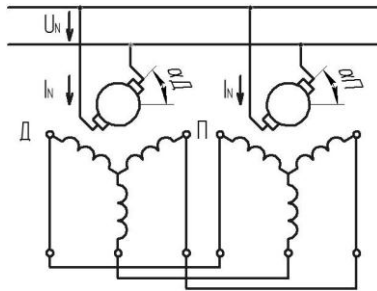


**Рис. 3.9 – Диференційний трансформатор – індуктивний датчик:**  
 а – схема; б – будова датчика; в – характеристика;  
 $U_1, U_2$  – первина і вторинна напруги відповідно

Первинна і вторинна обмотки можуть бути ввімкнуті узгоджено або зустрічно.

Диференційні трансформатори при відповідному виконанні осердя і первинної обмотки практично не впливають на рухомий елемент датчика.

**Сельсини** – різновидності електричних машин, схема з’єднання яких показана на рис. 3.10. Сельсин вмикає ротор з однофазною обмоткою, що живиться джерелом напруги  $U_N$ , і статор з багатозазною, частіше всього трифазною, обмоткою [14].



**Рис. 3.10** – Схема індуктивного дистанційного датчика-сельсина:  
**Д** – передатчик (генератор); **П** – приймач (двигун);  
 $U_N$  – напруга збудження;  $\alpha_D, \alpha_P$  – кути повороту

При напрузі збудження  $U_N = 24\text{--}50$  В, частотою  $f_N = 50\text{--}400$  Гц, що подається на контактні кільця, в обмотках датчика і приймача тече синусоїдальний струм збудження  $I_N$ , що створює магнітні потоки, які індукують в обмотках статорів співпадаючі за фазою напруження, амплітуда яких залежить від синуса кута між осями датчика і приймача  $\sin \alpha$ . При однакових кутах датчика і приймача  $\alpha_D = \alpha_P$  встановлюється рівність напруг статорів. При повороті ротора датчика повертається ротор приймача (або декілька з’єднаних паралельно приймачів) під дією моментів, викликаних зрівноважувальними струмами.

Кут повороту ротора датчика може перевищувати  $360^\circ$ , і ротор приймача буде слідувати за ним з малим кутовим відхиленням, приблизно  $\pm 0,1^\circ$ . Сельсини мають потужність від 10 до 50 Вт при обертовому моменті 0,01–0,1 Н·м.

Сельсини використовують для вимірювань, а саме дистанційних, кута повороту  $0 \leq \alpha \leq 360^\circ$ , моменту оберту, а також як керуюча ланка при передачі на віддалі сигналу управління.

### 3.2.3. Мости змінного струму для вимірювань індуктивності

В мості змінного струму, зображеному на рис. 3.11, передбачається, що напруга живлення  $U_0$  підтримується сталою, джерело напруги живлення має внутрішній опір  $R_i = 0$ , а опір діагонального резистора  $R_5 = \infty$ . Визначимо напругу діагоналі  $U_5$ .

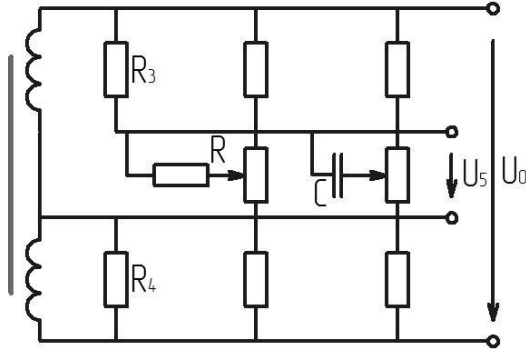


Рис. 3.11 – Міст з диференціальним дроселем – з котушками  $Z_1$  і  $Z_2$  та елементами  $R$  або  $C$  для зрівноваження напруги діагоналі

Перед початком вимірювань осердя, датчик  $Z_{12}$  займає симетричне положення і значення напруги діагоналі зрівноважене ( $U_5 = 0$ ) включенням опору  $R$ , а його фаза – елементом  $C$  (рис. 3.11).

При вимірюваннях одночасно змінюються  $Z_1$  і  $Z_2$ , наприклад:

$$Z'_1 = Z_1 + \Delta Z_1 \quad (3.20)$$

і

$$Z'_2 = Z_2 + \Delta Z_2. \quad (3.21)$$

В цьому випадку:

$$U_5 = \left( \frac{L + \Delta L}{2L} - \frac{1}{2} \right) U_0 = \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} U_0. \quad (3.22)$$

### 3.3. Ємнісні чутливі елементи і датчики

Ємність плоского конденсатора [18]:

$$C = \epsilon \epsilon_0 A / d, \quad (3.23)$$

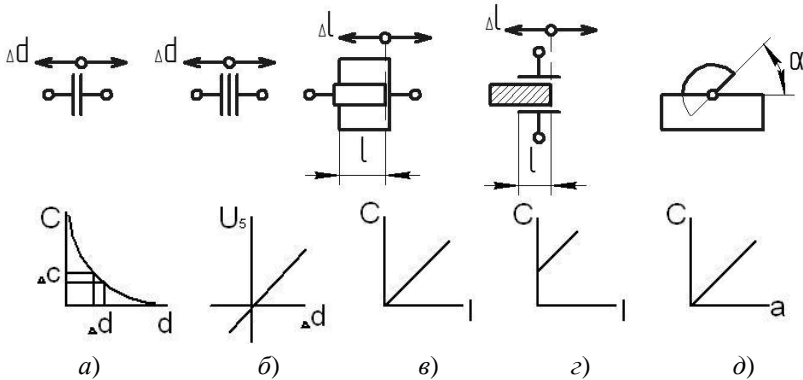


де  $A$  – площа електродів;  $d$  – віддаль між електродами;  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність;  $\varepsilon_0 = 0,088542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична стала (діелектрична проникність вакууму).

Фізичними діями можна впливати на значення  $\varepsilon$ ,  $A$ ,  $d$  відповідно при змінах заповнення об'єму, кута повороту і тиску.

### 3.3.1. Конструкції ємнісних чутливих елементів

На рис. 3.12 наведені конструкції ємнісних датчиків та їх характеристики [14, 18].



**Рис. 3.12 – Ємнісні чутливі елементи та їх характеристики:**  
***a*** – плоский конденсатор з переміщенням обкладки на  $\Delta d$  (зміна віддалі  $d$ );  
***б*** – те саме, диференціальний; ***в*** – циліндричний конденсатор з повздовжнім переміщенням на  $\Delta l$ ; ***г*** – багатошаровий конденсатор з повздовжнім переміщенням на  $\Delta l$ ; ***д*** – конденсатор з поворотними обкладками (зміна площі  $A$  залежно від кута повороту  $\alpha$ )

Простий плоский конденсатор (рис. 3.12, *a*). При вимірюваннях фіксується зміна ємності  $C = \varepsilon\varepsilon_0 A / (d + \Delta d)$ :

$$\Delta C = C' - C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{d - \Delta d} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{d} \left( \frac{-\delta}{1 + \delta} \right), \quad (3.24)$$

$$\text{де } \delta = \frac{\Delta d}{d}.$$

З одержаного виразу знаходимо значення відносної зміни ємності:

$$\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\delta}{1 + \delta} = -\frac{\Delta d}{d + \Delta d} = -\frac{\Delta d / d}{1 + \Delta d / d}. \quad (3.25)$$

Чутливість ємнісного датчика переміщення:

$$S_d = \Delta C / \Delta d \neq \text{const.} \quad (3.26)$$

В області малих переміщень  $\Delta d \ll d$  характеристика:

$$\Delta C / C \approx -\Delta d / d \quad (3.27)$$

наближено може бути прийнята лінійною.

Диференціальний конденсатор (див. рис. 3.12, б) з мостом змінного струму має лінійну характеристику і використовується в чутливих датчиках тиску.

Датчик з площами електродів, що змінюються використовується при вимірюванні лінійних переміщень, які викликають зміну ємності, наприклад, циліндричного конденсатора (див. рис. 3.12, в). Характеристика такого або плоского конденсатора з рухомих ізолятором (див. рис. 3.12, з) лінійна:

$$\Delta C / C = (1 + \Delta l) / l. \quad (3.28)$$

Для вимірювання кута повороту використовують конденсатор (див. рис. 3.12, д), при цьому відповідним вибором форми рухомого електрода може бути забезпечена лінійна залежність ємності від кута повороту  $\alpha$ :  $C = C_0 + k\alpha$ .

### 3.3.2. Вимірювальні схеми з ємнісними чутливими елементами

*Схеми з амплітудною модуляцією.* В цих схемах статичні і

динамічні вимірювання ємності датчика  $C$  та її зміни  $\Delta C$  проводяться за допомогою моста змінного струму (рис. 3.13).

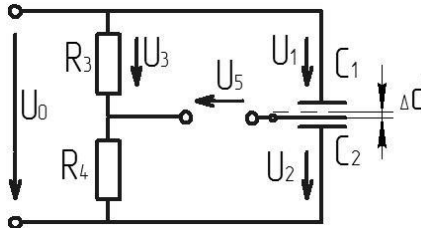


Рис. 3.13 – Диференціальний конденсатор в схемі CRRR-моста з вимірюванням напруги діагоналі

Міст живиться змінною напругою  $U_0$ , на виході напруга моста  $U_5$  є амплітудно-модульованим сигналом.

Визначимо напругу діагоналі для  $CCRR$ -моста, показаного на рис. 3.13. Нехай міст симетричний:  $C_1 = C_2 = C$ , а  $R_3 = R_4 = R$ .

При вимірюваннях переміщується середній електрод датчика на величину  $\Delta d$ , при цьому  $d'_1 = d - \Delta d$ ;  $C_1 = C + \Delta C$ ;  $C_2 = C - \Delta C$ .

Тоді при  $U_3 = U_0 R / (R + R) = U_0 / 2$  та

$$U_1 = \frac{\frac{1}{j\omega C_1'}}{\frac{1}{j\omega C_1'} + \frac{1}{j\omega C_2'}} U_0 = \frac{\frac{1}{C + \Delta C}}{\frac{1}{C + \Delta C} + \frac{1}{C - \Delta C}} U_0 \quad (3.29)$$

напруга діагоналі дорівнює:

$$U_5 = \left( \frac{C - \Delta C}{2C} - \frac{1}{2} \right) U_0 = -\frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C} U_0. \quad (3.30)$$

Напруга діагоналі лінійно залежить від  $\Delta C / C$ .

$CCRR$ -мости мають напругу живлення підвищеної частоти (до 1 МГц, наприклад 465 кГц) для того, щоб активний опір конденсатора  $x_c = 1/\omega C$  датчика в порівнянні з відносно малою ємністю  $C$  був достатньо малим.

Дільники напруги, що складаються з послідовно з'єднаними конденсатором  $C$  і резистором  $R$ , які живляться від джерела постійного струму, використовуються лише при вимірюванні швидкоплинних процесів. Така схема використовується для конденсаторних мікрофонів.

### 3.4. Активні електродинамічні датчики

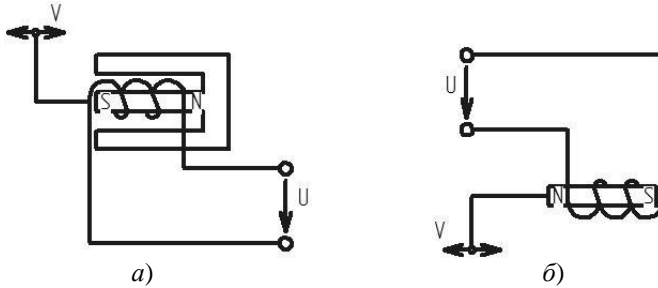
В чутливих елементах, що працюють за генераторним принципу, індукується напруга в провідниках, які перетинають силові лінії магнітного поля [14]. Це напруга  $u = Nd\Phi/dt$ , де  $N$  – число провідників;  $\Phi$  – магнітний потік. Залежно від принципу дії датчика ця напруга може дорівнювати:

$$u = NlBv,$$

де  $l$  – довжина провідника;  $B$  – індукція магнітного поля;  $v$  – швидкість руху провідника поперек поля.

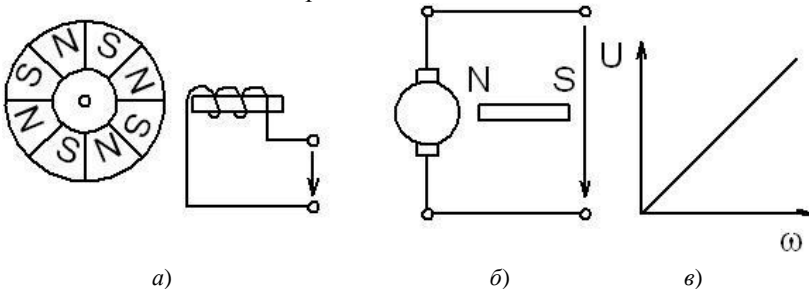
При постійному числі витків котушки, довжині провідника і індукції напруга прямопропорційна швидкості переміщення провідника  $v$  або кутовій швидкості при обертанні.

На рис. 3.14 зображено принципове влаштування електродинамічних датчиків для вимірювання швидкості переміщення при лінійному русі за допомогою індуктивної напруги  $u$ , пропорційної  $v$ , наприклад, при механічних коливаннях.



**Рис. 3.14** – Електродинамічні датчики з рухомою котушкою (а) та постійним магнітом (б)

В генераторі змінного струму, що показано на рис. 3.15, є нерухоме осердя з обмоткою, а на роторі закріплено постійні магніти. Напруга на виході такого генератора лінійно залежить від частоти обертання (рис. 3.15, в). Такі генератори з числом фаз від одного до чотирьох призначені для вимірювання середніх частот, що створюють звичайно напругу з числом періодів більше 40, а для імпульсних вимірювань – до 1000 на один оберт.



**Рис. 3.15** – Електричні генератори для вимірювання частоти обертання  $n$  при кутовій швидкості  $\omega$ : а – генератор змінного струму з багатополусяною шайбою; б – генератор постійного струму з постійним магнітним збудженням; в – характеристика генератора

Генератори змінного струму використовують для вимірювання з високою точністю частоти обертання  $n$ , кута повороту  $\alpha$  і кутової частоти  $\omega$  в пристроях регулювання, автоматизованих станках і т.д.

### 3.5. П'єзоелектричні чутливі елементи

При механічній дії на п'єзоелектричний кристал в напрямі полярної електричної осі при незначній деформації (декілька мікрометрів) виникає електричний заряд внаслідок зміщення атомів [16]. Повздовжній п'єзоэффект. Якщо сила  $F$  діє в напрямі електричної осі  $x_1$  кристала кварцу  $\text{SiO}_2$ , то за рахунок зближення позитивних іонів кремнію або від'ємних іонів кисню на площинах кристала  $A$ , до яких прикладена сила, виникають електричні заряди  $+Q$  і  $-Q$  (рис. 3.16, *a*). Ненавантажена кристалічна шайба електрично нейтральна.

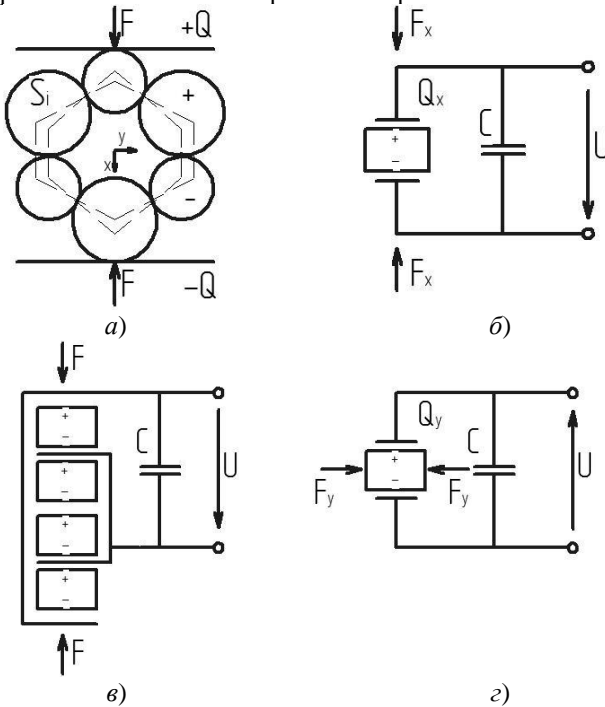


Рис. 3.16 – Схеми формування п'єзоелектричного ефекту: *a* – спрощена структура кристала кварцу; *б* – виникнення повздовжнього п'єзоэффекту внаслідок зміщення іонів під дією сили  $F_x$  у напрямі  $x_1$ ; *в* – датчик з паралельно-послідовним з'єднанням декількох шайб; *г* – виникнення поперечного п'єзоэффекту внаслідок зміщення іонів під дією сили зміщення іонів під дією сили  $F_y$  у напрямі  $y_1$

При простому повздовжньому п'єзоєфекті для пристроїв, показаних на рис. 3.16, *a–в*, виникає заряд:

$$Q_x = nd_{11}F_x, \quad (3.31)$$

де  $n$  – число шайб;  $d_{11}$  – п'єзоелектричний коефіцієнт (модуль);  $F_x$  – сила, що діє у напрямі осі  $x_1$ .

Для одержання більшого заряду окремі шайби розміщують стовпчиком у напрямі дії сили і електрично з'єднують їх паралельно (див. рис. 3.16, *в*).

Простий поперечний п'єзоєфект. При розмірах кристала  $a$  і  $b$  (див. рис. 3.16, *г*) та дії сили  $F_y$  у напрямі  $y_1$  – осі кристала – виникає заряд:

$$Q_y = -d_{11}F_y b / a. \quad (3.32)$$

При зворотному п'єзоєфекті прикладення до кристала електричної напруги викличе механічне напруження і його деформацію.

Як матеріал для п'єзоелектричних датчиків використовується кварц, титан барію, титан-цирконат свинцю.

**Схеми вимірювання.** Відповідно до (див. рис. 3.16, *б*) ємність  $C$  заряджається при появі заряду до напруги:

$$U = Q / C. \quad (3.33)$$

П'єзочастотні чутливі елементи придатні тільки для динамічних вимірювань. Частотний діапазон вимірювань складає  $10^{-5}$ – $10^5$  Гц.

При проведенні експериментальних досліджень першочерговим є правильний вибір датчика для вимірювання тієї чи іншої механічної або фізичної величини [12–14, 16–18].

В таблиці 4.1 знаком “+” показана придатність основних видів датчиків для вимірювання механічних і пов’язаних з ними технічних величин.

**Таблиця 4.1 – Матриця вибору типу датчика залежно від величини, що вимірюється**

| Величина,<br>що вимірюється      | Аналоговий датчик |             |          |                   |                  |                  | Цифровий датчик     |            |                     |
|----------------------------------|-------------------|-------------|----------|-------------------|------------------|------------------|---------------------|------------|---------------------|
|                                  | Пасивний          |             |          | Активний          |                  |                  | частотно-аналоговий | контактний | абсолютно кодований |
|                                  | резисторний       | індукційний | ємнісний | електродинамічний | п’єзоелектричний | термоелектричний |                     |            |                     |
| Розтяг                           | +                 | +           | –        | –                 | –                | –                | –                   | –          | –                   |
| Шлях, кут                        | +                 | +           | +        | –                 | –                | –                | –                   | +          | +                   |
| Швидкість                        | –                 | –           | –        | +                 | –                | –                | –                   | –          | –                   |
| Прискорення                      | +                 | +           | –        | –                 | +                | –                | –                   | –          | –                   |
| Сила                             | +                 | +           | –        | –                 | +                | –                | –                   | –          | –                   |
| Тиск газу                        | +                 | +           | +        | –                 | +                | –                | –                   | –          | –                   |
| Момент обертання                 | +                 | –           | –        | –                 | –                | –                | –                   | +          | –                   |
| Час                              | –                 | –           | –        | –                 | +                | –                | –                   | –          | –                   |
| Температура                      | +                 | –           | –        | –                 | –                | +                | –                   | –          | –                   |
| Характеристики світла            | +                 | –           | –        | –                 | –                | –                | +                   | –          | –                   |
| Характеристики хімічних аналізів | +                 | –           | +        | –                 | –                | +                | +                   | –          | –                   |

#### 4.1. Вимірювання видовжень

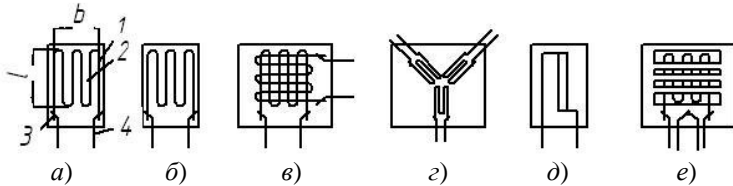
##### 4.1.1. Тензорезистори

Тензорезисторні датчики видовження є пасивними резисторними чутливими елементами і слугують для вимірювання видовження  $+ε$  або  $-ε$  поверхонь деталей, а також інших статичних і механічних

величин, які пропорційні деформації допоміжного пружного елемента, наприклад, прискорення, сили, згинального або обертового моменту, тиску газу або рідини і т.д. [13, 14]. За вказаними вимірювальними величинами можна визначити довільні величини, наприклад, масу, ступінь заповнення резервуару і т.д.

В дротяних і фольгових тензорезисторах використовують константановий дріт діаметром біля 25 мкм або фольгу з високим електричним опором, товщиною приблизно 5 мкм, що розміщена між несучою і захисною пластинами з паперу або пластмаси (акрилова, епоксидна або фенольна смоли чи поліамід) товщиною 25–60 мкм.

На рис. 4.1 зображено основні принципи виконання тензодатчиків: прості тензорезистори з дроту або фольги, торсійні і розеткові датчики, ланцюгові датчики, що складаються з двох–десяти елементів, що розміщені на прямокутному корпусі або на мембрані по колу або спіралі.



**Рис. 4.1 – Основні типи тензодатчиків:**

- a* – простий дротяний тензорезистор; *б* – простий фольговий тензорезистор;
- в* – торсійний датчик; *г* – датчик розеткової конструкції з кутами 0, 60 та 120°;
- д* – напівпровідниковий датчик; *е* – датчик з вільною сіткою та термоелементом *T*; 1 – провід, складений зигзагом;
- 2 – паперова чи пластмасова підкладка; 3 – з’єднання сваркою чи пайкою;
- 4 – з’єднувальні проводи; *l* – активна довжина датчика;
- b* – активна ширина датчика

В напівпровідникових тензорезисторах, напівпровідниковий чутливий елемент складається з кремнієвої стрічки з *n* або *p* провідністю, якій притаманний п’єзоефект, за якого механічне навантаження викликає позитивні або негативні зміни опору, обумовлені зміною рухливості електронів.

Напівпровідниковий тензорезистор (рис. 4.1, *д*) шириною 0,2 мм і товщиною біля 0,02 мм може бути виготовлений на підніжці або може використовуватися без неї. Перевагою напівпровідникових тензорезисторів є їх висока чутливість (табл. 4.2). Однак їх характеристика нелінійна, а чутливість стала тільки у вузькому діапазоні. Величина  $\Delta R/R$  сильно змінюється при зміні видовження і температури. Напівпровідникові тензорезистори мають високу вартість і тому використовуються в особливих випадках.



