

Лекція 2

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

2.1. Вимірювані величини, засоби і методи їх вимірювань

Процеси обробки металів тиском (ОМТ), супроводжуються зміною розмірів; форми, температури, механічних і інших фізичних властивостей, структури і фазового стану оброблюваного металу, тобто характеризуються вельми великою кількістю геометричних, кінематичних, енергосилових і інших параметрів.

Основні параметри, вимірювані при дослідженні процесів ОМТ - це лінійні розміри, площі і об'єми тіл, що деформуються, їх переміщення, швидкості руху і прискорення, зміни розмірів і площ, виражені в абсолютних і відносних одиницях (абсолютний і відносний обтиск, витяжка і т. д.), кутові величини і переміщення (пластичні зрушення, кути вигину і закручування), кінематичні параметри руху інструменту — переміщення, швидкості і прискорення (лінійні і кутові), час, параметри вібрації (амплітуда, частота, період коливання, коливальні швидкості і прискорення), механічні характеристики і опір деформації оброблюваного металу, сили деформації, напруга на контактній поверхні і в об'ємі осередку деформації, силові чинники в неконтактних зонах (напруга, сили, моменти, що вигинають і крутять), моменти на валах, потужність і робота деформації, температура, стан поверхні досліджуваного об'єкту (колір, шорсткість), його маса, щільність, магнітна проникність, електропровідність, теплоємність, теплопровідність, корозійна стійкість, фазовий стан і цілий ряд інших.

Вибір вимірювального інструменту та апаратури залежать від вимірюваної величини, необхідної точності і зручності користування. Вимірюючи яку-небудь незмінну або мало змінну величину, наприклад діаметр робочої довжини розривного зразка в декількох місцях його

поперечного перетину, застосовують прості інструменти — штангенциркуль, мікрометр або інструментальний мікроскоп. Проте для багатократних вимірювань величин, що змінюються, зручніше використовувати відлічуючі або записуючі прилади і пристрої, які показують підсумковий результат. Якщо необхідна статистична обробка результатів вимірювань якої-небудь однієї величини, що змінюється, бажано застосовувати статистичні прилади або класифікатори. Величини, які швидко змінюються найдоцільніше вимірювати електричними методами із застосуванням малоінерційних реєструючих пристроїв. При функціональному аналізі зв'язків між декількома змінними потрібний їх синхронний запис, який можна здійснити за допомогою світлопроменевого осцилографа, магнітографа, кінозйомки, відео зйомки або їх комбінацій.

Величини, що підлягають вимірюванню, і призначені для цього основні вимірювальні прилади і інструменти приведені в таблиці 1. Велику частину цих приладів виробляє промисловість. Проте у багатьох випадках дослідник повинен сам розробляти схеми вимірювальної апаратури і завдання на її виготовлення. Перевагу при цьому слід віддавати найбільш зручним, досконалим і сучасним — електричним засобам вимірювань неелектричних величин з обробкою результатів з використанням мікропроцесорів.

Для перетворення неелектричних величин у зручну для передачі і сприйняття форму використовують різні фізичні явища, що володіють досить строгими закономірностями. До таких явищ відносяться наступні ефекти:

- 1) резистивний — зміна активного опору металів, напівпровідників і інших провідних середовищ під дією механічної напруги, температури, магнітного поля, світлового і радіоактивного випромінювання і т. д.;

- 2) зміна електричної ємності при зміні проміжку між електродами або діелектричної проникності речовини, що заповнює цей проміжок;

- 3) зміна магнітного опору ланцюгу унаслідок зміни геометричних параметрів або магнітної проникності її елементів під дією механічних

величин і явище електромагнітної індукції при русі провідника в магнітному полі;

4) п'єзоелектричний — електризація кристалічних матеріалів під дією механічної напруги;

5) наведення електричного заряду на електроді, що переміщається поблизу діелектрика, що володіє постійною поляризацією;

6) наведення термо-е. р. с. в електричному ланцюзі з двох різнорідних за матеріалом провідників — термопарі.

Серед інших явищ, використовуваних для перетворення неелектричних величин в електричні, можна назвати електронну, термо- і фотоелектронну емісії, ефект Холу, ядерний магнітний резонанс і ін. Очевидно, що, використовуючи один і той же фізичний ефект, можна перетворювати різні неелектричні величини, а для перетворення однієї неелектричної величини можна використовувати різні фізичні ефекти.