**Таблиця 4.2 – Характеристики дротяних, фольгових і напівпровідникових тензорезисторів**

| Характеристика                             | Тензорезистор |                    |                    |
|--|---------------|--------------------|--------------------|
|  | металевий     |                    | напівпровідниковий |
|  | дротяний      | фольгові           |                    |
| Номинальний опір, Ом                       | 120, 600      | 120, 300, 350, 600 | 120, 600           |
| Активна довжина, мм                        | 3–150         | 0,6–30             | 1–5                |
| Чутливість                                 | 2             | 2                  | 100–160            |
| Діапазон частот вимірювання<br>$f_m$ , кГц | 0–100         | 0–100              | –                  |
| Допустимий струм, мА                       | 10–40         | 20–40              | 10–20              |
| Найбільша напруга живлення моста, В        | 2–60          | 2–20               | 1–2                |
| Максимальний розтяг, $10^{-2}$ мм          | 0,5–5         | 5–8                | 0,3–0,5            |

Жорстко закріплені тензорезистори – тонка стальна пластина, на яку з допомогою клею кріпиться фольга, а сама пластина приварюється до деталей зі сталі, чавуна, алюмінію і т.д. Цим досягається ідеальне з'єднання тензодатчика з поверхнею, що підвищує точність вимірювання. Можливе і безпосереднє приклеювання тензорезистора до деталі.

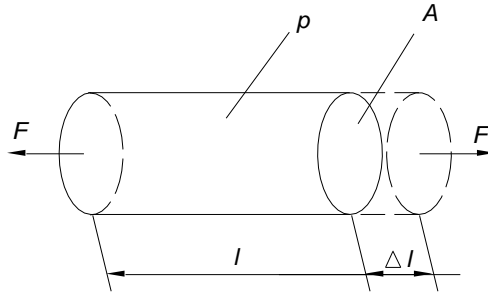
Тензорезистори з вільною сіткою. Ці дротяні або фольгові датчики виготовляються на основі, що видаляється, у вигляді склеєної стрічки зі скловолокна або фторопласта (див. рис. 4.1, е). Вони кріпляться на поверхні деталі розпиленням (за допомогою пальника) оксидом алюмінію. Тензорезистори з вільною сіткою використовують за високих (+200–1000° С) і низьких температур (до –200° С).

Тензодатчик з вільним дротом. Такі дроти закріплюються між чотирма стрижнями на мембрані і використовуються в мостових схемах для вимірювання тиску та різниці тиску.

**Принцип роботи тензорезистора.** Натягнутий дріт тензодатчика, який приклеєний до поверхні, що деформується, розтягується або стискається по всій довжині (рис. 4.2). При цьому виникає позитивна або негативна зміна опору, яка обумовлена змінами як геометричних розмірів, так і його питомого опору внаслідок внутрішньої перебудови матеріалу.

Зміна опору  $R = \rho l / A$  може бути описана повним диференціальним рівнянням:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA. \quad (4.1)$$



**Рис. 4.2 – Вимірювальний датчик-дріт:**

$l$  – довжина;  $\Delta l$  – зміна довжини;  $A$  – поперечний переріз;  $F$  – сила

Для проведення розрахунків за об'ємом дроту, опір  $R$  запишемо у вигляді:

$$R = \frac{\rho l}{A} \times \frac{l}{l} = \frac{\rho l^2}{V} \quad (4.2)$$

тоді

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho + \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial R}{\partial V} \Delta V \quad (4.3)$$

або

$$\Delta R = \frac{l^2}{V} \Delta \rho + \frac{\rho}{V} 2l \Delta l + \frac{\rho l^2}{V^2} \Delta V. \quad (4.4)$$

Для константанових тензодатчиків (сплав: мідь-нікель-марганець) можна прийняти  $\Delta \rho = 0$  ( $\rho = \text{const}$ ) і  $\Delta V = 0$  ( $V = \text{const}$ ). Тоді:

$$\Delta R = \frac{\rho}{V} 2l \Delta l = 2 \frac{\rho l}{V} \Delta l = 2 \frac{\rho l}{A l} \frac{l}{l} \Delta l = 2 \frac{R}{l} \Delta l \quad (4.5)$$

або

$$(\Delta R / R) / (\Delta l / l) = 2, \quad (4.6)$$

де  $S_\varepsilon = (\Delta R / R) / (\Delta l / l)$  – чутливість тензодатчика;  $\varepsilon = \Delta l / l$  – відносний розтяг.

Таким чином чутливість для константанових тензодатчиків приблизно дорівнює два.

Для напівпровідникових датчиків за деформації переважають зміни питомого опору, при цьому ці переваги суттєві. Так, кременеві

датчики з  $p$ -провідністю мають чутливість від +110–130 до +178, а з  $n$ -провідністю – від –80–100 до –138.

Розтяг, що визначається відношенням  $\Delta l / l$ , безрозмірний, але на практиці використовують одиниці величини  $\varepsilon$  :

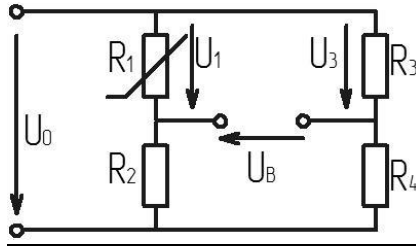
$$\varepsilon_1 = 10^{-3} \text{ м/м} = \text{мм/м}$$

або

$$\varepsilon_1 = 10^{-6} \text{ м/м} = \text{мкм/м}.$$

#### 4.1.2. Схеми вимірювання з тензорезисторами

При вимірюваннях за допомогою тензорезисторів в основному використовують мости опоры (рис. 4.3).



**Рис. 4.3 – Міст з одним датчиком для вимірювання видовження (розтягу)  $\varepsilon$  шляхом реєстрації змін опоры  $R_1$**

При однакових опорях моста  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ , при одному активному датчику вихідна напруга дорівнює:

$$U_B = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} U_0. \quad (4.7)$$

При вимірюванні розтягу  $\varepsilon$  за допомогою такого моста і тензодатчика з чутливістю  $S_\varepsilon = (\Delta R / R) / \varepsilon = 2$  виникає вихідна напруга:

$$U_B = \frac{\varepsilon}{2} U_0. \quad (4.8)$$

В мості з двома активними датчиками, розміщеними в сусідніх плечах, вихідна напруга подвоюється:

$$U_B = \varepsilon U_0, \quad (4.9)$$

або у відносних одиницях:

$$\frac{U_B}{U_0} = \varepsilon. \quad (4.10)$$

В мості з чотирма активними датчиками в кожному плечі при однакових опорах  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  наближено діагональна напруга моста у відносних одиницях дорівнює:

$$U_B / U_0 = [(\Delta R_1 / R_1) - (\Delta R_2 / R_2) - (\Delta R_3 / R_3) + (\Delta R_4 / R_4)] / 4 \quad (4.11)$$

або

$$U_B / U_0 = [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4] S_\varepsilon / 4. \quad (4.12)$$

**Температурні похибки.** Зміна температури деталі з розміщеним на ній датчиком здійснює вплив не тільки на деталь, але і на датчик. Виходячи з того, що на практиці інтерес представляють механічні дії, а не температурні, необхідно знайти спосіб виключити останні.

На практиці вплив температури, як правило, не розраховується, а усувається компенсаційними пристроями.

Однією з найбільш ефективних є температурна компенсація за допомогою вибору схеми вимірювання, в якій активні і пасивні датчики, що взяті з однієї партії, встановлені так, щоб їх температура була однаковою протягом усього експерименту.

***Розміщення датчиків на об'єкті і розподілення їх в схемі.***

Шляхом раціонального розміщення датчиків на об'єкті і включення їх в схему при експериментальних дослідженнях напруги в об'єкті (розтяг) або інших фізичних величин можна досягти компенсації і знищення похибок вимірювання, які викликані впливом температури, вологи, тиску, ядерним випромінюванням і т. д.

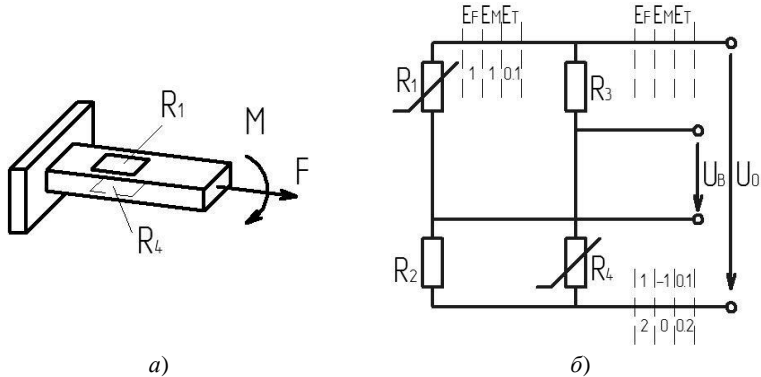
При використанні декількох датчиків з мостовими схемами дотримуються наступного правила.

Напруга діагоналі моста виникає, якщо зміни опору двох сусідніх датчиків при видовженні ( $R_1$  і  $R_2$ ;  $R_1$  і  $R_3$ ;  $R_3$  і  $R_4$ ;  $R_2$  і  $R_4$ ) різного знаку, а діаметрально протилежних ( $R_1$  і  $R_4$ ;  $R_2$  і  $R_3$ ) – одного знаку. Діагональна напруга залишається рівною нулю при однакових деформаціях двох сусідніх датчиків з однаковим знаком або протилежних з різними знаками.

***Приклади закріплення тензодатчиків на пружному стрижні.***

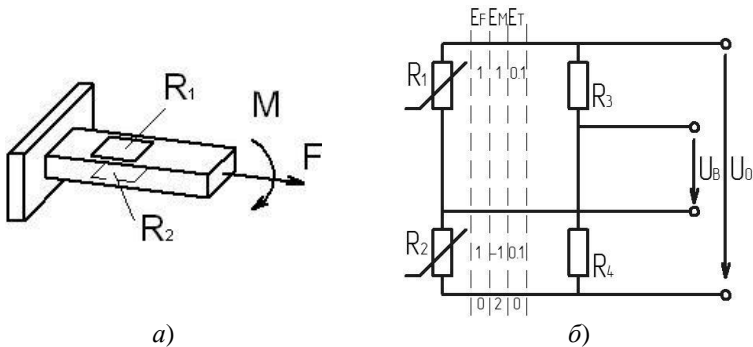
Стрижень з двома тензодатчиками, включеними в сусідні плечі моста. На консольному стрижні на верхній і нижній сторонах знаходяться два

датчики  $R_1$  і  $R_2$  (рис. 4.4, а), підєднані в сусідні плечі моста (рис. 4.4, б). Видно, що цим варіантом вимірюється згинальний момент  $M_M$ , а вплив поздовжніх сил і зміна температури компенсовані.



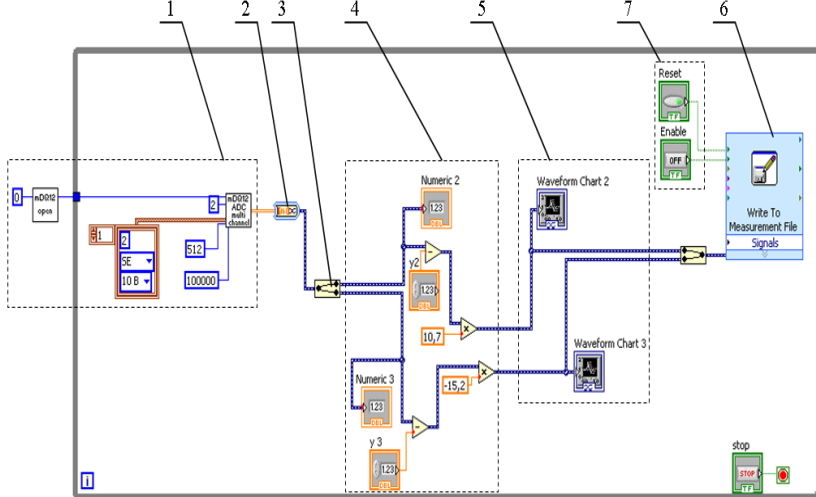
**Рис. 4.4 – Вимірний стрижень з двома тензорезисторами  $R_1$  і  $R_2$  (а), включеними в сусідні плечі моста (б) для вимірювання згинального моменту  $M_M$**

Стрижень з двома тензодатчиками, включеними в протилежні плечі моста. На консольному стрижні на верхній і нижній сторонах знаходяться два датчики  $R_1$  і  $R_4$  (рис. 4.5, а), включені в протилежні плечі моста (рис. 4.5, б). Видно, що цим варіантом вимірюється поздовжня деформація під дією сили  $F$ , а вплив згинального моменту  $M_M$  і зміни температури компенсовані.



**Рис. 4.5 – Вимірний стрижень з двома тензорезисторами  $R_1$  і  $R_4$  (а), включеними в сусідні плечі моста (б) для вимірювання видовження від сили  $F$**

**Приклад 4.1.** Для дослідження зусилля було створено блок-діаграму в програмному середовищі LabVIEW (рис. 4.6). За допомогою цієї блок-діаграми можна отримувати, зберігати, обробляти значення вхідного сигналу з двох каналів, а також виводити на монітор у вигляді графічної залежності під час проведення експерименту. Це є приклад однієї з найпростіших програм, що не потребує складних перетворень.



**Рис. 4.6** – Блок-діаграма програми віртуального приладу для обробки сигналів з двох каналів: **1** – блок введення значень сигналу в блок-діаграму; **2** – елемент перетворення масиву даних в оброблюваний сигнал; **3** – елемент розгалуження сигналу; **4** – вузол тарування сигналу; **5** – блок графічного відображення сигналу в реальному часі; **6** – блок запису значень сигналу в файли; **7** – блок керування записом значень

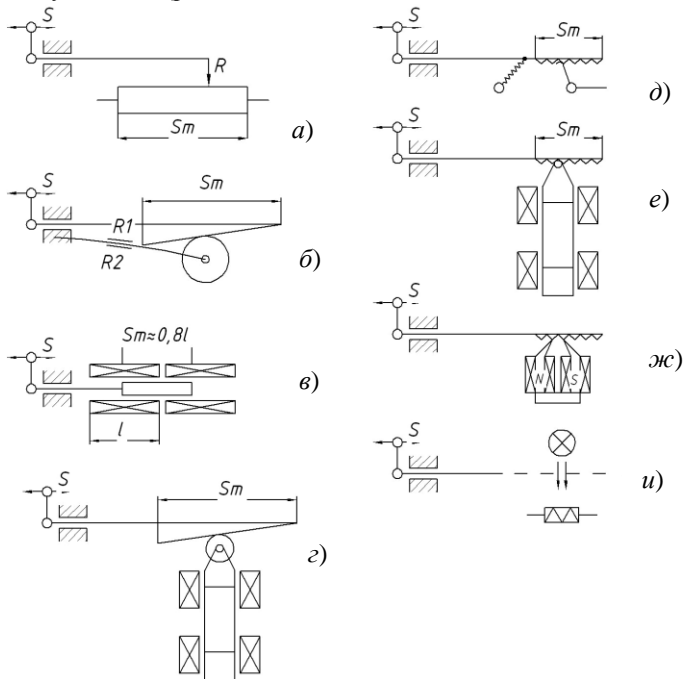
Сигнал, що надходить з АЦП, вводиться в блок-діаграму за допомогою блока введення значень сигналу, що включає в себе налаштування прийому сигналу, такі як кількість каналів, частота знімання, розмір даних. Зокрема можна також обрати з якого саме АЦП та з яких каналів обраного АЦП будуть зніматись дані. Перетворюючи потік даних з АЦП елементом 2 з масиву даних в оброблюваний сигнал ми можемо проводити з ним необхідні дії. За допомогою розподільника 3 сигнал розмежується на два потоки – значення сигналів, отриманих з тензобалок для кожної окремо. Перед виведенням на монітор за допомогою блока 5, та записом значень у блоці 6, отриманих з тензобалок, вони обробляються, для приведення їх в потрібні одиниці вимірювання, з використанням арифметичних дій у вузлі 4.

Запис значень у файли відбувається після натиснення кнопки Enable у блоці 7. Закінчення запису у поточний файл та переадресування даних у наступний файл відбувається при натисканні кнопки Reset у блоці 7.

## 4.2. Вимірювання переміщення

В датчику переміщення вимірюється відстань рухомої точки на об'єкті від нерухомо закріпленої точки, при цьому використовуються як аналогові, так і цифрові датчики.

Аналогові датчики для вимірювання переміщення виготовляються, зазвичай, на основі пасивних резисторних чутливих елементів, а також індуктивних (рис. 4.7, а–г).



**Рис. 4.7 – Пристрої для реєстрації переміщень  $s$ : а–г – з аналоговими датчиками; д–и – з датчиками зі стрибкоподібно змінюваними сигналами; а – з резистивним датчиком  $R$ ; б – з тензорезисторами  $R_1$  і  $R_2$ ; в – з індуктивним датчиком; г – з індуктивним безконтактним датчиком; д – з елементом, що перемикається; е–и індуктивним безконтактним датчиком; ж–з електродинамічним чутливим елементом (індукційною котушкою чи магнітофонною відтворювальною головкою, що розміщена біля намагніченого шару); и – з фотоелектричним чутливим елементом**

Датчики із стрибкоподібно змінним сигналом з резисторними, індуктивними електродинамічними та фотоелектричними чутливими елементами (рис. 4.7, *д-и*) видають імпульси, пропорційні переміщенню. В цифрових датчиках використовуються різні способи кодування.

#### **4.2.1. Аналогові датчики переміщення**

Потенціометричний датчик з резисторним чутливим елементом  $R$  (див. рис. 4.7, *а*) при правильному виборі схеми вимірювання опору дає вихідне напруження, що лінійно залежить від шляху  $s$  [16]. Номінальне вимірне значення  $s$  лежить в межах від 10 до 1500 мм при  $R=10$  Ом–50 кОм. Максимальне розривлення при потенціометрах з дроту не перевищує 0,05 %, а при потенціометрах з провідникової пластмаси воно наближається до 0. Максимально допустима швидкість переміщення приводної ланки наближено дорівнює 0,25 м/с, термін експлуатації – більше 30 млн переміщень приводної ланки.

Застосовують також датчики переміщень, як чутливий елемент у якому використовується пластина з напівпровідникового магнітного матеріалу, яка переміщується в сталому магнітному полі. При цьому її опір змінюється в діапазоні від 100 до 500 Ом прямопропорційно переміщенню.

У пристроях з тензорезисторами  $R_1$  і  $R_2$  (див. рис. 4.7, *б*) деформація пластини, на якій закріплені датчики, прямопропорційна переміщенню  $s$ .

В індуктивних датчиках вимірювання переміщення і відстані як чутливий елемент використовують диференційні дроселі (див. рис. 4.7, *в*) або трансформатори. Номінальний шлях вимірювання  $s_M$  серійних датчиків складає 80 % довжини котушки і дорівнює від 0,5 до 500 мм. Частотний діапазон вимірювань лежить від 0 до 1250 Гц.

Безконтактний індуктивний датчик шляху (див. рис. 4.7, *г*) з чутливим елементом на зразок простого дроселя пристосований для вимірювання переміщень для різних металевих об'єктів, окрім магнітних осердь електромагнітів. Залежно від типу безконтактних датчиків лінійний діапазон вимірювань складає 0,1–1 мм або 3–30 мм. Чутливість при сталій поверхні об'єкта складає  $S_s = 10$  мВ/мм, частотний діапазон вимірювання – від 0 до 10 кГц.

#### **4.2.2. Датчики приросту відстані з стрибкоподібною зміною сигналів**

Принцип дії цих датчиків, що призначені для вимірювання переміщення або кута повороту, полягає в простому підрахунку імпульс-



сів, що надходять від резисторного, індуктивного або електродинамічного чутливих елементів (див. рис. 4.7, *д-ж*).

Кожний імпульс (квант шляху  $s_Q$ ) зв'язується з реєстраційним сигналом, а покази лічильника  $z$  визначається віддалю  $s = s_Q z$ . Похибки вимірювання будь-якого імпульсу впливають на загальний результат.

Синхронно-індуктивний спосіб вимірювання з реєстрацією переміщень базується на використанні пристрою з котушкою.

#### **4.2.3. Датчики переміщення з цифровим кодуванням**

В датчиках переміщення з цифровим кодуванням, переміщення перетворюється за допомогою кодувальної пластини, а зміна кута повороту – за допомогою кодувального диска. Переміщення, або поворот фіксується в цих датчиках у вигляді електричних сигналів в двійковій (див. рис. 4.7, *а*) і десятковій (див. рис. 4.7, *б*) системах.

При використанні методів вимірювання з кодуванням виникають значні витрати на прилади для зчитування і обробки, які можуть розрізняти при  $n$  доріжках  $2^n$  різних положень. Зміщення нуля можливе тільки шляхом переміщення датчика. Ці методи можливі в основному при досить жорстких вимогах до точності, наприклад, в літакобудуванні, турбобудуванні, при забезпеченні безпеки польотів літаків, космічних апаратів і в ядерних реакторах.

#### **4.2.4. Інші методи вимірювання переміщень**

Датчики переміщення з смісними чутливими елементами мають номінальний діапазон вимірювання переміщень 0–2 мм, найбільша з похибок не перевищує 1,5 мкм, або 0–20 мм при похибці не більше 2 мкм. Точність може досягти 0,02 мкм. А робочий діапазон складає 0–100 кГц.

В лазерних пристроях для вимірювання віддалі використовується реєстрація часу розповсюдження світла від лазерного випромінювача до об'єкта-відбивача і фотодіода приймача. Режим роботи імпульсний (декілька сотень лазерних імпульсів в секунду). Діапазон віддалі, що вимірюється, досягає, наприклад, від 5 м до 35 м, відносна похибка – не більше  $10^{-4}$ . Датчики переміщення можуть бути використані як чутливі елементи при вимірюванні багатьох інших величин, які зв'язані зі зміною віддалі.

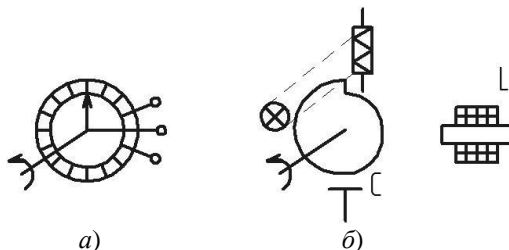
### **4.3. Вимірювання кута повороту**

Методи вимірювання кута повороту багато в чому аналогічні вимірюванню поступального руху.

### 4.3.1. Аналогові датчики кута повороту пристосовані для вимірювання великих кутових переміщень (до $360^\circ$ і більше)

Аналогові датчики кута повороту придатні для вимірювання великих кутів (до  $360^\circ$  і більше) [16, 18].

Як чутливі елементи в датчиках кута використовують резистори з рухомих контактом, що виготовлені з тонкого дроту (рис. 4.8, а) в поєднанні зі схемою вимірювання опору.

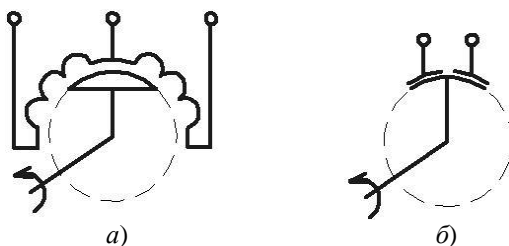


**Рис. 4.8 – Аналогові датчики кута повороту: а – датчик з мікродроту з рухомих контактом; б – датчик з фігурною шайбою та чутливим індуктивним  $L$  або ємнісним  $C$  або фотоелектричним  $P$  елементом**

В пасивних датчиках індуктивного і ємнісного типів, а також в активних і пасивних фотоелектричних датчиках вид характеристики задається фігурною шайбою, виконаною у вигляді спіралі Архімеда, або шайби, що насаджена на вісь з ексцентриситетом (рис. 4.8, б).

Сельсинові системи вимірюють і передають на віддаль кути повороту  $360^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$  з малою абсолютною похибкою  $\alpha_F = \pm 0,1^\circ$ .

Аналогові датчики кута повороту при малих значеннях кута, що вимірюється, включають індуктивний пасивний чутливий елемент – диференційний дросель (рис. 4.9, а) або ємнісний пасивний елемент – диференційний конденсатор (рис. 4.9, б).



**Рис. 4.9 – Аналогові датчики малих значень кута повороту: а – індуктивний; б – ємнісний**

### 4.3.2. Цифрові датчики кута повороту

Датчики кута повороту особливо розповсюджені при вимірюваннях в умовах виробництва, наприклад, в станках з програмним і цифровим управлінням.

Датчики кута повороту випускаються серійно в різних виконаннях (рис. 4.10). Шайба з виступами є чутливим елементом безконтактного пасивного індуктивного датчика (рис. 4.10, а), що має окремий дросель  $L$ , що включений в високочастотний коливальний контур, або в міст з несучою частотою. Вони використовуються для статико-динамічних вимірювань змін кута. Активні датчики з індуктивною котушкою  $E$  призначені для динамічних вимірювань протягом тривалого часу.

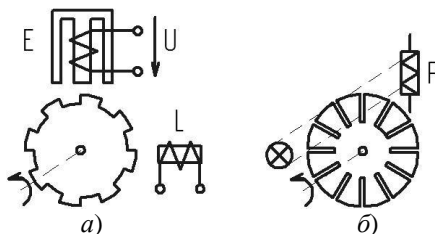


Рис. 4.10 – Цифрові датчики кута повороту:

**а** – безконтактний датчик з зубчатою шайбою та пасивним дроселем  $L$   
**або** індуктивним елементом  $E$ ; **б** – фотоелектричний датчик

Датчики з шайбами (рис. 4.10, б), що містять отвори або щілини (або барабан, що дискретно відбиває світло), мають джерело світла у вигляді ламп гліючого розряду та активний або пасивний чутливий елемент, наприклад кременеві діоди або фототранзистори. При використанні фотоелектричних датчиків від об'єкта вимірювань не споживається енергія.

Фотоелектричні датчики кута повороту зі зміщеною за фазою вихідною напругою на 5000 поділок ( $20000$  пазів на  $360^\circ$ ) мають абсолютне розрішення за кутом  $\alpha_Q = 360 / 20000 \approx 0,018^\circ = 1,08'$  або відносне розрішення  $Q_\alpha = 0,05$  на  $360^\circ$ .

Кодувальні датчики кута повороту мають кодувальну круглу шайбу з контактними щітками або з магнітною або фотоелектричною вимірювальною системою. В таких датчиках, наприклад з 10 доріжками, досягається абсолютне розрішення за кутом  $\alpha_Q = 360 / 2^{10} = 260 / 1024 \approx 0,35^\circ \approx 21'$ . При 13 доріжках одержуємо абсолютне розрішення  $\alpha_Q = 360 / 8192 \approx 2,64'$ .

Для збільшення розрешення по куту необхідно збільшувати кількість доріжок на шайбі, закріпленій безпосередньо на об'єкті, або використовувати редуктор. Якщо приводити в обертання кодувальну шайбу через передаточні шестерні (рис. 4.10), то можна суттєво розширити діапазон вимірювання кута повороту.

#### 4.4. Вимірювання частоти обертання і кутової швидкості

Частоту обертання  $n$  в діапазоні від 0 до 200  $\text{с}^{-1}$ , а також незначні коливання частоти обертання можна вимірювати звичайним електричним генератором постійного або змінного струму (тахометром) [16-18]. Вихідна напруга тахометрів, як правило, не перевищує 220 В, потужність – декілька ват, вихідна характеристика лінійна.

Тахогенератори з пластинками з опорами (рис. 4.11, а), що залежать від індуктивності магнітного поля, піддані в схему моста опору, що розбалансовується за рахунок вихрових струмів в обертовій шайбі, придатні для вимірювання частоти обертання та її швидкої зміни при чутливості 10 мВ на 1000  $\text{хв}^{-1}$ .

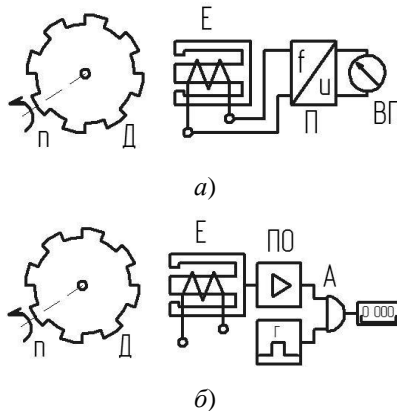


Рис. 4.11 – Датчики частоти обертання:

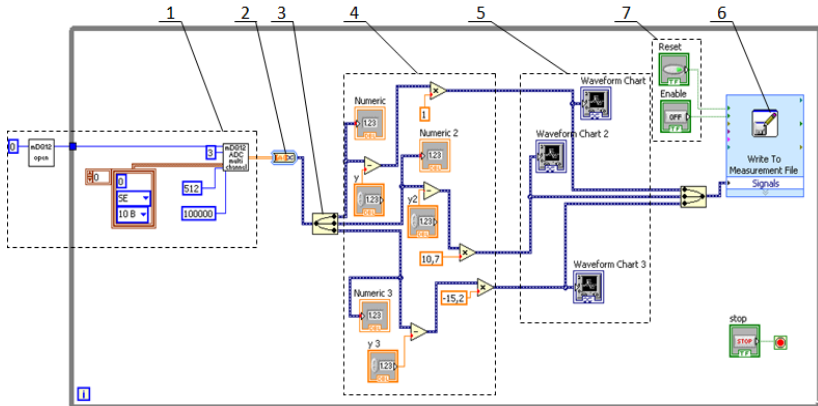
**а** – частотно-аналогове вимірювання (Е – електродинамічна індукційна котушка; П – перетворювач частоти в напругу; ВП – вихідний пристрій);  
**б** – цифрове вимірювання (ПО – посилювач; Г – імпульсний генератор для встановлення часу вимірювання; А – блок збігу; Р – лічильник)

Датчики з цифровим кодуванням (рис. 4.11, б) часто використовуються для вимірювання частоти обертання, при цьому в датчики вмонтовуються електронні схеми для того, щоб на виході одержати результат в цифровій або аналоговій формі.

Датчики частоти обертання з зубчастими шайбами і безконтактною індуктивною котушкою як чутливий елемент звичайно мають кількість зубців  $p = 1; 6; 60; 180; 200; 250$  і  $600$ . Для найменшої частоти  $10$  Гц, коли ще не помітні коливання стрілки вимірювального приладу, число зубців для нижньої границі вимірюваної частоти обертання становить не менше  $p = 600/n_{\min}$ , де  $n_{\min}$  – частота обертання,  $\text{хв.}^{-1}$ .

Кутова частота  $\omega = d\alpha / dt$  може бути визначена в стаціонарному або динамічному режимі, наприклад, шляхом реєстрації частоти надходження імпульсів цифрового датчика. Для вимірювання кутової частоти, що швидко змінюється, використовуються звичайні тахогенератори з лінійними характеристиками.

**Приклад 4.2.** Для дослідження частоти обертання вала двигуна було створено блок-діаграму (рис. 4.12) в програмному середовищі LabVIEW.



**Рис. 4.12** – Блок-діаграма програми віртуального приладу для обробки сигналів з трьох каналів: 1 – блок введення значень сигналу в блок-діаграму; 2 – елемент перетворення масиву даних в оброблюваний сигнал; 3 – елемент розгалуження сигналу; 4 – вузол тарування сигналу; 5 – блок графічного відображення сигналу в реальному часі; 6 – блок запису значень сигналу в файли; 7 – блок керування записом значень

За допомогою цієї блок-діаграми можна отримувати, зберігати, обробляти значення вхідного сигналу, а також виводити на монітор у вигляді графічної залежності під час проведення експерименту. Це є приклад однієї з найпростіших програм, що не потребує складних петровень.

Сигнал, що надходить з АЦП, вводиться в блок-діаграму за допомогою блока введення значень сигналу, що включає в себе налаш-

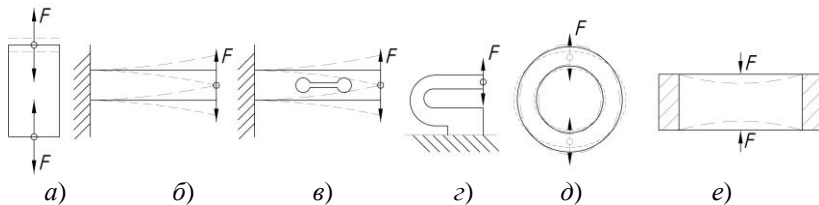
тування прийому сигналу, такі як кількість каналів, частота знімання, розмір даних. Зокрема можна також обрати з якого саме АЦП та з яких каналів обраного АЦП будуть зніматись дані. Перетворюючи потік даних з АЦП елементом 2 з масиву даних в оброблюваний сигнал ми можемо проводити з ним необхідні дії. За допомогою розподільника 3 сигнал розмежується на три потоки, а саме значення сигналу, отриманого з індуктивного датчика та значення сигналів, отриманих з тензобалок для кожної окремо.

Перед виведенням на монітор за допомогою блока 5, та записом значень у блоці 6, отриманих з тензобалок, вони обробляються, для приведення їх в потрібні одиниці вимірювання – таруються, з використанням арифметичних дій у вузлі 4. Значення з індуктивного датчика не потребують обробки, так як нас цікавить лише рівень: є напруга, чи немає напруги. Запис значень у файли відбувається після натиснення кнопки Enable у блоці 7.

Закінчення запису у поточний файл та переадресування даних у наступний файл відбувається при натисканні кнопки Reset у блоці 7.

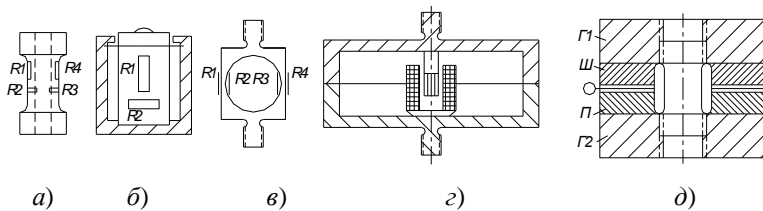
#### 4.5. Вимірювання сили

Зусилля вимірюються шляхом реєстрації деформації (згинання чи зміни лінійного розміру) вимірювальних пружних елементів [16–18]. На рис. 4.13 наведені найпоширеніші види датчиків для вимірювання сили.



**Рис. 4.13 – Пружинні вимірювальні елементи для датчиків сили  $F$ :**  
***a*** – порожнистий чи суцільний циліндр; ***б*** – стрижень, що згинається, закріплений одним кінцем; ***в*** – подвійний стрижень, що згинається, закріплений одним кінцем; ***г*** – скоба, що пружинить; ***д*** – кільцева пружина; ***е*** – подвійна мембрана

Деформація в датчиках сили вимірюється пасивними дрютяними тензіометрами, тензодатчиками, струнами, що коливаються, індуктивними та ємнісними чутливими елементами або активними п'єзодатчиками. На рис. 4.14 наведені приклади виконання датчиків розтягувальних та стискаючих сил з різними принципами роботи чутливих елементів.



**Рис. 4.14** – Датчики сили: *a* – датчик переміщення та сили з порожнистим циліндром та тензорезисторами  $R_1$ – $R_4$ ; *b* – датчик тиску та сили з порожнистим циліндром та тензорезисторами  $R_1$ ,  $R_2$ ; *c* – кільцевий датчик з тензорезисторами  $R_1$ – $R_4$ ; *z* – датчик для вимірювання переміщення та сили з подвійною мембраною та диференційним дроселем Д; *d* – датчик для вимірювання переміщення та сили зі стискаючим болтом Б, шайбами Ш та п'єзоелектричними чутливими елементами П, що затиснуті гайками  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$

Датчики сили з тензорезисторами  $R_1$ – $R_2$  (пасивними резистивними чутливими елементами), рис. 4.14, *a*–*c* містять у собі додаткові компенсаційні резистори та резистори для налаштування, що необхідні для встановлення нульової точки та постійності чутливості мостової схеми, а також для забезпечення лінійності та досягнення номінальних значень опорів. Загальна кількість резисторів може досягати, наприклад, 19.

Датчики сили з пасивними індуктивними чутливими елементами, наприклад з диференційними дроселями (рис. 4.14, *z*), звичайно мають переміщення  $S_M = 0,1$ – $0,3$  мм. П'єзоелектричний датчик розтягувальних та стискаючих сил (рис. 4.14, *d*) містить вимірювальну шайбу з двома навпроти підєднаними п'єзоелектричними шайбами Ш і П, що затиснені гайками  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$ , які закручені на болті Б. Розтягування вимірюється при зменшенні сили стискання шайб. Вимірювальна шайба може бути також застосована і в датчиках, що призначені для вимірювання сили стискання чи в інших пристроях зміни сили.

Датчики розтягувальних та стискаючих сил з магнітом'яким чутливим елементом, магнітна проникність якого змінюється при механічному навантаженні, мають порівняно невелику нелінійність (до  $\pm 1,5$  %).

Датчики сили з межами вимірювань від 50 мН до 200 кН, що використовуються в пристроях для вимірювання розтягувальних та стискаючих сил, а також датчики тиску з межею вимірювання 20 мН повинні вбудовуватись в конструкцію об'єкта вимірювання, при цьому датчик, наприклад, з 1000 Н/м може змінити жорсткість та частотні характеристики деталей конструкції. В цьому випадку можна без втручання у конструкцію вимірювати сили, реєструючи пружні деформації

деталей тензодатчиками. Датчики сили виготовляються серійно із влаштованими вимірювальними підсилювачами. Частоти власних коливань датчиків складають 1–1000 кГц, частотний діапазон пасивних датчиків – 0–5 кГц, а активних – від 2 до 80 кГц.

Номінальна чутливість виконаних у вигляді потенціометрів датчиків сили, віднесена до межі вимірювань (для пасивних датчиків – на 1 В напруги живлення), складає 5 мВ/В, для напівпровідникових датчиків – 100 мВ/В, пасивних індуктивних датчиків – від 1 до 80 мВ/В та активних п'єзоелектричних – не більше 100 нКл, чи 50 пКл/Н.

#### 4.6. Вимірювання обертового моменту та потужності

Момент обертання вимірюється найчастіше шляхом реєстрації поздовжньої деформації поверхні валів машин у результаті кручення або за допомогою спеціальних торсійних вимірювальних валів з нанесеними на них тензодатчиками, а також для визначення кута закручування двох сусідніх поперечних перерізів вала.

З теорії міцності можна записати деформацію при крученні порожнистого циліндра:

$$\varepsilon = 8Md_1 \sin(2\alpha) / [\pi(d_1^4 - d_2^4)G], \quad (4.13)$$

де  $d_1$ ,  $d_2$  – зовнішній і внутрішній діаметри циліндра відповідно;  $G = 0,385E$  – модуль зсуву;  $E$  – модуль пружності (для сталі  $E = 20,6 \cdot 10^4$  Н/мм<sup>2</sup> [9]);  $M$  – обертовий момент;  $\alpha$  – кут між напрямом осі циліндра та деформацією.

Максимальна деформація спостерігається при  $\alpha = 45^\circ$ , коли  $\sin 2\alpha = 90^\circ = 1$ .

В датчиках моменту на вимірювальний вал (рис. 4.15) наносяться чотири тензорезистори  $R_1$ – $R_4$  для вимірювання деформації згідно з залежністю (4.13), які з'єднують у мостову схему (рис. 4.16). Напругу живлення  $U_0$  і напругу  $U_\beta$ , що визначається, підводять за допомогою контактних кілець або безконтактним способом.

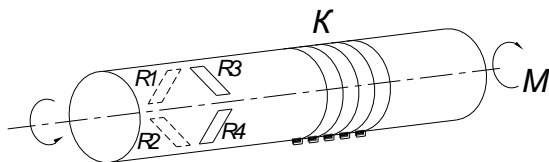


Рис. 4.15 – Датчик обертового моменту з тензорезисторами  $R_1$ – $R_4$  та струмовідвідними кільцями  $K$



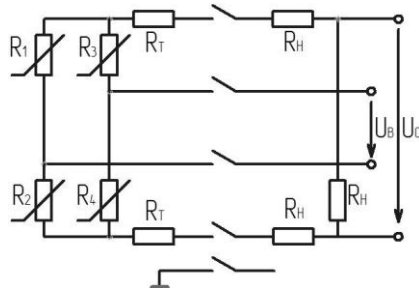


Рис. 4.16 – Електрична схема датчика обертового моменту

В безконтактних цифро-аналогових способах визначення моменту із частотною модуляцією використовують датчики моменту, аналогічні представленим на рис. 4.17.

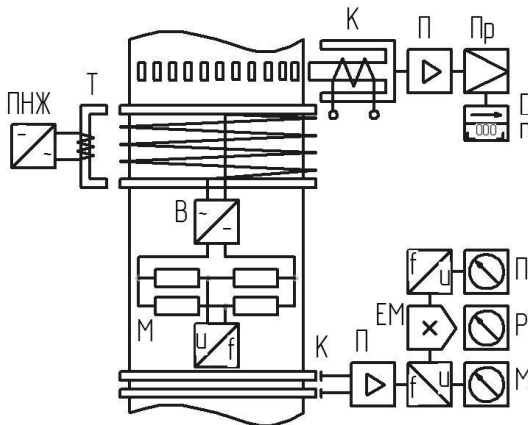


Рис. 4.17 – Частотно-аналоговий пристрій для вимірювання обертового моменту, частоти та напрямку обертання: П – підсилювач,

Пр – перетворювач схеми узгодження, ВП – вихідні прилади, ПНЖ – перетворювач напруги живлення, Т – трансформатор з обертовою вторинною обмоткою, В – випрямляч, М – міст,  $U_{\beta}/f_m$  – перетворювач напруга-частота,  $f_m/U_m$  – перетворювач частота-напруга, К – колектор з ємнісним зв’язком, ЕМ – електронний множник

Ці датчики містять міст М, який живиться від джерела постійної напруги, що отримують від трансформатора Т з нерухомою та обертовою обмотками та випрямляють стабілізованим випрямлячем В. Напруга до нерухомої обмотки трансформатора надходить від перетворювача П, що живиться від джерела постійного струму.

Вихідна напруга діагоналі моста  $U_{\beta}$  перетворюється за допомогою перетворювача типу напруга-частота  $U_{\beta}/f_m$  або генератора з модуляцією середньої частоти у частоту  $f_m$ , пропорційну моменту обертання. Частотно-модульований сигнал з частотами, наприклад, від 5 до 15 кГц за середньої частоти 10 кГц за допомогою колектора К з ємнісним зв'язком або обертовою трансформаторною обмоткою з індуктивним зв'язком з нерухомою обмоткою при частоті обертання до  $1000 \text{ с}^{-1}$  передається від обертового вала до нерухомого підсилювача В та перетворювача Пр типу частота-напруга  $f_m/U_m$ , вихідним сигналом якого є напруга  $\pm 1$  або  $\pm 10 \text{ В}$  або ж струм до  $\pm 20 \text{ мА}$  з частотою, наприклад,  $f_m = 1600 \text{ Гц}$ . Якщо в цю схему додатково підключити передавач і приймач, виходить вимірювальний пристрій з дистанційною дією та передачею сигналу на відстань від 1 до 100 см без кабелів.

Датчики обертового моменту мають діапазон вимірювання від 10 Нм до 50 кНм, частоту власних коливань не вище 8 кГц і діапазон частот від 0 до 2 кГц. Їх чутливість становить 1–100 мВ при граничному значенні моменту, що вимірюється, на 1 В напруги живлення.

Якщо одночасно необхідно виміряти частоту обертання, то пристрій наведений на рис. 4.17 доповнюється датчиком частоти обертання, наприклад, зубчастою шайбою й активним електродинамічним індукційним чутливим елементом (див. рис. 4.11), що дає 30 імпульсів на один оберт, зміщених один відносно одного на  $\pi/2$ .

Для визначення потужності  $P = M\omega$  в цьому пристрої обертовий момент  $M$ , частота обертання  $n$  або ж кутова швидкість  $\omega = \pi n/30$ , що перетворені в електричний струм або напругу  $U_m \sim M$  та  $u_{\omega} \sim \omega$  підводять до електронного множника.

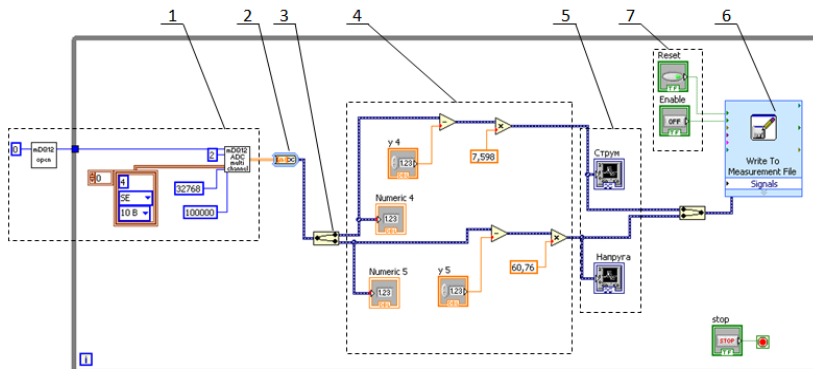
Простим пристроєм для визначення потужності є міст із датчиком моменту (див. рис. 4.15), що живиться напругою, пропорційною кутовій швидкості. У цьому випадку вихідна напруга пропорційна механічній потужності  $P$ :

$$U_{\beta} = (\Delta R/R)U_0 \square M\omega = P. \quad (4.14)$$

Пристрій для вимірювання потужності на валу машин, зазвичай, тарують прикладанням статичного моменту та напруги живлення, що пропорційна частоті обертання.

**Приклад 4.3.** Для дослідження зусилля було створено блок-діаграму (рис. 4.18) в програмному середовищі LabVIEW. За допомогою цієї блок-діаграми можна отримувати, зберігати, обробляти значення вхідного сигналу з двох, а також виводити на монітор у вигляді

графічної залежності під час проведення експерименту. Це є приклад однієї з найпростіших програм, що не потребує складних перетворень.



**Рис. 4.18 – Блок-діаграма віртуального приладу в середовищі LabView:**

- 1** – блок введення значень сигналу в блок-діаграму;
- 2** – елемент перетворення масиву даних в оброблюваний сигнал;
- 3** – елемент розгалуження сигналу; **4** – вузол тарування сигналу;
- 5** – блок графічного відображення сигналу в реальному часі;
- 6** – блок запису значень сигналу в файли;
- 7** – блок керування записом значень

Сигнал, що надходить з АЦП, вводиться в блок-діаграму за допомогою блока введення значень сигналу, що включає в себе налаштування прийому сигналу, такі як кількість каналів, частота знімання, розмір даних. Зокрема можна також обрати з якого саме АЦП та з яких каналів обраного АЦП будуть зніматись данні. Перетворюючи потік даних з АЦП елементом 2 з масиву даних в оброблюваний сигнал ми можемо проводити з ним необхідні дії. За допомогою розподільника 3 сигнал розмежується на два потоки – значення сигналів, отриманих з датчика струму та дільника напруги. Перед виведенням на монітор за допомогою блока 5, та запису значень електроенергетичних показників у блоці 6, вони обробляються, для приведення їх в потрібні одиниці вимірювання, з використанням арифметичних дій у вузлі 4. Запис значень у файли відбувається після натиснення кнопки Enable у блоці 7. Закінчення запису у поточний файл та переадресування даних у наступний файл відбувається при натисканні кнопки Reset у блоці 7.