Основні переваги електричних методів вимірювання наступні:

1) можливість безперервно вимірювати або контролювати фізичні величини з одночасною автоматичною реєстрацією результату вимірювання;

2) дистанційність вимірювання;

3) надзвичайно широкий діапазон зміни чутливості приладів;

4) мала інерційність, отже, висока швидкодія приладів;

5) можливість вимірювати (використовуючи засоби обчислювальної техніки) узагальнений показник того або іншого процесу;

6) простота устаткування і малі габарити вимірювальних пристроїв;

7) широка можливість уніфікувати вузли вимірювальної апаратури, застосовуючи стандартні прилади, що серійно випускаються;

8) зручність програмування і автоматизації експериментальних досліджень за допомогою ЕОМ і мікропроцесорів.

Переваги електричних методів вимірювань дають можливість проводити великомасштабні комплексні дослідження для отримання якісно нових даних про процеси і розробки нових технологічних процесів і установок.

Таблиця 2.1 Вимірювані величини і вимірювальні прилади в процесах дослідження ОМТ

Вимірювані величини	Апаратура
Геометричні: довжини, кути, площі, об'єм	Лінійки, щупи, штангенінструменти, мікрометри, нутроміри, мініметри, оптиметри, інтерферометри, індикатори, проектори, мікроскопи, механічні, електричні і пневматичні вимірювальні прилади, планіметри, профілометри, екліметри, тензометри, спеціальні датчики і реєструючі пристрої
Кінематичні: швидкість, прискорення, коливання	Вимірники шляху і часу, лінійної і кутової швидкостей, стробоскопи, тахометри, лічильники оборотів, торсіографи, вібрографи, частотоміри, амплітудоміри, спеціальні датчики і реєструючі пристрої
Динамічні: маса, сила, імпульс сили, робота, момент, потужність Інші величини, час, світлові величини, колір температура, електричні, хімічні, структурні і інші параметри твердих тіл	Терези, імпульсометри, динамометри, гальмівні пристрої, манометри, барометри, індикатори, роботоміри, спеціальні датчики і реєструючі пристрої Годинник, секундоміри, вібраційні і електронні пристрої, фотометри, люксметри, калориметри, хроматографи, спектрометри, термометри, термоелементи, пірометри, омметри, вольтметри, амперметри, ватметри, гальванометри, аналізатори, полярографи, склерометри (Брінелля, Роквелла, Віккерса), склероскопи Шора, віскозиметри, пенетрометри, оптичні мікроскопи, фотоапарати, кінокамери (звичайні і високочастотні), електронний мікроскоп, ультразвукові прилади, радіометрична апаратура (лічильники, камери, приймачі з перелічувальними пристроями і автоматичним записом), осцилографи, рахункові машини, ЕОМ та ін.

2.2. Електричні засоби вимірювань

Технічні засоби, використовувані при електричних вимірюваннях які мають нормовані метрологічні характеристики називаються засобами електричних вимірювань. До їх числа відносяться вимірювальні прилади і перетворювачі, датчики, вимірювальні установки і системи.

Мірою називають засіб, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру. Розрізняють однозначні засоби (опір, ємкість), багатозначні (реостат, конденсатор змінної ємкості) і набори мір (магазини опорів, ємкостей і ін.).

Вимірювальний прилад — засіб вимірювання, призначений для вироблення сигналу вимірюваної інформації (сигналу, функціонально пов'язаного з вимірюваною фізичною величиною) у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Прилади бувають аналогові і цифрові, показуючі і реєструючі (самописці), такі, що підсумовують (ватметри) і інтегруючі (лічильники електроенергії), безпосередньої оцінки і порівняння (мости, потенціометри) і ін. Залежно від призначення прилади ділять на метрологічні, універсальні, виробничі, експлуатаційні і спеціальні. Градуюють прилад в прийнятих одиницях вимірювання фізичної величини, тобто, виготовляючи прилад, використовуючи міру.