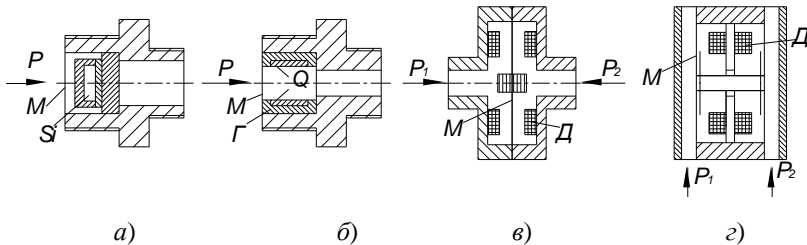
#### 4.7. Вимірювання тиску газу і рідини

У датчиках абсолютного та надлишкового тиску рідини або газу фіксується прогин або еластичне розширення вимірювальної мембрани

чи порожнистого циліндра. Датчик диференціального тиску, наприклад, при вимірюванні швидкості потоку містить на обох сторонах виміральної мембрани закриті камери тиску.

Мембранні датчики тиску, що виготовляють серійно, мають різноманітні чутливі елементи, такі як пасивні потенціометри (тензорезистори; дровові датчики, що розтягуються; п'єзорезисторні пристрої), індуктивні (диференціальні дроселі й трансформатори), ємнісні, з коливною струною, активні п'єзоелектричні елементи, а також системи з компенсацією сил з характерною для цих елементів чутливістю.

Мембранний датчик абсолютного тиску (рис. 4.19, а) має чотири п'єзорезисторних чутливих елементи у вигляді кремнієвих мембран з  $p$ -провідністю, що з'єднані у мостову схему. Вимірюваний тиск передається від виміральної мембрани через мастило до кремнієвих мембран.



**Рис. 4.19 – Мембранні датчики для вимірювання тиску газів та рідини:**  
**Si – кремнієвий чутливий елемент, Q – кварцовий чутливий елемент**  
**з поперечним п'єзоэффектом, Г – напружена гільза,**  
**Д – диференціальний дросель, P – тиск, М – мембрана**

Мембранний датчик надлишкового тиску з активним поперечним п'єзоелектричним чутливим елементом (рис. 4.19, б), наприклад, у вигляді трьох кварцових стрижнів з поперечним п'єзоэффектом, підтиснених попередньо напруженою гільзою Г, видає від'ємний заряд, що дозволяє вимірювати не тільки надлишковий тиск, але й розрідження.

Датчик для вимірювання різниці тисків  $P_1$  і  $P_2$  (рис. 4.19, в, з) містить просту або подвійну мембрану з диференціальними дроселями з поздовжнім або поперечним осердям у якості індуктивного чутливого елемента. Такі датчики вимірюють тиск  $P = P_1 - P_2$ .

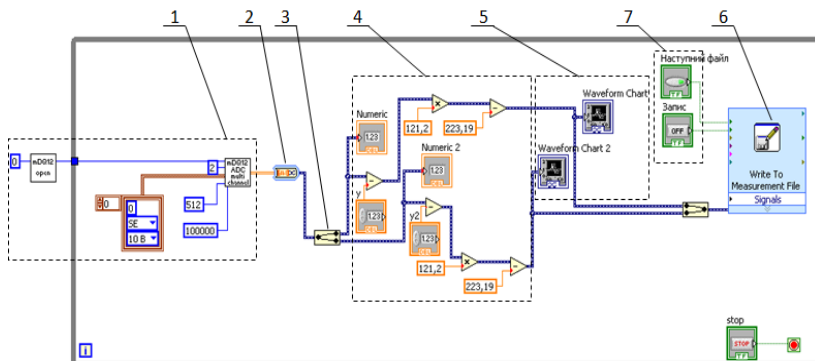
Діапазон вимірювання тиску датчиками надлишкового тиску становить від 0,2 кПа до 750 МПа. Частота власних коливань перебуває в межах від 100 Гц до 800 кГц, частота, що вимірюється, – не більше 350 кГц, допустима температура – від  $-200$  до  $+300^\circ \text{C}$ , а при водяному

охолодженні – до 1800° С. Зміна ємності п'єзокерамічних датчиків становить не більше 1–20 пФ наприкінці діапазону вимірювання.

Транзистори, що використовують для вимірювання тиску в діапазоні від 1 кПа до 0,1 МПа, мають близьку до лінійної залежність напруги між колектором та емітером від тиску.

Для вимірювання вакууму використовують спеціальні методи визначення абсолютного тиску з надзвичайно низькою межею (від 100 до  $10^{-10}$  Па).

**Приклад 4.4.** Для дослідження тиску було створено блок-діаграму в програмному середовищі LabVIEW (рис. 4.20).



**Рис. 4.20 – Блок-діаграма віртуального приладу в середовищі LabView:**

- 1** – блок введення значень сигналу в блок-діаграму;
- 2** – елемент перетворення масиву даних в оброблюваний сигнал;
- 3** – елемент розгалуження сигналу; **4** – вузол тарування сигналу;
- 5** – блок графічного відображення сигналу в реальному часі;
- 6** – блок запису значень сигналу в файли;
- 7** – блок керування записом значень

За допомогою цієї блок-діаграми можна отримувати, зберігати, обробляти значення вхідного сигналу з двох каналів, а також виводити на монітор у вигляді графічної залежності під час проведення експерименту. Це є приклад однієї з найпростіших програм, що не потребує складних перетворень.

Сигнал, що надходить з АЦП, вводиться в блок-діаграму за допомогою блока введення значень сигналу, що включає в себе налаштування прийому сигналу, такі як кількість каналів, частота знімання, розмір даних. Зокрема можна також обрати з якого саме АЦП та з яких каналів обраного АЦП будуть зніматись данні. Перетворюючи потік даних з АЦП елементом 2 з масиву даних в оброблюваний сигнал ми

можемо проводити з ним необхідні дії. За допомогою розподільника 3 сигнал розмежується на два потоки – значення сигналів, отриманих з датчиків температури для кожного окремо. Перед виведенням на монітор за допомогою блока 5, та записом значень у блоці 6, отриманих з термодатчиків, вони обробляються, для приведення їх в потрібні одиниці вимірювання, з використанням арифметичних дій у вузлі 4. Запис значень у файли відбувається після натиснення кнопки «Запис» в блоці 7. Закінчення запису у поточний файл та переадресування даних у наступний файл відбувається при натисканні кнопки «Наступний файл» у блоці 7.

#### 4.8. Вимірювання коливань

Швидкість та прискорення можна вимірювати за допомогою сейсмічних датчиків поздовжніх коливань.

##### 4.8.1. Будова та принцип дії датчиків поздовжніх коливань

У датчику, що зображений на рис. 4.21, всередині корпусу знаходиться маса  $m$ , що має ступінь свободи, у поздовжньому напрямі. Маса закріплена на пружині з постійною  $c$ . Є також демпферна система з коефіцієнтом демпфування  $\delta$ .

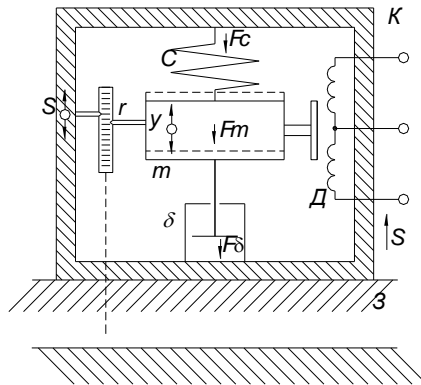


Рис. 4.21 – Сейсмічний датчик поздовжніх коливань:  $m$  – маса;  $\delta$  – коефіцієнт затування;  $c$  – постійна пружина;  $F$  – сили;  $s$  – розмах коливань корпусу  $K$ ;  $y$  – розмах коливань маси  $m$  відносно корпусу  $K$ ;  $Д$  – датчик переміщення;  $З$  – поверхня землі

Жорстко зв'язаний з об'єктом вимірювань корпус датчика переміщується у просторі разом з об'єктом. Якщо корпус рухається із прискоренням  $a = d^2s / dt^2$  (тут  $s$  – відстань), сила, яка виникає, передається пружинній масі  $m$ , і внаслідок її інерційності виникає переміщення маси у просторі  $y(t)$ , що відрізняється від переміщення об'єкта. Між корпусом і масою  $m$ , що коливається, виникає переміщення  $r = -(s - y) = y - s$ , яке і вимірюється, наприклад, за допомогою індуктивного датчика переміщення  $W$ . Переміщення у просторі:

$$y = r + s. \quad (4.15)$$

Зв'язок між відносним переміщенням  $r$  маси та прискоренням корпусу  $a = d^2s / dt^2$  може бути визначене з умови рівності нулю суми усіх сил  $\sum F = 0$ . В результаті отримаємо рівняння коливань механічної системи з позовжніми коливаннями:

$$m \frac{d^2(r + s)}{dt^2} + \delta \frac{dr}{dt} + cr = 0, \quad (4.16)$$

де перший член – сила, що діє на масу; другий – демпферна сила, що пропорційна швидкості; третій – сила пружини.

Рівняння (4.16) є неоднорідне диференційне рівняння другого порядку із постійними коефіцієнтами. Після введення кругової частоти власних коливань  $\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{c / m}$  та степені демпфування  $D = \delta / (2\sqrt{mc}) = \delta / (2m\omega_0)$  отримаємо:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = 2D\omega_0 \frac{dr}{dt} + \omega_0^2 r = -\frac{d^2s}{dt^2} = -a. \quad (4.17)$$

Звідси можна отримати при різних  $c$ ,  $m$  і  $D$  три різних види поведінки коливної системи.

#### **4.8.2. Система з точним настроюванням для вимірювання прискорень**

Якщо система має жорстку пружину велике  $C$ , малу масу ( $\omega_0$  висока) та мале затухання  $D$ , то з (2.3) наближено отримаємо:

$$a \approx -\omega_0^2 r. \quad (4.18)$$

За допомогою такої коливної системи при великій власній частоті  $\omega_0$  можна вимірювати зміщення  $r$  маси  $m$  відносно корпусу за допомогою датчика переміщення, прискорення корпусу  $a = d^2s / dt^2$ . Після підстановки  $\omega_0^2 = c / m$  отримаємо залежність прискорення від сили пружини  $F_c$ :

$$a \approx -cr / m = F_c / m. \quad (4.19)$$

Звідси видно, що прискорення  $a$  можна визначати шляхом вимірювання сили пружини  $F_c$  за допомогою датчика сили.

#### **4.8.3. Сильно демпферна система для вимірювання швидкості**

Якщо система має м'яку пружину ( $c$  маленьке), маленьку масу ( $\omega_0$  велика) та високий ступінь демпфування  $D$ , то з (2.3) наближено отримаємо швидкість:

$$ds / dt = v \approx -2D\omega_0 r. \quad (4.20)$$

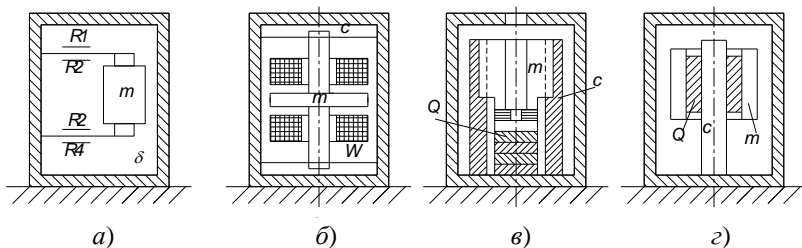
Така сильно демпферна система чутлива до швидкості, і, реєструючи відносне зміщення  $r$ , можна вимірювати швидкість  $v$ .

#### **4.8.4. Датчики прискорення**

Датчики прискорення виготовляються серійно в різноманітному виконанні та призначені для вимірювання прискорень від  $10^{-6} g$  (тут  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ ) в інерціальних системах управління, в транспортних пристроях та машинах і до прискорень приблизно  $10^5 g$  при вибухах.

Датчики прискорення мають систему з поздовжніми коливаннями (рис. 4.22) з високою частотою власних коливань, оснащену демпферним об'ємом, що заповнений силіконовим мастилом.





**Рис. 4.22 – Датчики прискорення: *a* – з тензорезисторами  $R_1$ – $R_4$  чи з високочутливими п'єзорезистивними пасивними чутливими елементами ( $m$  – маса;  $c$  і  $\delta$  – постійна пружини та її коефіцієнт затухання); *б* – з пасивним індуктивним чутливим до переміщення елементом  $W$ ; *в* – з активним п'єзоелектричним чутливим до стискаючої сили елементом  $Q$ ; *з* – з активним п'єзоелектричним чутливим до сил зсуву елементом  $Q$**

Як чутливий елемент в них використовуються або резистивні чи пасивні індуктивні датчики переміщення (див. рис. 4.19, *a*, *б*), або активні п'єзоелектричні датчики сили, що описані раніше.

**Таблиця 4.3 – Типові характеристики датчиків [14]**

|  |                  |
|--|------------------|
| Границі вимірювання прискорення, $m/c^2$   | $10^{-5} - 10^6$ |
| Загальна маса датчика $m_g$ , г  | 50 – 0,2         |
| Частота власних коливань $f_0$ , кГц   | 0,015 – 100      |
| Діапазон вимірюваних частот при чутливому елементі:  |                  |
| – резистивному;  | $>0$             |
| – п'єзоелектричному  | $0,1 - 0,62 f_0$ |
| Діапазон робочих температур, °C:   |                  |
| Чутливість, мВ, при чутливому елементі:  | $-75 - +400$     |
| – резистивному;  | 1 – 50           |
| – індуктивному   | 0,1 – 1          |
| Вихідна напруга (при активних п'єзоелектричних чутливих елементах із зарядом від 5 до 50 нКл), В | 5                |

За допомогою інтегруючих та диференціальних схем можна перетворювати вимірюваний шлях  $s$  в прискорення  $a$  чи швидкість  $v$  і навпаки, а також в імпульс  $da/dt$  (похідну прискорення за часом). На практиці бажано використовувати інтегрування, так як при цьому подавляються високочастотні перешкоди.

### 5.1. Основні положення будови віртуального вимірювального комплексу

Персональний комп'ютер є основною складовою віртуальної вимірювальної системи. В результаті створення вимірювального комплексу на базі ПК значно розширюються можливості системи вимірювання, а також полегшуються умови роботи в результаті скорочення часу на обробку експериментальних даних [18]. За допомогою принтера значно легше виводити результати на паперовий носій. Використовуючи карти пам'яті, диски, дискети та мережу Internet полегшується зберігання інформації, її перенесення, а також миттєва передача на будь-яку відстань. Крім того, навіть морально застарілий комп'ютер від IBM 486 та вище має потужну обчислювальну здатність, що надає можливість проводити різні види обробки результатів вимірювань: нормування, лінеаризацію, апроксимацію, часову прив'язку, обчислення статистичних показників та ін.

#### 5.1.1. Інтерфейсні пристрої

Вимірювання фізичних параметрів, таких як напруга, струм, температура, переміщення, швидкість, прискорення, час або тиск, передбачає точну оцінку аналогових величин, в той час як комп'ютер працює з дискретною величиною. Відповідно, процес перетворення ПК у вимірювальний комплекс передбачає ввімкнення спеціального приладу, що забезпечить перетворення аналогової величини в дискретну. До таких пристроїв належать власне аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) та мікросхеми, наприклад, мікроконтролери, що містять вбудовані АЦП та цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП). Використання ЦАП як окремого елемента, або вбудованого в мікроконтролер, дозволяє, крім проведення збору даних перебігу того чи іншого процесу, забезпечити керування цим процесом. Наприклад, при зміні параметра, що контролюється, вмикається система автоматизованого керування, яка забезпечує підтримку параметра в чітко вказаних межах. Керування АЦП може бути реалізовано через послідовний чи паралельний порт або безпосередньо через шини (ISA, PCI), якщо аналого-цифровий перетворювач виконано у вигляді окремої плати або карти РСМСІА.

Перший варіант під'єднання гарантує максимальну простоту та дешевизну, а при використанні другого можна отримати більш точні результати, але лише за рахунок складності та високої вартості.

В сучасних моделях персонального комп'ютера під'єднання пристроїв введення–виведення даних здебільшого здійснюється через порт USB, а такі порти, як LPT та COM відсутні, проте це не означає, що сучасний комп'ютер не придатний до його використання у віртуальній системі вимірювання, оскільки на ринку оргтехніки є широкий вибір перехідних кабелів типу USB-LPT та USB-COM.

Інтерфейсний прилад також може виконувати інші, не менш важливі, функції, наприклад, гальванічну розв'язку джерела сигналу від портів ПК, узгодження сигналів за напругою, полярністю, їх фільтрування, а також комутацію декількох вхідних каналів.

### ***5.1.2. Програмне забезпечення***

Область застосування віртуального вимірювального комплексу практично повністю визначається характеристиками програмного забезпечення, що застосовується. Від виду програмного забезпечення залежать також функціональні можливості вимірювального комплексу [18]. Як показав досвід проведення експериментальних досліджень в науково-дослідних лабораторіях Хмельницького національного університету зручним є використання програмного забезпечення під конкретні задачі, наприклад, визначення швидкості руху робочих органів імпульсних машин. При використанні власного програмного забезпечення або лише драйвера, що забезпечує запис даних в пам'ять ПК, відпадає необхідність придбання комерційних програм. Звичайно, проведення експериментальних досліджень не обмежене збором даних. Використання ПК дозволяє імпортувати збережену інформацію у вигляді текстового файлу чи масиву в більш потужне програмне забезпечення, наприклад, електронні таблиці або спеціальні програми для побудови діаграм.

Комерційні версії програмного забезпечення дають більше можливостей при зборі даних, а також значно полегшують процес їх обробки. Так, наприклад, пакет LabVIEW компанії «National Instruments» в комплексі зі спеціальними інтерфейсними приладами дозволяє створити сучасний вимірювальний комплекс на базі ПК, що дозволить контролювати та регулювати параметри, що досліджуються, зберігати дані, проводити їх статистичну обробку, побудову діаграм, таблиць та ін.

На сьогодні також існує велика кількість програм вільного використання для планування експерименту та обробки даних, наприклад, Optimization Model & Planning Experiment. Зазвичай, проведення експериментальних досліджень вимагає до комплекту вимірювальної апаратури, що містить датчики, підсилювач та АЦП, також комплекс програмного забезпечення. Вибір комерційного варіанта АЦП та пакета програмного забезпечення чи АЦП власної розробки в комплексі з

драйвером для зчитування та запису даних обумовлений фінансовими можливостями та поставленими завданнями.

### ***5.1.3. Точність та швидкодія інтерфейсних приладів***

При створенні реальних та віртуальних приладів слід враховувати їх основні характеристики – точність та швидкодію [18, 19].

Точність віртуального приладу визначається не лише кількістю цифр після коми, що виводиться на екран програмою. Одним з основних критеріїв для аналого-цифрового перетворювача є його розрядність. Цей параметр визначає ступінь розрізнення при вимірюваннях, тобто ту найменшу різницю між двома сусідніми значеннями, яку відчуває вимірювальний прилад. Наприклад, восьмирозрядний АЦП здатний формувати 256 різних значень вихідного сигналу (коду). Якщо його повна шкала містить 5 В, він зможе розрізнити два рівня вхідної напруги, що відрізняються приблизно на 20 мВ. Це відповідає чутливості гальванометра класу точності 0,4 або більшості осцилографів. Простий розрахунок показує, що вхідна напруга 4 В може бути виміряна з точністю 0,5 %, а напруга 100 мВ – лише з точністю близько 20 %.

Дванадцятирозрядний АЦП з можливістю формування сигналу на виході 4096 різних значень зможе виміряти напругу 4 В з точністю 0,63 %, а 100 мВ – з точністю близько 1,2 %. Звичайно, дані розрахунки правильні лише за умови, що всі компоненти АЦП мають допуски, що відповідають вказаним величинам. Тобто не слід розраховувати на точність 1 % у вимірювальних колах, що зібрані на компонентах з точністю 5 %.

Вагомий вплив на точність всього пристрою має точність характеристик джерела опорної напруги АЦП. При виборі компонентів слід враховувати їх власну точність, нелінійність, неминучі температурні похибки, які можуть значно впливати на результати при проведенні експериментальних досліджень в польових умовах (за межами науково-дослідної лабораторії) в різні пори року. З цього можна зробити висновок, що для отримання високоточних результатів недостатньо просто зібрати 12-розрядний або більше АЦП.

Так само, як будь-які засоби вимірювання, на віртуальний прилад повинен перевірятись та калібруватись настільки часто, наскільки це необхідно. Виключенням є випадки, коли проводяться порівняльні або відносні вимірювання.

Стосовно швидкодії, необхідно відмітити, що більшість віртуальних приладів доступних за ціною, мають відносно вузький діапазон робочих частот. Це пов'язано, з одного боку, із затратами часу, необхідного АЦП для кожного перетворення «аналог-цифра», а з іншого – затратами часу на обробку сигналу програмою. Відносно дешеві вірту-

альні прилади обмежені за швидкістю від декількох десятків перетворень в секунду до декількох десятків тисяч. Цього більш ніж достатньо, наприклад, для реєстрації кривих зарядки та розрядки конденсаторних батарей, вимірювання температури, розривних навантажень та ін., що робить можливим їх застосування як для проведення лабораторних робіт, так і для проведення науково-дослідних робіт.

Користувач віртуального приладу повинен чітко уявляти можливості свого обладнання та програмного забезпечення, їх похибку тощо, перш ніж робити висновки з отриманих результатів.

## **5.2. Аналого-цифрове перетворення сигналів**

### **5.2.1. Сучасні АЦП**

В зв'язку з необхідністю вбудовування високоякісних цифрових перетворювачів в побутову техніку, автомобілі, засоби комунікації, що засновані на цифрових перетвореннях, виробники напівпровідникових елементів почали застосовувати нові підходи до вирішення цієї задачі. В наш час АЦП або мікроконтролер з вбудованим ЦАП та АЦП стали доступні широкому загалу, завдяки низькій собівартості співставній з вартістю інших елементів вимірювальних систем.

На ринку радіотехнічної продукції представлений широкий вибір аналого-цифрових перетворювачів провідних фірм-виробників («National Instruments», «Texas Instruments», «MAXIM», «Linear Technology», «Burr-Brown»), що засновані на різних принципах перетворення сигналу. Як приклад, в цій роботі ми розглянули лише основні види АЦП, а саме паралельного, послідовного та паралельно-послідовного наближення.

### **5.2.2. АЦП послідовного наближення**

Головна особливість таких АЦП полягає в організації керування по одно- або двопровідній послідовній шині (SPI, Microwire, I2C і т.п.), а не через паралельний інтерфейс, який вимагає одного виводу мікросхеми на кожен розряд шини керування. Такий спосіб передачі бітів даних – один за одним по одному провіднику – обмежує швидкість обміну інформацією. Незважаючи на це, для таких АЦП можлива швидкість передачі даних до 1 Мбіт/с. На практиці, з урахуванням властивостей і можливостей дискретизації та квантування, не слід розраховувати на подолання межі в декілька десятків тисяч вимірювань за секунду, що в середньому відповідає частоті дискретизації 20 кГц. Тому, при розрядності від 8 до 16 біт, вони чудово підходять для віртуальних вимірювальних приладів.

На рис. 5.1 представлено структурну схему стандартних послідовних АЦП, що виконані в корпусі, який містить вісім виводів. Ло-

гічний контролер із вбудованим тактовим генератором керує роботою схеми перетворення, що працює за принципом послідовного наближення. Цей принцип полягає в поступовому покроковому накопиченні в проміжному регістрі даних двійкового кодового слова, що відповідає співвідношенню вхідної аналогової напруги (різниці між рівнями напруги на диференціальних входах ANALOG +IN та ANALOG –IN) та опорної напруги (різниці між рівнями напруги на диференціальних входах REF+ та REF–).

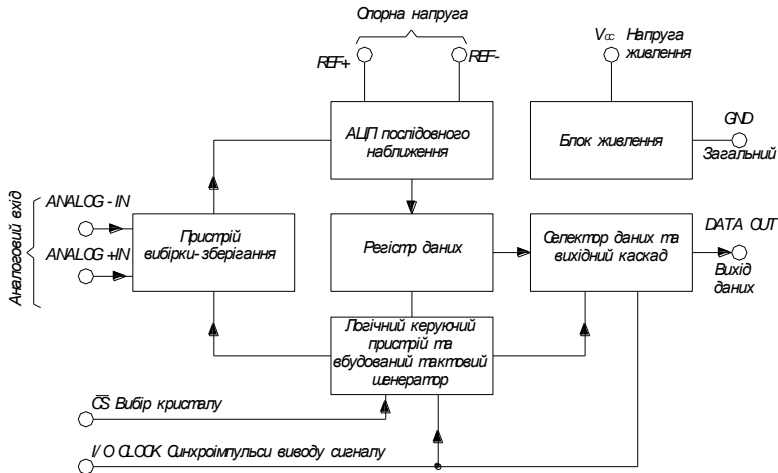


Рис. 5.1– Структурна схема послідовного АЦП

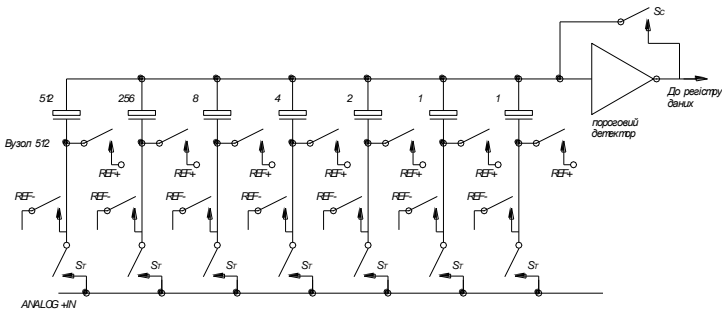
Цикл перетворення починається з фіксації рівня вхідної аналогової напруги в пристрої вибірки–зберігання, після чого перетворювач починає формувати вміст регістра. Процес накопичення кодового слова займає деякий час, який називають часом перетворення.

На практиці, як мінімум, один з виводів (ANALOG –IN або REF–) технологічно з’єднаний із загальним виводом GND, внаслідок чого лише деякі моделі послідовних АЦП можуть працювати за схемою з диференціальним входом.

Після закінчення процесу перетворення селектор даних, який розташований перед вихідним каскадом, починає послідовно обирати біти інформації, що містяться в регістрі даних, після чого послідовно подає їх на вихід DATA OUT. Частота вибірки і формування вихідних імпульсів визначається зовнішнім тактовим сигналом I/O CLOCK.

Для правильного функціонування АЦП необхідна наявність деякої зовнішньої системи керування, яка повинна формувати послідовні синхронізуючі сигнали.

В більшості випадків, аналого-цифрове перетворення починається з моменту подачі відповідного сигналу на вивід CS (вибір кристала). Перетворення відбувається за декілька десятків мікросекунд, після чого потрібно подати необхідну кількість тактових імпульсів на вивід I/O CLOCK, щоб видати результат перетворення на вивід DATA OUT. Хоча величина тактової частоти має нижнє граничне значення, наприклад, 100 кГц, все ж таки її величина набагато нижча, ніж внутрішня тактова частота перетворення. Як правило, швидкість послідовного виведення інформації залежить лише від швидкості, з якою система керування може обробляти отримані біти даних.



**Рис. 5.2 – Функціональна схема АЦП послідовного наближення з матрицею конденсаторів, що комутується**

Принцип дії АЦП послідовного наближення (рис. 5.2), завдяки якому з'явилися компоненти цієї серії, наступний.

Основою функціональної схеми є комутована матриця конденсаторів. Значення кожного біта даних визначається пороговим детектором залежно від величини заряду кожного і вагових конденсаторів, що складають матрицю АЦП. Як видно з рисунка, кількість конденсаторів в матриці визначається у відповідності з послідовністю степенів числа два, тобто від 1 до 512 для наведеної схеми 10-розрядного АЦП.

На початку циклу перетворення логічний пристрій керування замикає всі ключі St і Sc, внаслідок чого всі конденсатори одночасно заряджаються до рівня вхідної напруги V (режим вибірки). Після цього всі ключі розмикаються (режим зберігання) і пороговий детектор починає формувати біти даних, порівнюючи REF- з напругою на кожному конденсаторі матриці.

Першою обробляється напруга на конденсаторі, що встановлений в колі матриці з максимальним числом (у цьому випадку – число 512). Для цього цей вузол приєднується до джерела напруги REF+, а решта вузлів – до REF-. Якщо напруга в сумарній точці більша межі спрацювання детектора, що приблизно рівна  $VCC/2$ , то біт даних вста-

новлюється в нульовий стан, а вузол 512 приєднується до напруги REF-. Якщо напруга в сумарній точці менша межі, то біт даних встановлюється в стан логічної одиниці, а вузол 512 приєднується до джерела REF+ до закінчення процесу перетворення. Ця послідовність операцій повторюється для кола з числом 256, потім 128, і так до тих пір, доки не буде встановлено значення кожного розряду регістра даних.

Необхідно відмітити, що  $n$ -розрядний АЦП може формувати лише два в степені  $n$  різних двійкових кодових слів (256 для 8 розрядів, 1024 для 10 розрядів, 4096 для 12 і т. д.). Різниця між двома сусідніми кодовими словами відповідає аналоговому числу молодшого значущого розряду (МЗР або LSB в закордонних джерелах). Зміна вхідної напруги на величину меншу за цю різницю може не відобразитись у вихідних даних. Деякі перетворювачі, крім того, вносять додаткову похибку і формують результат з точністю до одного або навіть до двох МЗР. Така дискретність результатів перетворення є наслідком характерної для АЦП передаточної характеристики у вигляді «сходинок» (рис. 5.3).

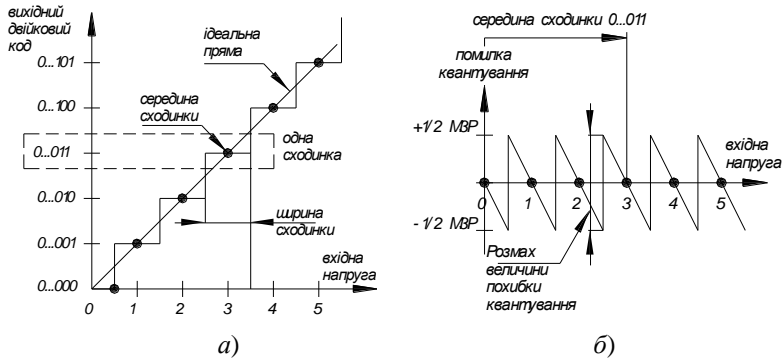


Рис. 5.3 – Передаточна характеристика АЦП

У цьому випадку, як і при будь-якому іншому процесі аналого-цифрового перетворення, отриманий результат містить деяку похибку, яку називають помилкою квантування. Причини її виникнення пояснюються графічною залежністю (рис. 5.3, б). В таблиці 5.1 представлено відповідність діапазону вхідної напруги вихідному двійковому коду.

Таблиця 5.1 – Коди перетворення ЦАП

| Діапазон вхідної напруги |           |           |           |           |          |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 4,5...5,5                | 3,5...4,5 | 2,5...3,5 | 0,5...1,5 | 1,5...2,5 | 0 ...0,5 |
| Вихідний двійковий код   |           |           |           |           |          |
| 0...101                  | 0...100   | 0...011   | 0...001   | 0...010   | 0...000  |



Помилка квантування з'являється в результаті заміни дійсної величини відліку вхідного сигналу її дискретним еквівалентом у вигляді вихідного коду і визначається як різниця між графіками ступінчастої передаточної характеристики та ідеальної прямої. Максимальна величина помилки для передаточної характеристики (рис. 5.3, а) дорівнює половині величини кроку квантування (половині аналогового числа МЗР).

Важливо враховувати цю особливість, оскільки, наприклад, для 8-розрядного АЦП з повною шкалою 5 В, вона проявляється в неминучій похибці перетворення до 20 мВ, хоча це й складає близько 0,4 %.

### 5.2.3. АЦП паралельного наближення

АЦП цього типу проводять квантування сигналу одночасно за допомогою набору компараторів, які увімкнені паралельно до джерела вхідного сигналу [18, 19]. На рис. 5.4 наведено реалізацію паралельного методу аналого-цифрового перетворення для трирозрядного числа.

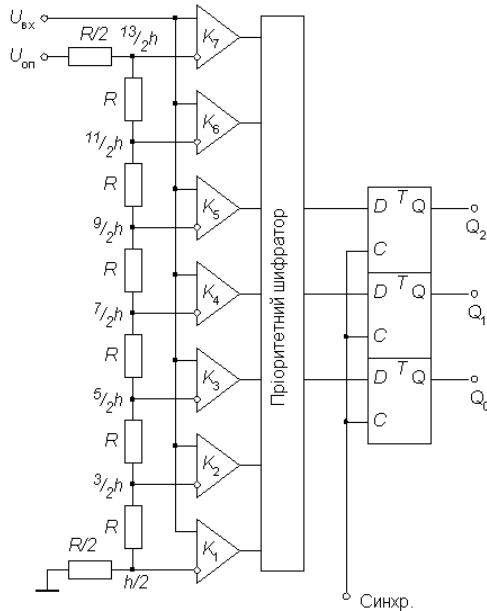


Рис. 5.4 – Схема паралельного АЦП

За допомогою трьох двійкових розрядів можна подати вісім різних чисел, включаючи нуль. Отже, необхідно сім компараторів. Сім відповідних еквідистантних опорних напруг утворюються за допомогою резистивного подільника.

Якщо прикладена вхідна напруга не виходить за межі діапазону від  $5/2h$  до  $7/2h$ , де  $h = U_{on}/7$  – квант вхідної напруги, який відповідає одиниці молодшого розряду АЦП, то компаратори з 1-го по 3-й встановлюються в стан 1, а компаратори з 4-го по 7-й – в стан 0. Перетворення цієї групи кодів у трьохзначне двійкове число виконує логічний пристрій, що називається пріоритетним шифратором. Стани пріоритетного шифратора наведено в таблиці 5.2.

**Таблиця 5.2 – Стан пріоритетного шифратора**

| Вхідна напруга | Стан компараторів |       |       |       |       |       |       | Виходи |       |       |
|----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| $U_{вх}/h$     | $K_7$             | $K_6$ | $K_5$ | $K_4$ | $K_3$ | $K_2$ | $K_1$ | $Q_2$  | $Q_1$ | $Q_0$ |
| 0              | 0                 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     |
| 1              | 0                 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0      | 0     | 1     |
| 2              | 0                 | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 0      | 1     | 0     |
| 3              | 0                 | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0      | 1     | 1     |
| 4              | 0                 | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1      | 0     | 0     |
| 5              | 0                 | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1      | 0     | 1     |
| 6              | 0                 | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1      | 1     | 0     |
| 7              | 1                 | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1      | 1     | 1     |

Під'єднання пріоритетного шифратора безпосередньо до виходу АЦП може викликати появу помилкового результату при зчитуванні вихідного коду. Розглянемо, наприклад, перехід від трьох до чотирьох, чи в двійковому коді від 011 до 100. Якщо старший розряд внаслідок меншого часу затримки змінить свій стан раніше за інші розряди, то тимчасово на виході виникне число 111, тобто сім. Величина помилки в цьому випадку складе половину діапазону вимірювання.

Оскільки результати аналого-цифрового перетворення записуються, як правило, в запам'ятовуючий пристрій, існує ймовірність отримати повністю неправильну величину. Вирішити цю проблему можна, наприклад, за допомогою пристрою вибірки-зберігання (ПВЗ). В деякі інтегральні мікросхеми (ІМС) паралельних АЦП, наприклад МАХ100, монтуються надшвидкісні ПВЗ, які мають час вибірки порядку 0,1 нс. Інший спосіб полягає у використанні коду Грея, характерною особливістю якого є зміна тільки однієї кодової позиції при переході від одного кодового значення до іншого. Нарешті, в деяких АЦП (наприклад, МАХ1151) для зниження ймовірності збоїв при паралель-

ному аналого-цифровому перетворенні використовується двотактний цикл, коли спочатку стани виходів компараторів фіксуються, а потім, після встановлення стану пріоритетного шифратора, шляхом подачі активного фронту на синхровхід вихідного регістра, в нього записують вихідне слово АЦП.

Як видно з таблиці 5.2, при збільшенні вхідного сигналу компаратори встановлюються в стан 1 по чергово знизу вгору. Така черговість не гарантується при швидкому наростанні вхідного сигналу, оскільки через розбіжність в часі затримки компаратори можуть перемикатись в іншому порядку. Пріоритетне кодування дає можливість уникнути помилки, яка можлива у цьому випадку, завдяки тому, що одиниці в молодших розрядах не приймаються до уваги пріоритетним шифратором.

Завдяки одночасній роботі компараторів паралельний АЦП є найбільш швидким. Наприклад, восьмирозрядний перетворювач типу MAX104 дає можливість отримати 1 млрд. відліків за секунду при часовій затримці проходження сигналу не більше 1,2 нс. Недоліком цієї схеми є висока складність. Дійсно, N-розрядний паралельний АЦП містить  $2N-1$  компараторів та  $2N$  узгоджених резисторів. Наслідком цього є висока вартість та значна споживана потужність (MAX104, наприклад, споживає близько 4 Вт).

#### **5.2.4. АЦП послідовно-паралельного наближення**

Як згадувалось раніше, до основних видів АЦП відносять також паралельно-послідовні пристрої.

Послідовно-паралельні АЦП є компромісом між бажанням отримати високу швидкодію та зробити це з меншими витратами. Послідовно-паралельні АЦП займають проміжне положення за роздільною здатністю та швидкодією між паралельними АЦП та АЦП послідовного наближення. Послідовно-паралельні АЦП поділяють на багатоступінчасті, багатотактні та конвеєрні.

### **5.3. Створення мобільного вимірювального комплексу на базі ПК**

У цій роботі розглянуто створення та принцип роботи мобільного вимірювального комплексу, що дозволить використовувати апаратуру в науково-дослідній лабораторії, а також за її межами у, так званих, польових умовах. Для створення мобільного вимірювального комплексу необхідно мати комплект вимірювальної апаратури, що міститиме необхідні датчики Д, підсилювач П (за потребою), аналого-цифровий перетворювач та персональний комп'ютер (рис. 5.5). Як було зазначено в розділах 5.1–5.2, існує декілька варіантів під'єднання інте-

рфейсних приладів до персонального комп'ютера. В переносних вимірювальних комплексах, особливо при застосуванні ноутбука, надається перевага варіанта під'єднання через паралельний або послідовний порт. Для під'єднання АЦП, а також розробки програми зберігання та обробки інформації необхідно детально розглянути будову та розміщення контактів вказаних портів ЕОМ.

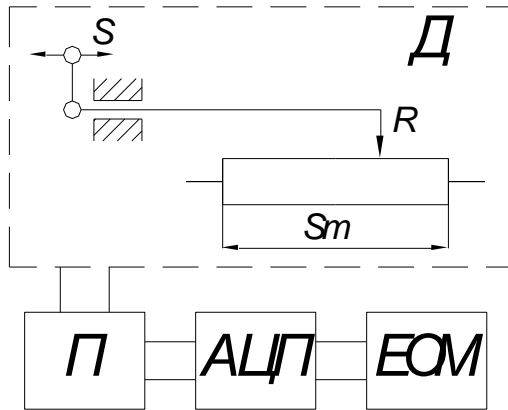


Рис. 5.5 – Блок-схема вимірювального комплексу

### 5.3.1. Послідовний порт RS232

Послідовний інтерфейс RS232 – це промисловий стандарт для послідовної двосторонньої асинхронної передачі даних. Він використовується в комп'ютерах для під'єднання принтерів, модемів тощо. Максимальна відстань передачі даних – 20 м. Цей порт вимагає лише однієї інформаційної лінії, по якій послідовно біт за бітом передаються дані. Це дозволяє скоротити кількість інформаційних ліній для передачі даних між пристроями, але зменшує швидкість [18–20].

Послідовний потік даних складається з бітів синхронізації та бітів даних. Формат послідовних даних містить чотири частини: стартовий біт, біти даних (5–8 біт), перевірний та стоповий біти. Якщо дані не передаються, на лінії встановлюється рівень логічної одиниці. Це називають режимом очікування. Початок режиму передачі даних характеризується передачею рівня логічного нуля тривалістю в одне елементарне посилення. Такий біт називається стартовим. Біти даних посиляються послідовно, починаючи з молодшого. Всього бітів даних може бути від п'яти до восьми. За бітами даних йде перевірний біт, що призначений для виявлення помилок, які виникають під час обміну даними. Останньою передається стопове посилення, що інформує про заве-

ршення символу. Стоповий біт передається рівнем логічної одиниці. Тривалість стопового посилання – 1, 1,5 або 2 біта. Обмін інформацією відбувається за допомогою мікросхеми UART – універсального асинхронного приймача–передавача (електронний пристрій, що генерує та приймає послідовні дані) наступним чином. Приймач виявляє перший фронт стартового біта та вичікує один або півтора тактових інтервали, оскільки зчитування починається лише в середині першого посилання. Через один тактовий інтервал зчитується другий біт даних, причому це відбувається всередині другого посилання. Після закінчення інформаційного обміну приймач зчитує перевірний біт для виявлення помилок та стопового біта, після чого переходить в режим очікування наступної порції даних.

Швидкість передачі інформації в послідовному інтерфейсі вимірюється в бодах. Бод – кількість бітів, що передається за одну секунду. Знаючи швидкість в бодах, можна визначити кількість символів, що передається за секунду. Наприклад, за наявності восьми біт даних без перевірки на парність та один стоповий біт, загальна тривалість послідовності, включаючи стартовий біт, включає 10 біт. Швидкість передачі символів відповідає швидкості в бодах, розділеній на 10. Стандартне кодування швидкості передачі даних наведено в таблиці 5.3.

**Таблиця 5.3 – Кодування швидкості передачі даних**

| Код швидкості | Швидкість, біт/с | Код швидкості | Швидкість, біт/с |
|---------------|------------------|---------------|------------------|
| 600           | 110              | 18            | 4800             |
| 300           | 150              | 12            | 9600             |
| 180           | 300              | 6             | 19200            |
| 120           | 600              | 3             | 38400            |
| 60            | 1200             | 2             | 57600            |
| 30            | 2400             | 1             | 115200           |

**Функціональне призначення контактів порту RS-232.** Стандартний послідовний порт містить 25- або 9-контактний рознім [20, 21]. В таблиці 5.4 наведено схеми розташування контактів, а також їх функціональне призначення.

Розрізняють два класи пристроїв, що обмінюються даними через RS-232, – джерела-передавачі даних (DCE) та приймачі даних (DTE). Наприклад, модеми відносять до пристроїв типу DCE, комп'ютер – DTE, а зв'язок між ними відбувається кабелем, який зв'язує однойменні контакти рознімів між собою (рис. 5.6).

Режим зв'язку між двома пристроями DTE називається режимом «нуль-модему» і вимагає кабелів з перехресним з'єднанням ліній передачі даних (рис. 5.6). Для налагодження програм, що працюють з портом RS-232, досить часто застосовують «заглушки» (loopback).

**Таблиця 5.4 – Функціональне призначення контактів роз'ємів RS-232 на комп'ютері**

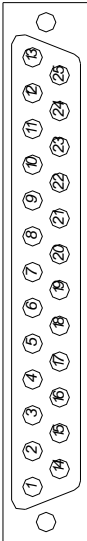
| 25 контактів   | 9 контактів | Найменування | Напрямок (відносно порту) | Опис               |                                    |
|--|-------------|--------------|---------------------------|--------------------|------------------------------------|
|  | 1           | PRDT         |                           | Захисне заземлення |                                    |
|  | 2           | 3            | TD                        | Вихід              | Дані, що передаються               |
|  | 3           | 2            | RD                        | Вхід               | Дані, що приймаються               |
|  | 4           | 7            | RTS                       | Вихід              | Запит на передачу                  |
|  | 5           | 8            | CTS                       | Вхід               | Вільний для передачі               |
|  | 6           | 6            | DSR                       | Вхід               | Готовність зовнішнього пристрою    |
|  | 7           | 5            | GND                       |                    | Сигнал заземлення                  |
|  | 8           | 1            | DCD                       | Вхід               | Виявлення інформаційного сигналу   |
|  | 20          | 4            | DTR                       | Вихід              | Комп'ютер до обміну даними готовий |
|  | 22          | 9            | RI                        | Вхід               | Індикатор дзвінка                  |
|  | 23          |              | DSRD                      | Вхід/вихід         | Детектор швидкості передачі даних  |



Рис. 5.6 – Варіанти з'єднань пристроїв DTE та DCE

### 5.3.2. Паралельний порт LPT

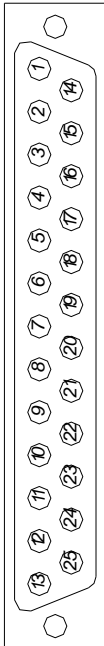
Порт Centronic, або паралельний – це промисловий стандарт для під'єднання принтерів до комп'ютера [20, 21]. Стационарний комп'ютер містить щонайменше один вбудований порт в материнську плату або у вигляді окремої інтерфейсної карти введення–виведення. Сучасна промисловість випускає, як правило, материнські плати з інтегрованими відео, звуковими та мережевими картами, що дозволяє знизити вартість системного блока. Зазвичай, в комплектацію таких материнських плат не входить вказаний порт, проте його можна встановити додатково і навіть збільшити кількість портів від LPT1 до LPT4. У випадку застосування ноутбука можливе встановлення LPT порту у вигляді окремого інтерфейсного приладу, що є перехідним пристосуванням USB2.0–LPT і не потребує додаткового живлення.

Усі сигнали паралельного порту передаються в рівнях TTL (з двома станами) і розраховані на приєднання одного стандартного входу TTL. Формування та прийом сигналів паралельним інтерфейсом відбуваються шляхом запису та зчитування виділеного для нього порту введення–виведення. Зазвичай, цей порт має базову адресу 378h (LPT1), 278h (LPT2), 3BCh (LPT3). Порт має три адреси, перша з них називається базовою. Наприклад, для LPT1 діапазон відведених адрес – 378h–37Ah.

Для кращого розуміння протоколу передачі даних через паралельний порт, необхідно більш детально розглянути функціональне призначення контактів його рознімів.