Вимірювальний перетворювач є пристроєм, призначеним для вироблення сигналу вимірником інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки і (або) зберігання, але не піддатливою безпосередньому сприйняттю спостерігачем. За допомогою різних вимірювальних перетворювачів можна перетворювати одні неелектричні величини в інших (пружні елементи), неелектричні величини в електричні (тензорезистори, термопари, тахогенератори), електричні в неелектричні (мікросхеми, гальванометри, електромагніти) і, нарешті, електричні в електричні (трансформатори, потенціометри, перетворювачі Хола і т. п.).

Датчиком називається засіб вимірювання, що є конструктивною сукупністю вимірювальних перетворювачів, зокрема перетворювач виду

енергії сигналу, розміщену в зоні дії впливаючих чинників об'єкту і сприймаючу від нього природно закодовану інформацію. По характеру електричних величин, що отримуються на виході, датчики ділять на генераторні та параметричні.

До генераторних відносять датчики, що безпосередньо перетворюють неелектричну величину у відповідні значення напруги, струму, а до параметричних - такі, у яких вихідна величина є зміною якого-небудь параметра електричному ланцюгу - опору, ємкості або індуктивності. Прикладом генераторного датчика може бути термопара, яка перетворює температуру в е. р. с, а параметричного - тензорезистор.

Вимірювальна установка це сукупність вимірювальних приладів, перетворювачів і допоміжних пристроїв, призначену для вироблення сигналів вимірюваної інформації у формі, зручній для сприйняття безпосереднім спостерігачем, і розташовану в одному місці. До складу типової установки для електричного вимірювання неелектричних величин входять (рис. 1): датчик, лінія зв'язку, вимірювальний ланка, підсилювач і реєструючий прилад. Стрілками показаний напрям проходження сигналу x через установку (x називають входом, y – виходом установки).

Датчики, що входять до складу вимірювальних установок, розрізняють по двох основних ознаках; за видом виконуваної функції (датчики сили, датчики переміщення і т. п.) і закладеному в них принципу перетворення неелектричної величини в електричну (ємкісні, індуктивні, п'єзоелектричні і ін.). Обидві ознаки входять у назву датчика, наприклад: ємкісний датчик тиску, індуктивний датчик переміщення і тому подібне.

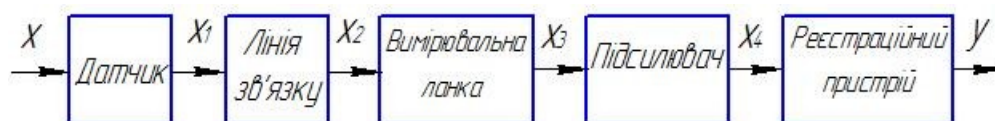


Рис. 2.1 Структурна схема установки для електричного вимірювання неелектричної величини

Необхідним доповненням для всіх параметричних датчиків є вимірювальний ланцюг, в якому зміна електричного параметра датчика, що відбувається під дією впливаючого чинника об'єкту, перетворюється в електричний сигнал. Генераторні датчики також можуть мати вимірювальні ланцюги, що виконують, в основному, погоджувальні функції.

Якщо електрична потужність, що розвивається перетворювачем, недостатня для отримання необхідного відхилення рухомої частини вимірювального приладу, її підсилюють. Підсилювач не є невід'ємною частиною вимірювальної установки і іноді може в ній бути відсутнім (наприклад, при вимірюванні швидкості обертання за допомогою індукційного тахогенератора і чутливого гальванометра). У інших випадках його розбивають на два блоки: попередній підсилювач (катодний або емітерний повторювач) і основний. Це необхідно, наприклад, при великому віддаленні п'єзоелектричних датчиків від решти частини вимірювальної установки, коли довгі кабелі ліній зв'язку можуть стати джерелом перешкод. В цьому випадку катодний перетворювач з великим вхідним і малим вихідним опором мають в своєму розпорядженні поблизу датчика, а лінію зв'язку підключають до низькоомного навантаження перетворювача, не роблячи помітного впливу на передачу сигналу до основного підсилювача. Посилений сигнал поступає на показуючий або реєструючий прилад. Перевагою показуючих приладів є те, що вони видають результат безпосередньо у момент вимірювання, тоді як реєструючі вимагають додаткової ручної або машинної обробки запису. В той же час застосування показуючих приладів допустиме лише для статичних процесів, що поволі змінюються, і стає вельми складним, якщо потрібно одночасно прочитувати декілька параметрів, що змінюються. При необхідності у вимірювальній установці використовують одночасно показуючий і реєструючий прилади.