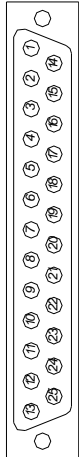
**Функціональне призначення контактів LPT порту.** Розніми паралельного порту для комп'ютера та принтера дещо відрізняються один від одного. Перший – це 25-контактна розетка D-типу, другий – 36-контактна розетка паралельного типу (табл. 5.5)

**Таблиця 5.5 – Функціональне призначення контактів рознімів паралельного порту**

| Рознім та номери контактів на комп'ютері   | Рознім та номери контактів на принтері | Найменування | Напрямок (відносно порту) | Опис  |  |
|--|--|--------------|---------------------------|-------|--|
| 1  | 2                                      | 3            | 4                         | 5     |  |
|  | 1                                      | 1            | STROBE                    | Вихід | Строб даних  |
|  | 2                                      | 2            | DB0                       | Вихід | Біт даних 0  |
|  | 3                                      | 3            | DB1                       | Вихід | Біт даних 1  |
|  | 4                                      | 4            | DB2                       | Вихід | Біт даних 2  |
|  | 5                                      | 5            | DB3                       | Вихід | Біт даних 3  |
|  | 6                                      | 6            | DB4                       | Вихід | Біт даних 4  |
|  | 7                                      | 7            | DB5                       | Вихід | Біт даних 5  |
|  | 8                                      | 8            | DB6                       | Вихід | Біт даних 6  |
|  | 9                                      | 9            | DB7                       | Вихід | Біт даних 7  |
|  | 10                                     | 10           | -ACK                      | Вхід  | Підтвердження прийому даних, готовність принтера       |
|  | 11                                     | 11           | BUSY                      | Вхід  | Підтвердження зайнятості принтера                      |
|  | 12                                     | 12           | PE                        | Вхід  | Немає паперу   |
|  | 13                                     | 13           | SLCT                      | Вхід  | Принтер присланий до лінії                             |
|  | 14                                     | 14           | -LF/-CR (AUTO FD)         | Вихід | Автоматичне переведення рядка після повернення каретки |
|  | 15                                     | 32           | ERROR                     | Вхід  | Помилка в принтері                                     |
|  | 16                                     | 31           | -INIT                     | Вихід | Встановлення параметрів за замовчанням                 |



**Продовження таблиці 5.5**

| 1   | 2     | 3                | 4                                    | 5     |                                       |
|---|-------|------------------|--------------------------------------|-------|---------------------------------------|
|  | 17    | 36               | -SLCT<br>IN                          | Вихід | Вибір<br>принтера                     |
|   | 18–25 | 19,<br>30,<br>33 | GND                                  |       | Вита пара,<br>з'єднання<br>з «землею» |
|   |       | 18,<br>34        | Не<br>вико-<br>ристо-<br>вувь-<br>ся |       |                                       |
|   |       | 16               | LOGIC<br>GND                         |       | Логічна<br>«земля»                    |
|   |       | 17               | CHAS<br>SIS<br>GND                   |       | Заземлення<br>на шасі                 |
|   |       |                  |                                      |       |                                       |

Як видно з таблиці 5.5, в інтерфейсі паралельного порту для під'єднання до комп'ютера інтерфейсних приладів можна використувати 17 ліній, призначення яких можна обирати на свій розсуд.

Розглянемо принцип роботи порту на прикладі роботи принтера.

Перед початком циклу передачі даних комп'ютеру необхідно впевнитись, що зняті сигнали BUSY та -ACK. Після цього виставляються дані, формується строб, знімається строб і знімаються дані. Принтер повинен встигнути прийняти дані з певним темпом. При отриманні стробу, принтер формує сигнал BUSY, а після завершення обробки даних виставляє сигнал -ACK, знімає BUSY і знімає -ACK. Після цього може починатись новий цикл.

### **5.3.3. Керування через паралельний порт LPT**

Паралельний порт можна застосовувати не лише для керування принтером, а й для під'єднання АЦП. До LPT порту можна під'єднати будь-який пристрій, в тому числі побутові прилади. Це дає змогу керувати процесом, що досліджується.

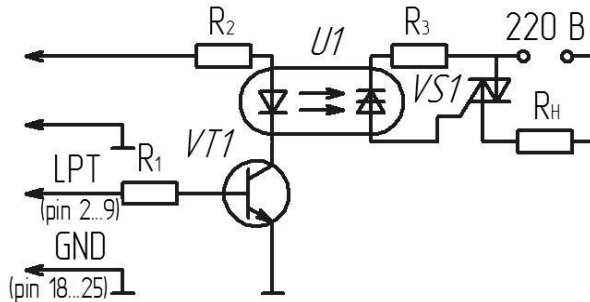
Наприклад, необхідно визначити зусилля удару машини, швидкість руху робочого органа якої становить 5 м/с. В цьому випадку потрібно зчитувати показники з частотою як мінімум на порядок вищою від тривалості самого удару. При незначній величині ходу ударника, наприклад 0,1 м, тривалість процесу становитиме 0,02 секунди. В цьому

випадку частота опитування АЦП повинна бути більше 500 Гц. Послідовність проведення експерименту має бути наступною:

- вмикається програма збору даних;
- вмикається машина – об'єкт дослідження;
- вимикається програма збору даних.

За такої послідовності дій та при частоті опитування АЦП 500 Гц у файлі з даними лише 10–15 % відобразатиметься сам процес, решта будуть записані «пусті» значення. Це, в свою чергу, призводить до збільшення обсягу експериментальних даних, а також до ускладнення процесу їх обробки.

При роботі з LPT портом, навіть за відсутності ЦАП та інших інтерфейсних пристроїв, процедуру експерименту можна реалізувати по-іншому. Як видно з таблиці 5.5, паралельний порт містить вісім незалежних виходів, на які можна посилати біти даних. Так, при посланні в порт числа від 1 до 255 на контакти з другого по дев'ятий подається логічна 1 або 0. При подачі логічної одиниці на вказаних контактах виникає напруга 5 В. Використовуючи оптичну розв'язку для захисту порту комп'ютера, а також силовий симістер можна вмикати прилади, що живляться від мережі 220 В. На рис. 5.7 зображено схему керування приладом, що живиться від мережі 220 В.



**Рис. 5.7 – Схема керування приладами, що живляться від мережі 220 В за допомогою паралельного порту**

**Принцип роботи схеми керування наступний.** При подачі логічної одиниці на один з виходів отримуємо напругу на контактах розніму +5В. В цей момент спрацьовує транзистор VT1, що відіграє роль ключа, та оптопара VD1. В результаті подачі напруги на управляючий електрод симістора VS1 замикається електричне коло, в яке під'єднаний  $R_H$  – прилад, що необхідно було увімкнути. Для живлення схеми керування можна використовувати як окреме джерело, так і живлення отримане з паралельного порту.

Для подачі логічної одиниці на один з виходів необхідно видати в порт число таким чином:

- 1 вихід – 1
- 2 вихід – 2
- 3 вихід – 4
- 4 вихід – 8
- 5 вихід – 16
- 6 вихід – 32
- 7 вихід – 64
- 8 вихід – 128

Число 255 переводить всі виходи в стан логічної одиниці, число нуль – в стан нуля.

Отже, для наведеного прикладу вимірювання сили удару, необхідно ввести корективи в програму, а саме забезпечити стан логічної одиниці на необхідному контакті розніму порту із деякою часовою затримкою відносно початку роботи програми зчитування даних з АЦП.

#### **5.3.4. Вхідний підсилювач**

Як згадувалось раніше, кожна вимірювальна система повинна містити, крім датчиків та пристрою реєстрації сигналу, пристрій для підсилення рівня сигналу. Як правило, всі електричні вимірювання неелектричних величин зводяться до вимірювання рівня напруги або її зміни при зміні параметра, що досліджується. Обладнання, що випускалось промисловістю СРСР, вже морально та фізично застаріло. Це обладнання потребувало живлення від мережі 220 В або потужної акумуляторної батареї. Все це призводило до погіршення мобільності обладнання.

На сучасному етапі розвитку вимірювальної техніки існує ряд пристроїв для підсилення сигналу, що випускаються серійно як малими приватними підприємствами, так і потужними всесвітньо відомими фірмами-виробниками. В основному ці пристрої містять блок живлення, операційний підсилювач, блок гальванічної розв'язки та блок встановлення чи зміщення «нуля». Основними перевагами сучасних напівпровідникових підсилювачів є висока надійність, мала потужність, незначні габаритні розміри в порівнянні з морально застарілим обладнанням. Вартість такого обладнання залежить від його функціональних можливостей, елементної бази та інших факторів.

Застосування промислових зразків не завжди є доцільним, наприклад, при вимірюванні температури розплаву полімеру чи вимірю-

ванні рівня споживання енергії новітнього обладнання. В таких випадках можна розробити підсилювач самостійно.

Схема універсального вхідного підсилювача (рис. 5.8) [18].

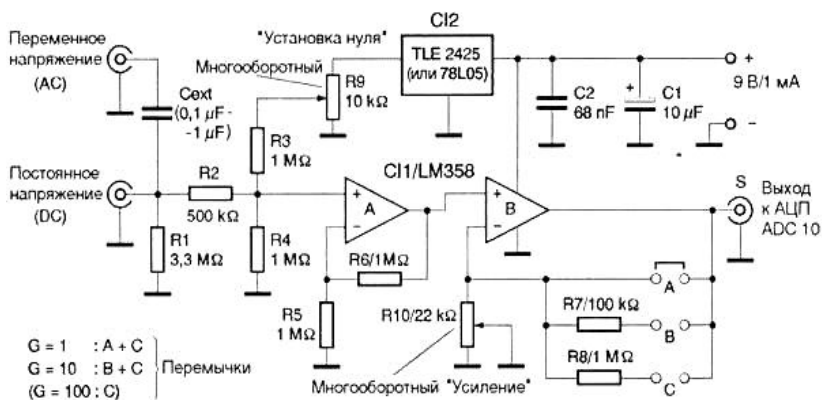


Рис. 5.8 – Принципова схема вхідного підсилювача

Технічні характеристики вхідного підсилювача наведені у таблиці 5.6

Таблиця 5.6 – Технічні характеристики вхідного підсилювача

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| Вхідний опір                     | 500 кОм         |
| Коефіцієнт підсилення            | від 1 до 100    |
| Наявність гальванічної розв'язки | –               |
| Напруга та вид живлення          | 9В, однополярне |
| Струм, що споживається           | 1 мА            |

Головний компонент схеми – двокаскадний операційний підсилювач LM358. Він може працювати з напругою, близькою до нуля, навіть без двополярної напруги. Для стабілізації напруги живлення застосовано мікросхему TLE2425 виробництва «Texas Instruments», на виході якої формується напруга 5 В.

Застосування входу АС дозволяє прибрати з вхідного сигналу постійну складову, що зазвичай присутня, а потім за допомогою потенціометра R9 підбирається така її величина, що максимально спрощує проведення експерименту. Потенціометр R9 з опором 10 кОм призначений для подачі частини вхідної напруги на резисторний суматор, на який також подається вхідна напруга.

Вхідна напруга може подаватись або на прямий відкритий вхід (рознім DC), або на закритий вхід (рознім АС). При використанні закри-

того входу, необхідно враховувати, що величина ємності конденсатора  $C_{ext}$  (бажано, щоб він був розрахований на 250–400 В) залежить від частоти вхідного сигналу. Ємність в 1 мкФ дозволяє працювати на частотах в декілька герц, а величина в 0,1 мкФ забезпечить роботу в звуковому діапазоні.

В наведеній схемі перший каскад має одиничне підсилення, а другий каскад мікросхеми має змінне підсилення, величина якого встановлюється перемичками і становить 1, 10 або 100. Потенціометр R10 дозволяє більш плавно встановити коефіцієнт підсилення.

Калібрування підсилювача необхідно проводити при коефіцієнті підсилення рівному одиниці. Використовуючи «відкритий вхід» (DC) необхідно «замкнути» рознім. При обертанні ручки потенціометра R9 на виході підсилювача отримуємо напругу від 0 до 2,5 В.

Цей пристрій не можна розглядати як високоточний і захисний пристрій, оскільки в наведеній схемі не використовується оптична розв'язка, тобто використовується спільна з АЦП, а відповідно і з корпусом ПК, «земля». Подача незапланованого, занадто високого рівня напруги може призвести до виходу з ладу порту, що застосовується, або материнської плати в цілому.

Для підвищення точності приладу або розширення його можливостей можна додатково встановити фільтри високої та низької частоти на базі операційного підсилювача [22, 23].

Фільтрація – це перетворення сигналів з метою зміни співвідношення між їх різними частотними складовими.

Фільтри забезпечують виділення корисної інформації з необхідними показниками із суміші інформаційного сигналу з перешкодами. Основна задача вибору типу фільтра і його розрахунку полягає в отриманні таких параметрів, які забезпечують максимальну ймовірність виявлення інформаційного сигналу на фоні перешкод.

Фільтри використовуються для пропускання сигналу в потрібному діапазоні частот і послаблення сигналів поза цим діапазоном. Фільтри поділяють за видом амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) на фільтри низьких частот (ФНЧ), верхніх (ФВЧ), смуго-пропускаючі фільтри (ППФ) та смуго-загороджуючі фільтри (ПЗФ). Наприклад, фільтр низьких частот пропускає сигнали низької частоти, включаючи нульові, і затримує радіочастотні сигнали.

На рис. 5.9 представлено принципову схему пасивного фільтра нижніх частот першого порядку. Порядок фільтра визначається кількістю елементів, що входять в нього, які здатні запасати енергію, тобто конденсаторів та котушок індуктивності. Сигнали низьких частот проходять крізь фільтр на його вихід. Високочастотні сигнали замикаються

через конденсатор на «землю» і не з'являються на виході фільтра. Гранична частота фільтра:

$$f_c = 1/T, \text{ рад/с}, \quad (5.1)$$

де  $T = RC$  – стала часу.

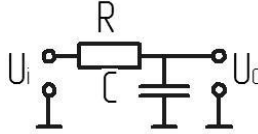


Рис. 5.9 – Пасивний ФНЧ першого порядку

Якщо в фільтрі нижніх частот поміняти місцями резистор і конденсатор, то отримаємо пасивний фільтр верхніх частот першого порядку (рис. 5.10).

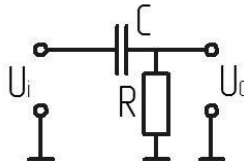


Рис. 5.10 – Пасивний ФВЧ першого порядку

Активні фільтри складаються з операційних підсилювачів (ОП), що працюють в лінійному режимі та пасивних елементів. Якщо в базову схему інверсного підсилювача додати конденсатор зворотного зв'язку С (рис. 5.11), то отримаємо активний ФНЧ першого порядку. Цей фільтр є суміщенням звичайного інтегруючого кола і операційного підсилювача.

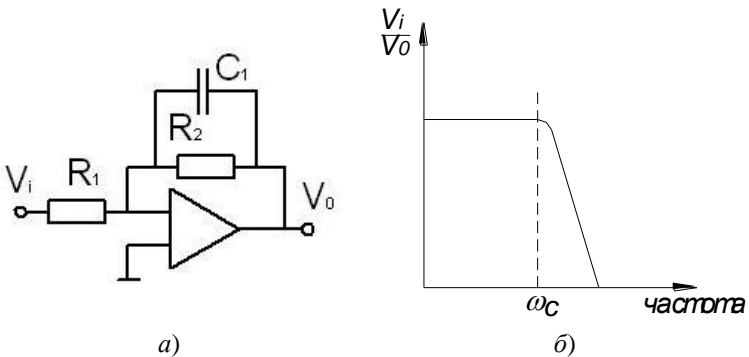


Рис. 5.11 – Активний ФНЧ першого порядку (а) та його АЧХ (б)

Фільтр називається фільтром першого порядку, оскільки багаточлен в знаменнику передаточної характеристики має перший степінь аргументу  $s$ . АЧХ цього фільтра ідентична АЧХ пасивного ФНЧ першого порядку.

Додаючи конденсатор  $C$  на вході базової схеми інверсного підсилювача, отримують активний ФВЧ першого порядку. АЧХ цього фільтра ідентична АЧХ пасивного ФВЧ першого порядку.

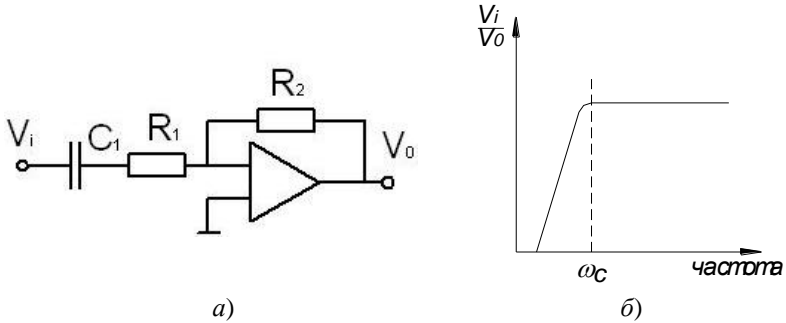


Рис. 5.12 – Активний ФВЧ першого порядку (а) та його АЧХ (б)

Фільтр другого порядку отримують шляхом каскадного з'єднання двох  $RC$ -фільтрів і введення позитивного зворотного зв'язку для збільшення коефіцієнта передачі фільтра на граничній частоті.

В фільтрі третього порядку на вході включено ще один  $RC$ -фільтр. З'єднуючи каскадами фільтри другого та третього порядків, можна отримати фільтри більш високих порядків. Зі збільшенням порядку фільтра його фільтруючі властивості покращуються.

На рис. 5.13 представлена схема смуго-пропускаючого фільтра ППФ, що включає фільтр низьких та фільтр високих частот другого порядку.

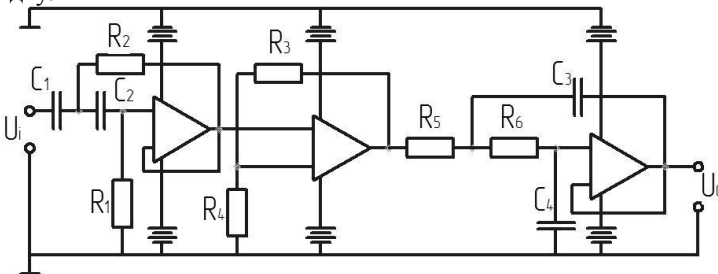


Рис. 5.13 – Принципова схема ППФ на базі операційного підсилювача 741

Основною перевагою схеми, представленої на рис. 5.13, є її розширені функціональні можливості, а саме можливість підсилювати сигнал в певному частотному діапазоні. Діапазон частот, що пропускається фільтром, залежить від параметрів резисторів та конденсаторів фільтрів низької та високої частоти.

### 5.3.5. Робота з АЦП послідовного наближення

Найкращий варіант під'єднання АЦП послідовного наближення – це під'єднання до послідовного порту. В літературному джерелі [20] наведено схему АЦП послідовного наближення на базі мікросхем TLC 549 (8-розрядний АЦП), TLC 1549 (10-розрядний АЦП) та ADS 1286 (12-розрядний АЦП). В цю схему внесені зміни, завдяки яким змінюється діапазон величини даних, що обробляються. На рис. 5.14 представлено схему АЦП послідовного наближення.

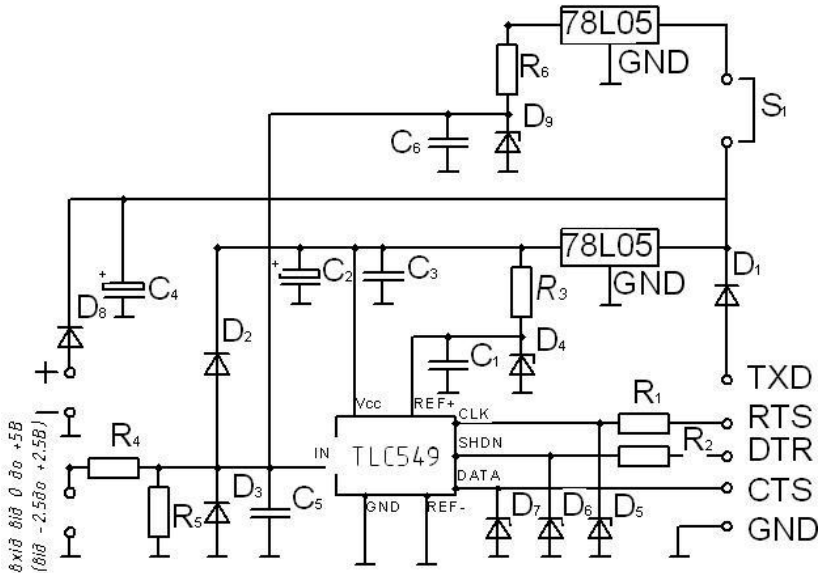


Рис. 5.14 – Принципова схема АЦП послідовного наближення

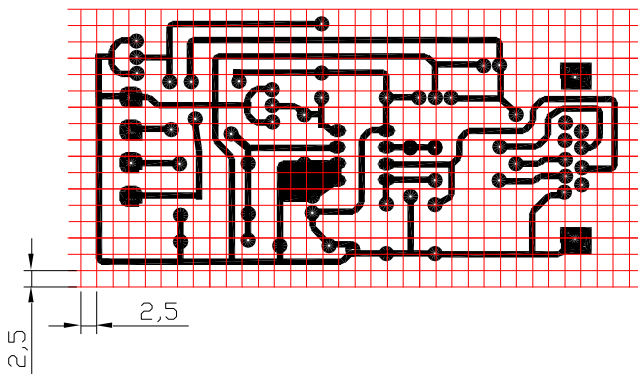
Живлення цього АЦП може здійснюватись безпосередньо від порту RS-232 або від батареї акумуляторів.

Принцип роботи АЦП аналогічний базовому варіанту. Дана схема працює з напругою в діапазоні від 0 до 5 В. При вмиканні перемички S1 схема працюватиме з напругою в діапазоні від -2,5 до +2,5 В.

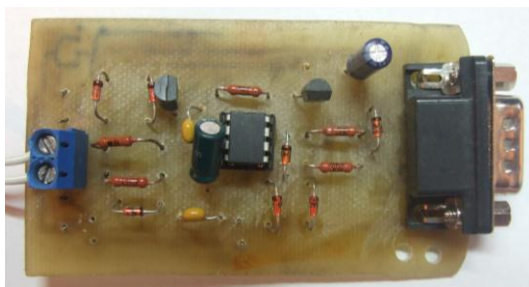


Це дає змогу реєструвати сигнали від'ємні від нуля, наприклад, деформацію стрижня, що розтягується і стискається. Якщо на схемі встановлено перемичку S1, з лінії TXD послідовного порту знімається напруга 15 В, яка перетворюється прецизійним стабілізатором 78L05 до 5 В. На виході стабілізатора 78L05 під'єднано резистор R6, стабілізатор D9 та конденсатор C6. Це коло формує напругу 2,5, яка подається на вхід інтегральної мікросхеми. В результаті подачі на вхід напруги від  $-2,5$  до  $+2,5$  В, вхідний сигнал буде підсумовуватись з напругою від додаткового кола на вході IN інтегральної мікросхеми. Внаслідок такого під'єднання на вході IN буде значення напруги 0 В, при вхідній напрузі  $-2,5$  В, та 5 В при вхідному значенні 2,5 В. Відповідно АЦП буде обробляти напругу в діапазоні від 0 до 5 В, а отриманий результат буде заноситись в пам'ять ЕОМ. Це необхідно враховувати при обробці експериментальних даних, а саме при побудові графічних залежностей, або вносити необхідні корективи в програмне забезпечення.

На рис. 5.15 та 5.16 представлено відповідно монтажну плату та зовнішній вигляд АЦП.



**Рис. 5.15 – Монтажна схема пристрою**



**Рис. 5.16 – Зовнішній вид плати АЦП**

### 5.3.6. Програмне забезпечення для роботи з АЦП

Побудова віртуального вимірювального комплексу, окрім розробки спеціальних інтерфейсних приладів, передбачає розробку програмного забезпечення для збору та обробки інформації.

Нижче наведено текст програми, розробленої для роботи з 8-розрядним АЦП TLC 549. Дане програмне забезпечення розроблене на основі драйвера, наведеного в [18].