Реальні вимірювальні установки, окрім показаних на мал. 1, можуть містити і інші складові частини: комутатори для проведення багатоточкових

вимірювань, сигналізатори масштабних і тарифовних міток, джерела живлення та ін.

Вимірювальна система (ВС) є сукупністю засобів вимірювань і допоміжних пристроїв, сполучених між собою каналами зв'язку, призначену для вироблення сигналів вимірюваної інформації у формі, зручній для автоматичної обробки, передачі і (або) використання в автоматичних системах управління. ВС знаходять застосування при великому об'ємі експериментальної інформації, що вимагає автоматизації і програмування досліджень.

2.3 Статичні характеристики засобів вимірювань

Для подальшого викладу введемо деякі визначення:

Вхідна величина x - механічна величина діюча на датчик і перетворювана останнім в електричний сигнал. *Вихідна величина* y - фізична величина, що отримується на виході засобу вимірювання в результаті перетворення, посилення та інших трансформацій. Вона може виразитися у вигляді відхилення стрілки показуючого приладу, відхилення променя осцилографа і тому подібне

Характер вимірюваної величини може бути статичним або динамічним. *Статичним* називають вимірювання в тому випадку, якщо вимірювана величина за час, протягом якого проводять відлік, практично не міняється. Вимірювання називають *динамічним*, якщо за час вимірювання величина істотно міняє своє значення.

Однією з основних характеристик засобу вимірювань є його *статична чутливість*, визначувана як відношення зміни сигналу на виході засобу вимірювань Δy до його зміни вхідної вимірюваної величини Δx , тобто:

$$S = \Delta y / \Delta x. \quad (2.1)$$

При достатньо малих прирощеннях y і x будемо мати:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = dy/dx \quad (2.2)$$

Загальна чутливість засобу вимірювань, що складається з послідовного ряду перетворювачів, залежить від чутливості кожного з перетворювачів. Так, для кожного елементу установки рис. 2.1 можна отримати статичну характеристику, що встановлює функціональний зв'язок між вхідною і вихідною величинами, а ефективність перетворення охарактеризувати чутливістю:

$$S_1 = \Delta x_1 / \Delta x; \quad S_2 = \Delta x_2 / \Delta x_1; \quad \dots; \quad S_5 = \Delta y / \Delta x_4. \quad (2.3)$$

Перемноживши ліві і праві частини цих виразів, отримаємо

$$S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 = \Delta y / \Delta x = S, \quad (2.4)$$

тобто чутливість вимірювальної установки дорівнює похідній чутливостей її елементів.

Поріг чутливості визначають як мінімальну зміну вхідної величини, що викликає помітну зміну вихідної величини.

Межа перетворення — максимальне значення вхідної величини, яке може бути ще сприйняте датчиком без спотворень і без пошкоджень датчика або інших структурних елементів засобу вимірювань.

Динамічним діапазоном вимірювання є діапазон вхідних величин, вимірювання яких відбувається без помітних спотворень і тягнеться від максимального (граничного) значення до мінімального, обмеженого порогом чутливості або рівнем перешкод.

Градувальна характеристика засобу вимірювань — це залежність між значеннями величини на виході і вході, складена у вигляді таблиці, графіка або формули.

Основна похибка - різниця між значеннями вихідної величини, що виміряна і номінальним, визначеним в нормальних умовах. За нормальні умови приймають наступний стан навколишнього середовища: температура $+25 \pm 10^\circ\text{C}$; атмосферний тиск 1000 ± 40 ГПа; відносна вологість $65 \pm 15\%$; вібрації, електричні і магнітні поля відсутні.