Можливості програми значно розширені, порівняно із застосуванням драйвера зчитування даних, що дозволило:

1) записувати результати в текстовий файл, що полегшує подальшу їх обробку;

2) відображати в графічному вигляді на екрані монітору процес, що досліджується;

3) встановлювати затримку обробки інформації (змінювати частоту опитування).

```
program TLC 549_g;
uses crt, HTime, Graph;
var n, f, e: byte;
    b, g, Del, tR, sf : integer;
    d : real;
    Filename:string;
    Time,v1,v2,v3,v4,v5:real;
    k,Rez:real;
    Fi: Text;
    t,t1: longint;
    grDriver: Integer;
    grMode: Integer;
    x,y:integer;

procedure paint;
var ip:byte;
begin
    SetTextStyle(2,HorizDir,2); { pidpisuem visi}
    OutTextXY(580,220, 'time,c ');
    SetTextStyle(2, VertDir, 1);
    OutTextXY(25,5, 'U,Volt ');
    for ip:=1 to 64 do
    line(ip*10+10,233,ip*10+10,237);
    for ip:=1 to 48 do
    line(8,ip*10,12,ip*10);
    SetLineStyle(0 , 0, 3);
    SetColor(4); {kolir linii}
```

```

line(10,0,10,480);
line(0,235,640,235);
SetLineStyle(2, 0, 1);
SetColor(4);{kolir sitki}
{ SolidLn 0
DottedLn 1
CenterLn 2
DashedLn 3
UserBitLn 4 (User-defined line style)
Line Widths:
NormWidth 1
ThickWidth 3 }
{line(0,270,640,270); }
line(0,305,640,305);{ line(0,340,640,340);}line(0,375,640,375);
{line(0,410,640,410)};line(0,445,640,445);
{line(0,200,640,200); }
line(0,165,640,165); {line(0,130,640,130); }
line(0,95,640,95);{ line(0,60,640,60);} line(0,25,640,25);
{line(45,0,45,480);}
line(80,0,80,480);{line(115,0,115,480);}line(150,0,150,480);

{line(185,0,185,480);}line(220,0,220,480);{line(255,0,255,480);}line(290,0
,290,480);

{line(325,0,325,480);}line(360,0,360,480);{line(395,0,395,480);}
line(430,0,430,480);line(500,0,500,480);line(570,0,570,480);
end;

label Exitor;
begin
ClrScr;

if(ParamStr(1))=' ' then
begin
WriteLn(' please input filename:');
ReadLn(Filename);
if (Filename=' ') then Filename:=' AdcData.txt';
end
else
Filename:=ParamStr(1);

Writeln('What is a value of delay');
ReadLn(Del);
if (Del>=10000) then Del:=10000;

```

```

if (Del<=0) then Del:=1 ;
Writeln('What is a value of K-tar_koef');
ReadLn(k);

    Writeln('Please input x-scale faktor');
    ReadLn(sf);
    WriteLn('Mode 1: Starting from PC');
    WriteLn('Timer setting...');

WriteLn("Timer has been setting.");

Assign(Fi, FileName);
Rewrite(Fi);
Writeln(Fi, ' time      ', ' U,Volt  ');
t1:=Htimer;

grDriver := Detect;
InitGraph(grDriver, grMode, '');
paint;
moveto(10,235);{pochatok koordinat}

repeat
clrscr;
b:=$3F8; n:=8;
port[b+4]:=1;
delay(Del);
port[b+3]:=64;
delay(Del);
t:=HTimer;
port[b+4]:=0; d:=0;
for f:=0 to n-1 do
begin
port[b+4]:=2;
e:=port[b+6] and 16;
port[b+4]:=0;
if e=16 then d:=d+exp((n-1-f)*ln(2));
end;
d:=(5*d)/(exp((n)*ln(2))-1);
port[b+4]:=1;
d:=(int(100*d)/100);

    Time:=(t-t1)*0.8383E-6;
    { if d>0 then
    Rez:=(d-2.165)*k
    else Rez:=0; }
    Rez:=d*k;

```

```

x:=round(time*sf)+10;{змiна masshtabu po visi x-time* chislo}
y:=235-round(d*40);
SetLineStyle(0, 0, 1);
setColor(14);
lineto(x,y);
WriteLn(Fi, Time:6:5 , ' ',Rez:6:4);
delay(Del);
until keypressed;

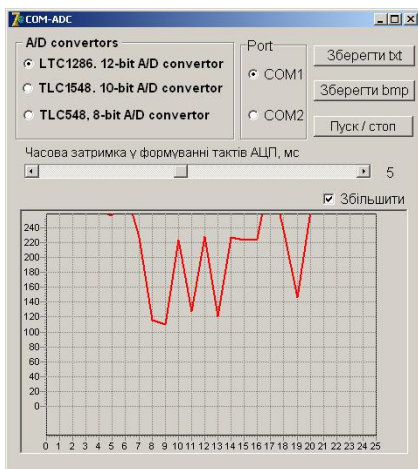
CloseGraph;
end.

```

Це програмне забезпечення може бути змінено та налаштоване на роботу з 10- та 12-розрядними АЦП. Для цього необхідно внести корективи в процедуру зчитування даних з порту згідно з [20].

В зв'язку зі стрімким розвитком обчислювальної техніки з'явилась можливість використання програмного забезпечення для роботи з АЦП, що розроблені на більш сучасних мовах програмування та платформ, таких як Borland Delphi, C++, java та ін. При роботі з таким програмним забезпеченням полегшуються процедури збору та збереження даних. Можливе також створення спеціальних модулів для обробки одержаних результатів та оптимізації даних експерименту.

На рис. 5.17 наведено зовнішній вигляд найпростішої програми для роботи з АЦП послідовного наближення на базі мікросхем TLC 549 (8-розрядний АЦП) та ADS 1286 (12-розрядний АЦП).



**Рис. 5.17 – Зовнішній вигляд «вікна» для роботи з АЦП послідовного наближення**

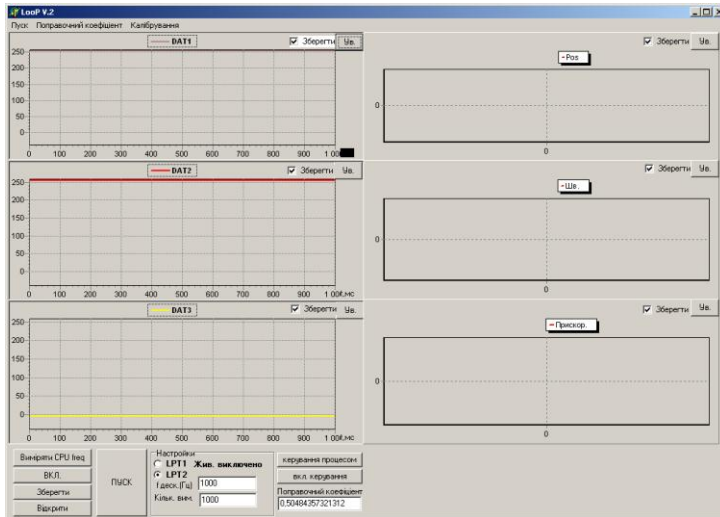
Розроблене програмне забезпечення дозволяє з легкістю проводити налаштування для роботи з 8-, 10- та 12-розрядними АЦП, обирати порт, з якого проводиться збір даних, встановлювати необхідне значення частоти опитування перетворювача у відповідності до швидкості протікання того чи іншого процесу, а також зберігати зчитані в буфер дані у вигляді текстового файлу.

У цьому розділі наведено схеми та програмне забезпечення для роботи одного аналого-цифрового перетворювача послідовного наближення, що під'єднано до послідовного порту. Таке під'єднання забезпечує обробку лише одного потоку даних, тобто таким чином забезпечується вимірювання лише однієї аналогової величини, що відповідає дослідженню процесу зі зміною лише одного параметра. Для проведення багатоканальних вимірювань, тобто вимірювання одночасно декількох параметрів процесу, що досліджується, необхідно на вході перетворювача встановити спеціальний пристрій, який по чергові зчитуватиме дані з різних датчиків. В такому випадку в програмне забезпечення необхідно внести корективи, а саме організувати процедуру зчитування таким чином, щоб кожному переключенню пристрою на вході АЦП відповідав свій масив даних. В такому випадку необхідно пам'ятати, що пропускна здатність порту та частота обробки АЦП будуть розділені на кількість параметрів, що досліджуються, а це, в свою чергу, призведе до зниження ефективності вимірювання швидкоплинних процесів. Це стосується лише одноканальних АЦП. Цей недолік може бути усунений при роботі з АЦП паралельного наближення або застосуванням спеціальних АЦП з більшою частотою дискретизації, що містять вбудовані комутатори і дозволяють зчитувати дані з декількох датчиків одночасно.

### ***5.3.7. Робота з АЦП паралельного наближення***

Робота з аналого-цифровими перетворювачами паралельного наближення без сумніву має незаперечні переваги перед АЦП послідовного наближення. Перш за все, це пов'язано із процедурами збору даних та організацією роботи самого порту. Як згадувалось (див. п. 5.3.2) паралельний порт має декілька незалежних вхідних та вихідних каналів, що дозволяє приєднувати декілька одноканальних високопродуктивних незалежних перетворювачів до окремих входів. Це дозволить проводити дослідження декількох параметрів швидкоплинних процесів із вищою точністю у порівнянні із вимірюваннями через послідовний порт при однаковій розрядності АЦП. Крім того використовуючи окремі виходи, можна керувати процесом, що досліджується.

Для роботи з АЦП перетворювачем паралельного наближення було розроблено програму, що дозволяла керувати АЦП та отримувати з нього дані через LPT-порт. Інтерфейс програми представлено на рис. 5.18.



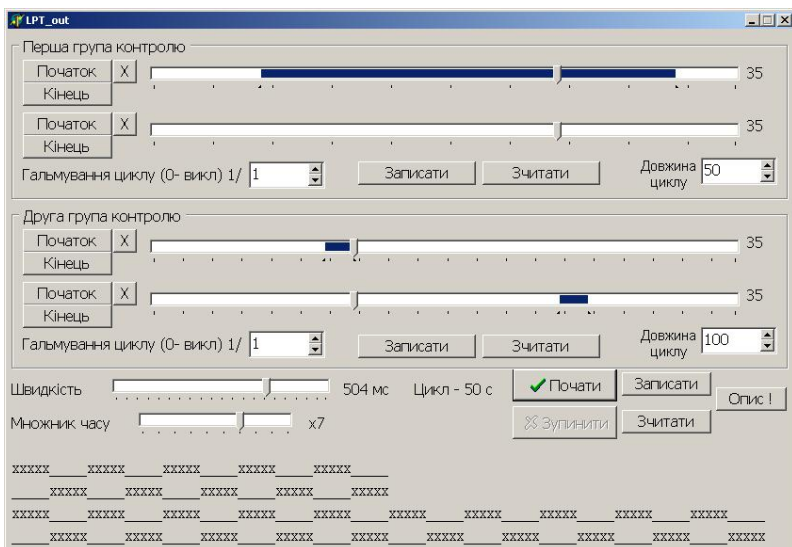
**Рис. 5.18 – Зовнішній вигляд "вікна"  
для роботи з АЦП паралельного наближення**

- Технічні можливості цього програмного продукту наступні:
- робота з портами LPT1 або LPT2;
  - робота одночасно з трьома АЦП, в якості яких можуть виступати 8, 10 та 12-розрядні перетворювачі;
  - графічне відображення залежності параметра, що досліджується в реальному часі;
  - керування пристроєм, параметри якого досліджуються (при натисканні на кнопку живлення в порт видається логічна «одиниця», що дозволяє вмикати через блок гальванічної розв'язки будь який пристрій, що працює від мережі 220 В);
  - програмоване керування чотирма окремими пристроями (рис. 5.19)
  - збереження даних в текстовому (txt) та графічному (bmp) форматах;
  - реєстрація таких фізичних величин, як переміщення, швидкість та прискорення за допомогою оптичного маніпулятора «mouse»;

Розглянемо більш детально роботу окремих модулів.

На рис. 5.19 наведено модуль керування чотирма окремими споживачами або чотирма елементами одного пристрою. Наприклад, досліджуючи параметри процесу дублювання чи прасування на пресі для ВТО, необхідно по чергово виконати наступні дії:

- автоматично опустити подушку преса;
- через певний проміжок часу після опускання увімкнути подачу пари;
- після завершення подачі пари вимкнути вакуумний насос для її відсмоктування;
- підняти подушку у вихідне положення.

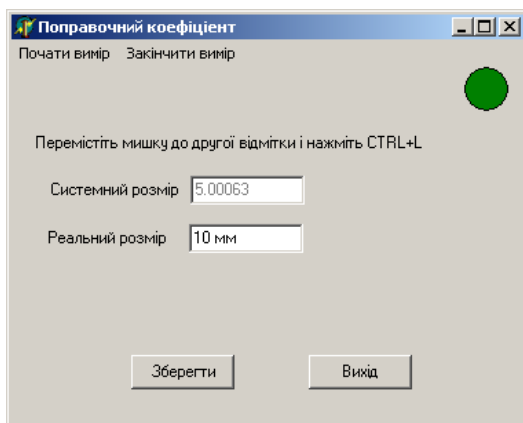


**Рис. 5.19 – Зовнішній вигляд «вікна» керування чотирма незалежними споживачами**

Зазвичай всі ці параметри регулюються безпосередньо на пресі шляхом на лаштування часових реле, кожне з яких відповідає за своєчасне спрацьовування того чи іншого модуля. Проте, під час проведення експерименту, більш зручно керувати вказаним процесом безпосередньо з робочого місця. Так використовуючи модуль керування (рис. 5.19) в комплексі з блоком гальванічної розв'язки (див. п. 5.3.3) можна забезпечити керування цим процесом з точністю до 1 мс, при цьому вказані настройки можна зберегти у вигляді текстового файлу, які при необхідності швидко завантажуються. В нижній частині вікна відображається циклограма роботи пристроїв, яку можна переглянути у режимі демонстрації, натиснувши кнопку «пуск». Щоб завантажити цей модуль необхідно в головному вікні програми (див. рис. 5.18) натиснути кнопку «керування процесом», а натисканням «увімкнути керування» запускається сам цикл керування.



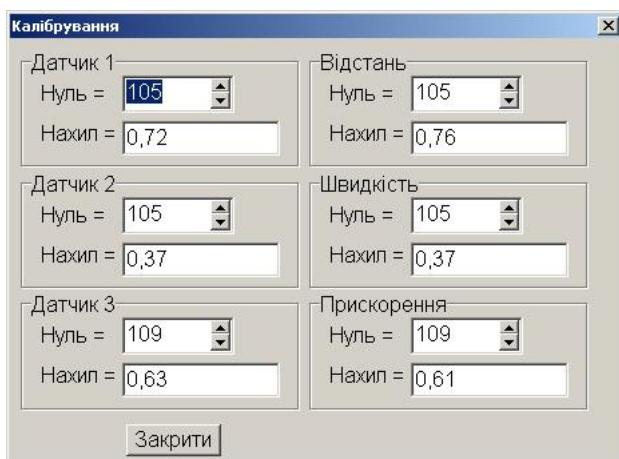
Окрім описаних можливостей цього програмного продукту, незаперечною перевагою є також можливість досліджувати кінематичні параметри машин. У лівій частині головного вікна (див. рис. 5.18) розташовано три діаграми, що відповідно відображують в реальному часі переміщення, швидкість та прискорення робочого органа машини чи механізму. Цей модуль працює з оптичними маніпуляторами, що дозволяє уникати безпосереднього контакту з робочим органом, наприклад, голководієм швейної машини, під час вимірювання, а це в свою чергу зменшує похибку вимірювань (відсутній вплив з боку вимірювальної апаратури). Для коректної роботи модуля необхідно відкалібрувати оптичний маніпулятор узгодивши системне переміщення останнього з реальним переміщенням. Для цього можна застосовувати кінцеві міри які мають високу точність виготовлення і використовуються для калібрування вимірювальних інструментів. Щоб запустити модуль необхідно натиснути кнопку «поправочний коефіцієнт» (див. рис. 5.18), після чого з'являється діалогове вікно, що представлено на рис. 5.20. Початок та закінчення процесу калібрування відбувається натисканням комбінацій клавіш, що відображається на вікні. Після проведення маніпулятором по еталонній мірі в одному напрямі необхідно вказати реальний розмір міри. Після цього у головному вікні програми (див. рис. 5.18) в полі поправочний коефіцієнт з'явиться значення коефіцієнта, який враховує співвідношення системного розміру до дійсного переміщення маніпулятора.



**Рис. 5.20 – Модуль калібрування оптичного маніпулятора**

Наступним етапом після проведення експериментальних досліджень є обробка отриманих даних. У випадку застосування аналого-

цифрових перетворювачів отримані результати записуються в пам'ять ЕОМ. Як правило, ці результати є текстовими файлами з колонками що містять набір бітів даних зчитаних з АЦП. З використання сучасної техніки та потужних оперативних запам'ятовувачих пристроїв можна кожен отриманий імпульс перемножити на коефіцієнт, який буде враховувати співвідношення між дійсною величиною та отриманим результатом, тобто тарувальний коефіцієнт. У верхній частині головного вікна (див. рис. 5.18) розташована кнопка «калібрування», при натисканні якої відкривається діалогове вікно, що наведено на рис. 5.21.



**Рис. 5.21 – Зовнішній вікна модуля калібрування**

В полях навпроти відповідного датчика необхідно ввести значення тангенса кута нахилу тарувальної кривої до осі абсцис, а також точку на осі ординат з якої виходить тарувальна крива. Крива тарування в ідеалізованій формі приймає лінійну залежність, в дійсності, під час тарування датчиків, спостерігаються незначні, в межах 3–5 %, відхилення, що є результатом похибок вимірювання.

#### **5.4. Використання інформаційних технологій National Instruments для наукових досліджень**

У XXI ст. наука та освіта стають стратегічним ресурсом розвитку інформаційного суспільства, могутнім чинником світової інтеграції, засобом відтворення та нарощування інтелектуального, духовного потенціалу народу. Століття, що наступило, характеризується швидкими темпами розвитку в області інформаційних технологій. На сього-

днішній день інформаційні технології стали невід'ємною частиною будь-якої сфери людської діяльності. Вони зустрічаються в повсякденному житті, виробництві, науці та освіті. Вища освіта недалекого майбутнього – це сукупність вищих навчальних закладів, об'єднаних глобальною інформаційною мережею. Таким чином головна перспективна лінія розвитку освітянської діяльності – це розвиток інформаційних технологій навчання.

Підготовка сучасних інженерів високої кваліфікації вже неможлива без знань основ автоматизації і контролю фізичних процесів на основі комп'ютерних технологій, вимірювань і обробки експериментальних даних. Поряд з іншими базовими основами навчання інженера, відповідність його рівня підготовки в області інформаційних технологій, як правило, стає вирішальним фактором працевлаштування на підприємстві, керівництво яких орієнтоване перш за все на впровадження наукоємних технологій виробництва. Якісна інженерна освіта повинна забезпечувати знання природи процесів, що вивчаються, теоретичних основ розрахунку, конструктивних рішень, експериментальних методів дослідження і засобів обробки вимірних експериментальних параметрів. Майбутньому інженеру необхідно отримувати практичний досвід оволодіння навичками роботи з основними типами засобів виробництва, управління збором і передачею даних відносно до реальних машин, їх вузлів і деталей. Все це обумовлює необхідність побудови навчального процесу таким чином, щоб студент на протязі всього періоду навчання міг отримувати практичний досвід оволодіння навиками роботи з основними типами засобів вимірювання фізичних параметрів, збору і обробки даних, а також вироблення законів управління відносно до реальних об'єктів [24–28].

Навчальна лабораторна база більшості українських ВНЗ обмежується лабораторними установками розробленими в кінці ХХ ст. Більша частина лабораторних приладів повністю амортизована і не придатна для вимірювань, а решта достатньо зношена і потребує відновлювального ремонту, проведення якого ускладнюється відсутністю необхідних запасних частин. Частка дієздатних приладів, що знаходяться в експлуатації, схемотехнічно, конструктивно та фізично застаріли і не відповідають вимогам сучасних інформаційних технологій.

Методика вимірювання основних параметрів на цих установках передбачає використання первинних перетворювачів механічного типу і ручний збір інформації. Можна констатувати, що наступив фізичний і моральний знос обладнання цього типу. Необхідна розробка нової концепції експериментальних комплексів з використанням сучасних інформаційно-вимірювальних систем і ефективної методології

проведення навчальних лабораторних робіт, в основі яких лежить дослідницький підхід.

В теперішній час вирішення більшості експериментальних задач зводиться до використання пристроїв, що під'єднуються або вмонтовуються в ЕОМ (цифрові мультиметри та осцилографи, генератори сигналів, АЦП-ЦАП та інші). Вирішення цих задач можливе за допомогою прикладних інформаційних технологій компанії National Instruments.

Компанія National Instruments протягом 27 років є лідером в області розробки і виробництва апаратно-програмних засобів автоматизації вимірювань, діагностики, управління і моделювання широкого спектра задач. Основний принцип побудови систем збору, обробки і управління на базі обладнання компанії National Instruments – модифікація персонального комп'ютера до рівня сучасного вимірювального приладу з необхідними метрологічними характеристиками. Компанія є розробником віртуальних приладів – революційної концепції, що змінила підходи і методику проведення вимірювань і розробки систем автоматизації.

На протязі тривалого часу компанія National Instruments підтримує і розвиває партнерські відносини з ведучими світовими інженерними школами і університетами, допомагаючи впроваджувати і вивчати високі технології, які стали стандартом в промисловості і науці [25].

До програмних засобів компанії відноситься середовище графічного програмування LabVIEW. LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench – середовище розробки лабораторних віртуальних приладів) представляє собою середовище графічного програмування, яке широко використовується в промисловості, освіті і науково-дослідних лабораторіях як стандартний інструмент для збору даних і управління приладами. Це потужне і гнучке середовище, яке використовується для проведення вимірювань і аналізу отриманих даних.

LabVIEW – багатоплатформове середовище для використання на комп'ютерах з різними операційними системами. Персональні комп'ютери є більш гнучкими інструментами, чим традиційні вимірювальні прилади, тому створення власної програми на LabVIEW, або віртуального приладу, є доволі не складною задачею, а інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача в середовищі LabVIEW робить розробку програм і їх використання цікавим та захоплюючим заняттям [25, 26].

Концепція LabVIEW сильно відрізняється від природи традиційних мов програмування C++, Pascal, або Basic, представляючи розробнику легку у використанні графічну оболонку, яка включає в себе весь набір інструментів, необхідних для збору даних, їх аналізу і пред-

ставлення отриманих результатів. Використовуючи графічну мову програмування G (Grafics), можна запрограмувати певну задачу із графічної блок-діаграми, яка компілює алгоритм в машинний код.

Використання цієї мови програмування дозволяє швидко створювати віртуальні прилади з великим можливостями для аналізу і зручним для користувача інтерфейсом. Створюваний в процесі програмування код нагадує звичну для розробників-інженерів блок-схему, і навіть при відсутності навиків програмування для вирішення задач витрачається набагато менше часу і зусиль порівняно з написанням програм по традиційній технології.

LabVIEW також вміщує обширні бібліотеки функцій і інструментальних засобів, призначених для створення систем збору даних і систем автоматизованого управління.

Програмні і технічні засоби National Instruments – один із найбільш перспективних для швидкого створення і накопичення ресурсів, необхідних для інформатизації інженерної освіти. Головною їх перевагою є стирання границі між рядовим викладачем і висококваліфікованим програмістом, наявність доступу до світових ресурсів сучасних методів збору і обробки даних, управління технологічними процесами, що робить викладача активним учасником процесу інформатизації і дозволяє йому самостійно і ефективно реалізовувати власні методичні напрацювання.

Обладнання National Instruments широко використовується при проведенні лабораторних практикумів, досліджень, експериментів і дистанційного навчання. Велика кількість навчальних закладів Росії, країн СНГ, Балтії використовують дане обладнання і програмне забезпечення для створення, модернізації і автоматизації навчальних стендів і наукових лабораторій.