Відповідно до ГОСТ 16263-70 під *абсолютною похибкою* розуміють різницю між показами засобу вимірювань і дійсним значенням вимірюваної величини. Так, якщо дійсне значення величини дорівнює x , а виміряне значення x_B то абсолютна похибка Δx визначається за виразом:

$$\Delta x = x_B - x. \quad (2.5)$$

Повнішою характеристикою засобу вимірювань є *відносна похибка* y_x :

$$y_x = \Delta x / x. \quad (2.6)$$

Відносна похибка є функцією вимірюваної величини x , у зв'язку з чим неможливо вказати одиничну точкову характеристику засобу вимірювань, яка б якось характеризувала похибку. Тому вводять поняття *приведеної похибки* y під якою розуміють відношення максимального значення абсолютної похибки $\Delta x_{\max}$ до максимального значення вимірюваної величин $\Delta x_{\max}$ тобто:

$$y = \Delta x_{\max} / x_{\max}. \quad (2.7)$$

При лінійній залежності $y = Sx$ між вхідною x і вихідною y величинами можна записати:

$$\Delta x = \Delta y / S; \quad \Delta x S = \Delta y; \quad \Delta x / x = \Delta y / y = \Delta x_{\max} / x_{\max}, \quad (2.8)$$

де S - коефіцієнт перетворення засобу вимірювань, рівний в даному випадку його чутливості.

По впливу на результуючу точність всі погрішності засобів вимірювань ділять на два самостійні види: похибка нуля і похибка чутливості. Розглянемо докладніше ці дві похибки.

Функцію перетворення засобу вимірювань в загальному вигляді можна представити виразом

$$y = S(x, x_1, x_2, \dots, x_n)x + b(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.9)$$

де $S(x, x_1, x_2, \dots, x_n)$ - коефіцієнт перетворення, в загальному випадку що є функцією вимірюваної величини x і сукупності впливаючих величин $x_1, \dots, x_n$;

$b(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - початкове значення вихідного сигналу (при $x = 0$), в

загальному випадку що також є функцією величин $x_1, \dots, x_n$. У компактнішій формі рівняння (2.9) можна записати як

$$y = Sx + b \quad (2.10)$$

маючи на увазі, що S і b - складні функції багатьох аргументів.

Графічно функція перетворення засобу вимірювань зображається прямою (рис. 2.2). Нахил прямої Sx відповідає чутливості (коефіцієнту перетворення) засобу вимірювань.

При зсуві нульового положення (рис. 2.2, а) рівняння перетворення (2.10) можна записати у вигляді

$$y = Sx \pm y_0 \quad (2.11)$$

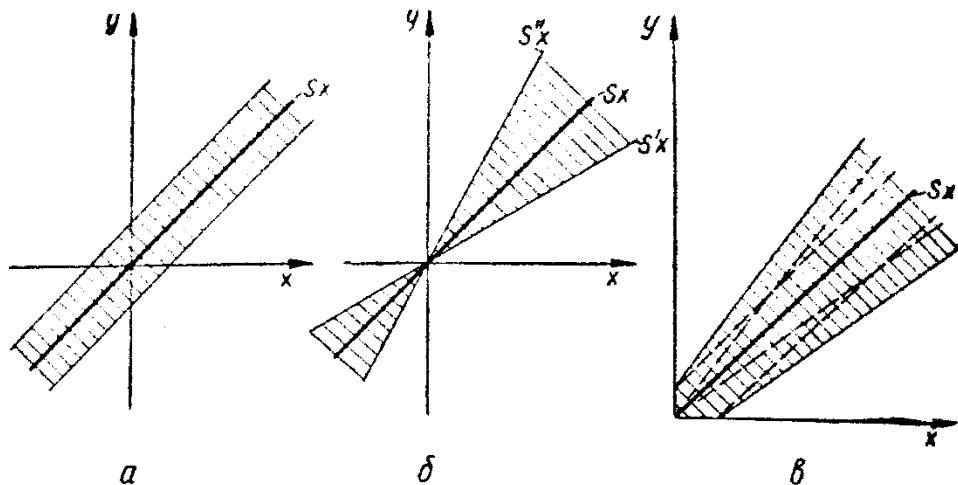


Рис. 2.2 Области невизначеності результатів вимірювань за рахунок аддитивної (а), мультиплікативної (б) погрешностей і їх сумісного прояву (в)

Отже, при $x=0$ ордината $y=\pm \Delta y_0=b$. З рівняння (2.11) виходить, що помилки такого роду не залежать від вхідної величини. По сталій термінології їх називають *адитивними*, тобто отриманими в результаті складання. Похибка такого роду утворює зону невизначеності в результаті

зсуву статичної характеристики вгору або вниз на величину Δy_0 без зміни форми і нахилу цієї характеристики.