Використання інформаційних технологій фірми National Instruments забезпечує наступні переваги [27]:

- 1) можливість проведення експериментів при виконанні лабораторних робіт і наукових досліджень на новітній елементній базі;
- 2) простота узгодження апаратної і програмної частин єдиної інформаційно-вимірювальної системи;
- 3) швидка конфігурація і налагодження вимірювальних каналів;
- 4) достатньо проста реалізація різних методів вимірювань в одному експерименті і тим самим підвищення їх точності;
- 5) можливість дистанційного виконання лабораторних досліджень, що особливо актуально при організації заочної і дистанційної форм навчання;
- 6) можливість запам'ятовування, зберігання, аналізу і обробки великих масивів експериментальних даних в середовищі LabVIEW так

і їх передача в інші програмні середовища для інженерних розрахунків;

7) реалізація достатньо складних алгоритмів обробки експериментальних даних;

8) можливість багатократного повторення експериментальних досліджень при ідентичних умовах проведення експерименту;

9) можливість проведення експерименту в режимі віддаленого доступу через Internet.

Кафедра машин та апаратів є випускною і готує бакалаврів та магістрів за двома спеціальностями “Обладнання легкої промисловості та побутового обслуговування” та “Електропобутова техніка”. Відповідно викладається велика кількість навчальних курсів, які передбачають крім лекцій, проведення практичних і лабораторних робіт. Тому перед кафедрою постійно постає задача не тільки підтримувати в працюючому стані обладнання, стенди і прилади, але модернізувати і удосконалювати їх та розробляти нові. На кафедрі також проводиться наукова робота викладачами і випускаються аспіранти за цими спеціальностями.

Для підвищення якості підготовки спеціалістів, магістрів, аспірантів, збільшення наукової роботи викладачів на кафедрі планується створити багаторівневу структуру використання апаратно-програмних засобів компанії National Instruments:

- удосконалення організації навчального процесу;
- забезпечення проведення лабораторних робіт;
- забезпечення проведення наукових досліджень.

Швидкий прогрес комп'ютерних технологій і нарощування потужностей обчислювальної техніки, що пройшов в останнє десятиліття, дозволяє з успіхом використовувати їх в різних областях, в тому числі і в легкій промисловості. З кожним днем все більше і більше удосконалюється устаткування, яке застосовується на підприємствах легкої промисловості. Розробники даного обладнання об'єднують вузли точної механіки з електронними, електротехнічними і комп'ютерними компонентами з метою проектування якісно нових модулів, систем, машин і комплексів на їх базі та автоматизованих систем управління технологічними процесами, що виконуються на даному обладнанні. Тому реалізація лозунгу – наука для виробництва потребує впровадження прикладних інформаційних технологій, сучасного вимірювального обладнання.

В науково-дослідній лабораторії кафедри машин та апаратів було розроблено експериментальну установку для дослідження машин легкої промисловості та електропобутової техніки (рис. 5.22).

Можливості цієї установки дозволяють проводити вимірювання механічних, технологічних, електричних та інших параметрів різних технічних систем.

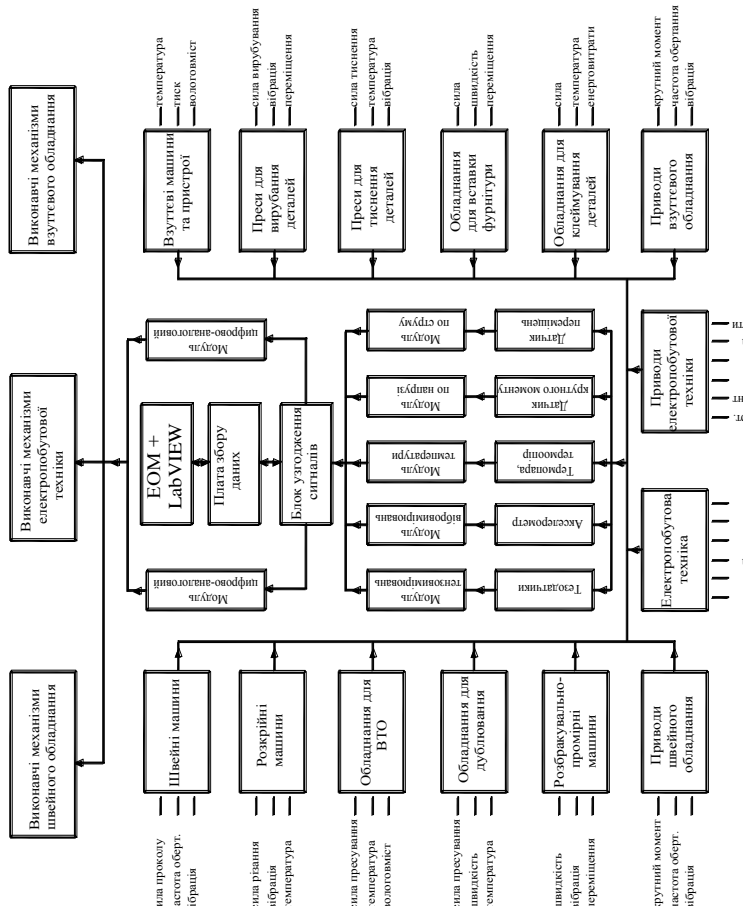
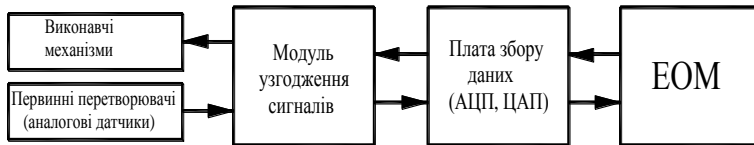


Рис. 5.22 – Схема експериментальної установки для дослідження машин легкої промисловості та електробутової техніки

Невід'ємною частиною вимірювальних систем є персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням. В комп'ютер вмонтовується плата АЦП/ЦАП необхідна для перетворення уніфікованого аналогового сигналу у цифровий вигляд, прийнятний для ЕОМ, або цифрового сигналу в аналоговий для управління виконавчими механізмами (рис. 5.23).



**Рис. 5.23 – Схема вимірювальної системи експериментальної установки**

При побудові вимірювальних систем на базі АЦП/ЦАП як первинні перетворювачі використовуються аналогові датчики, які перетворюють фізичну величину, що вимірюється в певному діапазоні в пропорційний електричний сигнал. Аналоговий сигнал з датчика поступає на модуль узгодження, наявність якого є необхідністю приведення сигналів з датчиків до рівня і найменування сигналу, на якому працює плата АЦП.

Переваги використання аналогово-цифрових та цифрово-аналогових перетворювачів:

- висока якість вимірювань за рахунок високої швидкодії плати АЦП/ЦАП;
- можливість збереження даних на жорсткий диск ЕОМ безпосередньо з АЦП;
- наявність вільних каналів АЦП для збільшення параметрів, що контролюються;
- малі затрати на розробку програмного забезпечення при використанні LabVIEW;
- можливість переорієнтації інформаційно-вимірювальних систем для вирішення наукових задач [24–28].

Серед задач, які можуть бути вирішені за допомогою апаратних засобів та програмного забезпечення компанії National Instruments стосовно до машин легкої промисловості та електропобутової техніки є:

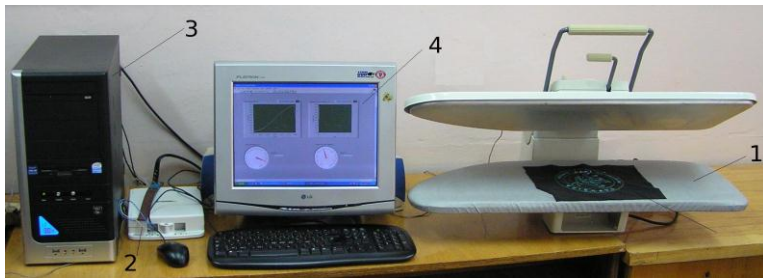
- використання систем технічного зору при лабораторних дослідженнях матеріалів, стандартизації деталей, заготовок, якості готових виробів та ін.
- створення інформаційних систем для навчання студентів, магістрантів та для персоналу підприємств;



- моделювання технологічних процесів підприємств легкої промисловості;
- розробка систем збору і управління процесами легкої промисловості;
- управління різними параметрами технологічного обладнання;
- розробка апаратно-програмних засобів для забезпечення віддаленого доступу до управління технологічним обладнанням;
- автоматизації дослідження на базі LabVIEW;
- розробка лабораторних комплексів для дослідження та випробування машин та механізмів;
- розробка систем діагностики стану машин та механізмів та ін.

Частина із перерахованих задач можна реалізувати на приведений установці для дослідження машин легкої промисловості та електропобутової техніки.

На рис. 5.24 наведено приклад використання розробленої установки для дослідження пресу для виконання операції вологотеплової обробки (ВТО) швейних виробів. При використанні новітніх матеріалів, що застосовуються при виробництві одягу необхідно підбирати оптимальні технологічні параметри цієї операції. Тому при дослідженні визначалися наступні параметри: температура пресування, зусилля пресування.

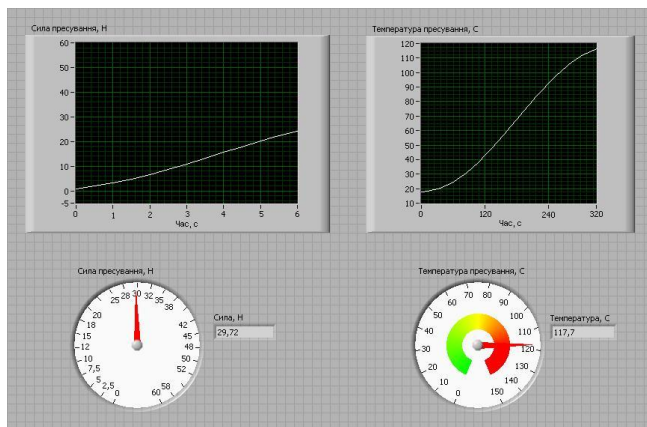


**Рис. 5.24 – Експериментальна установка для дослідження пресу для виконання операції ВТО: 1 – прес для виконання ВТО; 2-блок узгодження сигналів; 3 – ЕОМ з вмонтованою платою збору даних; 4 – програмне забезпечення LabVIEW**

За допомогою графічного програмування LabVIEW для збору та обробки експериментальних даних було розроблено віртуальний прилад. Лицьова панель віртуального приладу приведена на рис. 5.25. Вона вміщує індикатори для визначення сили пресування і температури.

З використанням засобів LabVIEW у цьому експерименті вдалося значно зменшити трудомісткість отримання вимірювальної інфор-

мації обробки експериментальних даних. Результати експерименту були отримані з потрібною дискретністю, в потрібному діапазоні вимірюваних параметрів, а обробка даних дозволила усунути вплив дестабілізуючих факторів і оцінити похибку вимірювань.



**Рис. 5.25 – Лицьова панель віртуального приладу для визначення параметрів процесу ВТО**

## Питання для самоконтролю

---

1. Поняття наукового знання (знання, пізнання, поняття, мислення, наукова ідея, гіпотеза, закон, теорія, методологія).
2. Методи емпіричних досліджень (спостереження, порівняння, вимірювання, експеримент).
3. Методи теоретичних досліджень (ідеалізація, метод формальної логіки, гіпотеза і пропозиція).
4. Теорія, вимоги, що висуваються до побудови нової теорії, єдність теорії і практики.
5. Вибір теми досліджень. Загальні відомості.
6. Обґрунтування актуальності теми досліджень.
7. Науково-технічна інформація і її аналіз.
8. Робота з літературою і складання огляду по темі.
9. Планування експерименту.
10. Планування багатофакторного експерименту.
11. Методи оптимізації при плануванні експерименту.
12. Статистичні методи обробки експериментальних даних.
13. Кореляційний аналіз результатів вимірювань.
14. Оцінити можливі напрямки автоматизації процесу дослідження технічних систем.
15. Представлення технічних систем для автоматичного схематехнічного проектування і дослідження.
16. Надати приклади схем заміщення механічних систем з двополіусними компонентами.
17. Інтегральні змінні. Перетворення змінних.
18. Диференційні змінні. Перетворення змінних.
19. Принцип побудови вхідної мови описування схем. Блочно-ієрархічне представлення.
20. Що таке експеримент в дослідницькій діяльності?
21. Які етапи необхідно реалізувати для проведення експерименту?
22. Які експерименти знаходять часте застосування в галузі машинобудування?
23. Що таке пошуковий, лабораторний, натурний, простий, складний, речовинний, модельний експеримент?
24. У чому полягає принципова відмінність однофакторного експерименту від багатофакторного?
25. Що таке технологічний експеримент?
26. Що повинен включати в себе план експерименту?
27. Яким статистичними вимогам повинні відповідати результати експериментальних досліджень?

28. Викладіть методику визначення числа паралельних дослідів.
29. Для чого реалізують метрологічну оцінку засобів вимірювання?
30. Для чого робиться перевірка адекватності теоретичної залежності?
31. Що закладено в методику оцінки наявності промахів результатів вимірювання?
32. Як визначити розрахунковий критерій Фішера?
33. Виконання будь умови є підтвердженням адекватності теоретичної залежності?
34. Для чого оцінюють величину множинного коефіцієнта кореляції?
35. Якими методами вирішується нелінійна цільова функція?
36. Назвіть відомі Вам варіанти реалізації точкової апроксимації?
37. У чому полягає локальна лінійна апроксимація?
38. Як реалізують методику розв'язування задачі умовної багатовимірної оптимізації?

## Література

---

1. Павловський, М. А. Теоретична механіка / М. А. Павловський. – Київ : Техніка, 2002. – 510 с.
2. Кане М. М. Основы научных исследований в технологии машиностроения : учеб. пособие для вузов / М. М. Кане. – Минск : Выш. школа, 1987. – 231 с.
3. Василенко, П. М. Основы научных исследований / П. М. Василенко, Л. В. Погорелый. – Киев : Вища школа, 1985. – 266 с.
4. Луизова, Л. А. От постановки задачи до принятия решения : учеб. пособие / Л. А. Луизова. – Петрозаводск, 2002. – 84 с.
5. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров. – Москва : Легкая индустрия, 1974. – 263 с.
6. Научные исследования в технологии машиностроения : учебное пособие / В. А. Ванін [и др.]. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 232 с.
7. Савчук В. П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория : учеб. пособие для студентов вузов / В .П. Савчук. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Ч. I. – 54 с.
8. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А .А. Спиридонов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 184 с.
9. Экспериментальные методы исследований / А. И. Лямкин, [и др.]. – Красноярск : ФГОУВПО «СФУ», 2007. – 435 с.
10. Датчики измирительных систем. В 2-х книгах. Кн. 1 / Ж Аш Ж [и др.] ; пер. с франц. – Москва : Мир – 480 с., ил.
11. Зайдель, А. М. Ошибки измерений физических величин / А. М. Зайдель. – Ленинград : Наука, 1974. – 108 с.
12. Немец И. Практическое применение тензорезисторов / И. Немец ; пер. с чешск. – Москва : Энергия, 1970. – 144 с.
13. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин / Р. Тиль ; пер. с нем. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 192 с., ил.
14. Датчики. Справ очник / под ред. З.Ю. Готры и О.И. Чайковского. – Львов : Каменяр, 1995. – 312 с.
15. Логинов В. Н. Электрические измерения механических величин / В. Н. Логинов. – Москва : Наука, 1994. – 132 с.
16. Корнілов О. А. Опір матеріалів / О. А. Корнілов. – Київ : Логос, 2000. – 551 с.
17. Применение тензометрии в машиностроении / под ред. П. З. Петухова и А. В. Казанцева. – Москва : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1956. – 236 с.

18. Магда Ю. С. Компьютер в домашней лаборатории / Ю. С. Магда. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 200 с.
19. Лаврентьев Б. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учеб. пособие / Б. Ф. Лаврентьев. – Йошкар-Ола : МарГТУ, 2000. – 155 с.
20. Новиков Ю. В. Разработка устройств сопряжений для персонального компьютера типа IBM PC : практ. пособие / Ю. В. Новиков, О. А. Калашников, С. С. Гуляев. – Москва : ЭКОМ, 2000. – 224 с.
21. Активные RC-фильтры на операционных усилителях / под ред. Г. Н. Алексакова ; пер. с англ. – Москва : Энергия, 1974. – 64 с.
22. Операционные усилители и компараторы : учеб. пособие / под ред. В. Д. Авербуха. – Москва : Издательский дом «Додэка XXI», 2001. – 560 с.
23. Савин Л. А. Лабораторный комплекс по исследованию элементной базы машины. Труды конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» / Л. А. Савин, Р. Н. Поляков, А. А. Стручков. – Москва : Из-во Российского Университета Дружбы Народов, 2007.
24. Тревис Дж. LabVIEW для всех / Дж. Тревис. – Москва : ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2004. – 544 с.
25. Михеев П. М. Опыт использования информационных технологий National Instruments в учебном процессе в национальном авиационном университете. Труды конференции “Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments” / П. М. Михеев. – Москва : Из-во Российского Университета Дружбы Народов, 2007.
26. Суранов А. Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям / А. Я. Суранов. – Москва : ДМК Пресс, 2007. – 536 с.
27. Батоврин В. К. LabVIEW: практикум по электронике и микропроцессорной технике : учеб. пособ. для вузов / В. К. Батоврин, А. С. Бессонов, В. В. Мошкин. – Москва : ДМК Пресс, 2005.
28. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 (30 лекций) / под ред. П. А. Бутырина. – Москва : ДМК Пресс, 2005.

## ЗМІСТ

|   | с. |
|---|----|
| Вступ   | 3  |
| 1. Метрологічні характеристики механічних параметрів. Рівняння руху машин та їх елементів                     | 4  |
| 2. Методи експериментальних досліджень  | 6  |
| 2.1. Класифікація, типи і завдання експерименту   | 6  |
| 2.2. Методологія експерименту   | 8  |
| 2.3. Розробка плану-програми експерименту   | 9  |
| 2.4. Обробка результатів вимірювань   | 12 |
| 2.4.1. Загальні положення про вимірювання   | 12 |
| 2.4.2. Класифікація похибок   | 14 |
| 2.4.3. Оцінка випадкових похибок прямих вимірювань  | 19 |
| 2.4.4. Оцінка випадкових похибок непрямих вимірювань  | 22 |
| 2.5. Огляд програмного забезпечення для виконання аналізу, обробки і представлення експериментальних даних    | 23 |
| 2.5.1. Розрахунки і статистична обробка результатів   | 24 |
| 2.5.2. Побудова графіків  | 26 |
| 2.5.3. Робота з текстом   | 28 |
| 2.6. Імовірно-статистичні методи обробки експериментальних даних  | 29 |
| 2.6.1. Випадкові величини. Аксиоми теорії ймовірностей  | 30 |
| 2.6.2. Генеральна і вибіркова сукупності  | 31 |
| 2.6.3. Розподіл випадкової величини, теоретичний та емпіричний розподіл, їх табличне і графічне представлення | 37 |
| 2.6.4. Характеристики теоретичного та емпіричного розподілу випадкової величини                               | 41 |
| 3. Електричні вимірювання неелектричних величин   | 45 |
| 3.1. Резисторні чутливі елементи і датчики  | 46 |
| 3.1.1. Види резисторних чутливих елементів  | 47 |
| 3.1.2. Схеми вимірювання з подільниками напруги   | 47 |
| 3.1.3. Мостові схеми  | 49 |
| 3.2. Індуктивні чутливі елементи та датчики   | 53 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2.1. Види індуктивних чутливих елементів  | 53 |
| 3.2.2. Трансформаторні чутливі елементи   | 54 |
| 3.2.3. Мости змінного струму для вимірювань індуктивності   | 56 |
| 3.3. Ємнісні чутливі елементи і датчики   | 56 |
| 3.3.1. Конструкції ємнісних чутливих елементів  | 57 |
| 3.3.2. Вимірювальні схеми з ємнісними чутливими елементами  | 58 |
| 3.4. Активні електродинамічні датчики   | 59 |
| 3.5. П'єзоелектричні чутливі елементи   | 61 |
| 4. Вимірювання механічних величин   | 63 |
| 4.1. Вимірювання видовжень  | 63 |
| 4.1.1. Тензорезистори   | 63 |
| 4.1.2. Схеми вимірювання з тензорезисторами   | 67 |
| 4.2. Вимірювання переміщення  | 71 |
| 4.2.1. Аналогові датчики переміщення  | 72 |
| 4.2.2. Датчики приросту відстані з стрибкоподібною зміною сигналів  | 72 |
| 4.2.3. Датчики переміщення з цифровим кодуванням  | 73 |
| 4.2.4. Інші методи вимірювання переміщень   | 73 |
| 4.3. Вимірювання кута повороту  | 73 |
| 4.3.1. Аналогові датчики кута повороту пристосовані для вимірювання великих кутових переміщень (до 360° і більше) | 74 |
| 4.3.2. Цифрові датчики кута повороту  | 75 |
| 4.4. Вимірювання частоти обертання і кутової швидкості  | 76 |
| 4.5. Вимірювання сили   | 78 |
| 4.6. Вимірювання обертового моменту і потужності  | 80 |
| 4.7. Вимірювання тиску газу і рідини  | 83 |
| 4.8. Вимірювання коливань   | 86 |
| 4.8.1. Будова та принцип дії датчиків поздовжніх коливань   | 86 |
| 4.8.2. Система з точним настроюванням для вимірювання прискорень  | 87 |
| 4.8.3. Сильно демпферна система для вимірювання швидкості   | 88 |



|  |     |
|--|-----|
| 4.8.4. Датчики прискорення   | 88  |
| 5. Застосування комп'ютерних засобів при проведенні експериментальних досліджень       | 90  |
| 5.1. Основні положення будови віртуального вимірювального комплексу                    | 90  |
| 5.1.1. Інтерфейсні пристрої  | 90  |
| 5.1.2. Програмне забезпечення  | 91  |
| 5.1.3. Точність та швидкодія інтерфейсних приладів                                     | 92  |
| 5.2. Аналого-цифрове перетворення сигналів   | 93  |
| 5.2.1. Сучасні АЦП   | 93  |
| 5.2.2. АЦП послідовного наближення   | 93  |
| 5.2.3. АЦП паралельного наближення   | 97  |
| 5.2.4. АЦП послідовно-паралельного наближення  | 99  |
| 5.3. Створення мобільного вимірювального комплексу на базі ПК                          | 99  |
| 5.3.1. Послідовний порт RS232  | 100 |
| 5.3.2. Паралельний порт LPT  | 103 |
| 5.3.3. Керування через паралельний порт LPT  | 105 |
| 5.3.4. Вхідний підсилювач  | 107 |
| 5.3.5. Робота з АЦП послідовного наближення  | 112 |
| 5.3.6. Програмне забезпечення для роботи з АЦП   | 114 |
| 5.3.7. Робота з АЦП паралельного наближення  | 118 |
| 5.4 Використання інформаційних технологій National Instruments для наукових досліджень | 122 |
| Питання для самоконтролю   | 131 |
| Література   | 133 |

Хмельницький національний університет

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

(Навчальний посібник  
з курсів „Методологія і організація наукових досліджень” та  
„Методи та засоби експериментальних досліджень”)

Керівник видавничих проектів: Ястребов А.О.  
Друкується в авторській редакції  
Дизайн обкладинки: Тишківська Н.М.  
Комп’ютерна верстка: Тишківська Н.М.

Підписано до друку 20.03.2017 р.  
Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Умовн. друк. аркушів — 8,02.  
Обл.-вид. аркушів — 5,18.  
Тираж 300 прим.

ТОВ «Кондор-Видавництво»  
Свідоцтво Серія А01 №376847 від 28.07.2010 р.  
03067, м. Київ, вул.Гарматна, 29/31  
тел./факс (044) 408-76-17, 408-76-25  
[www.condor-books.com.ua](http://www.condor-books.com.ua)