Середня лінія Sx на рис. 2.2 є статичною характеристикою засобу вимірювань для нормальних зовнішніх умов. Похибка від зміни чутливості приводить до зміни нахилу статичної характеристики (а в загальному випадку і її форми), причому цей нахил може змінюватися як в один, так і в інший бік від градуовальної характеристики (рис. 2.2, б). Область, обмежена прямими $S'x$ і $S''x$, є *областю невизначеності*. Якщо абсолютне значення зміни чутливості буде: $\Delta S_x = S - S'$ або $\Delta S_s = S - S''$ то абсолютна похибка вимірювання в цьому випадку виразиться рівністю:

$$\Delta y_s = \Delta S_x x. \quad (2.12)$$

Помилка вимірювання, як очевидно, пропорційна вхідній величині. Такі похибка називають *мультіплікативними*, тобто отриманими в результаті множення.

На практиці майже завжди мають місце обидва види похибок (рис. 2.2, в). При цьому функція перетворення засобу вимірювань має вигляд:

$$y = S(1 \pm \Delta S_x) x \pm \Delta y_0; \quad (2.13)$$

поточне значення абсолютної похибки $\Delta y = \Delta y_s + \Delta y_0$; поточне значення відносної похибки $\gamma = \Delta S_x + \Delta y_0 / x$.

Узагальнена метрологічна характеристика засобу вимірювань - клас точності. Він визначає межі всіх похибок, що допускаються, а також всі інші властивості, що впливають на точність засобу вимірювань. Для засобів вимірювань, межі похибок що допускаються, виражають у вигляді відносних або приведених похибок. ГОСТ 13600-68 встановлює наступний ряд чисел: $1 \cdot 10^{-n}$; $1,5 \cdot 10^{-n}$; $2 \cdot 10^{-n}$; $2,5 \cdot 10^{-n}$; $4 \cdot 10^{-n}$; $5 \cdot 10^{-n}$; $6 \cdot 10^{-n}$ де $n = 1; 0; -1; -2$ і тому подібне. Числа цього ряду і дають позначення класів точності. Для засобів вимірювань, у яких основну похибку нормують у вигляді межі приведеної похибки, клас точності чисельно дорівнює цій межі, тобто γ .

Відхилення рухомої частини приладу y є функцією не тільки вимірюваної величини x , але і інших побічних невимірюваних величин: температури t° , напруга живлення U і ін.:

$$y=f(x,t^\circ,U,...) \quad (2.14)$$

Під час вимірювань побічні величини можуть змінюватися. Якщо ці зміни малі, то

$$\Delta y = (\partial f / \partial x) \Delta x + (\partial f / \partial t^\circ) \Delta t^\circ + (\partial f / \partial U) \Delta U + \dots = S \Delta x + (\partial f / \partial t^\circ) \Delta t^\circ + (\partial f / \partial U) \Delta U + \dots \quad (2.15)$$

Часткові похідні $\partial f / \partial t^\circ \dots$ є чутливості засобу вимірювань до побічних величин. Очевидно, що вплив змін побічних величин $\Delta t^\circ, \Delta U \dots$ на відхилення y буде тим менше, чим більше чутливість засобу вимірювань до вимірюваної величини x .

Додаткова похибка - це погрішність, що викликається зміною зовнішніх умов. Вона є відносною зміною вихідної величини у відсотках, віднесеною до зміни зовнішнього чинника на певну величину (наприклад, температурна похибка 2,5% на 10°C і т. п.).

Відповідно до характеру причин виникнення додаткові похибки можна розділити на систематичні і випадкові.

Систематичні похибки - це похибки, що мають детермінований функціональний зв'язок з джерелом, що їх викликає, причому і сама функція і її аргумент відомі.

Випадкові похибки - похибки, поява яких викликана сукупною дією декількох впливаючих (що дестабілізують) чинників, функціональний зв'язок яких з джерелом похибок не можна виявити через їх невідомість і велику кількість. Чіткі межі між цими видами похибок провести досить складно, оскільки в різних вимірювальних ситуаціях похибки можуть перерозподілитися між розглянутими групами. Так, якщо датчик тиску експлуатують в широкому діапазоні температур і його температурна характеристика відома, то похибка від зміни температури вважають за систематичну і її однозначно можна враховувати за наслідками вимірювань.

Якщо ж температура невідома і змінюється випадково, то ввести поправку неможливо. В цьому випадку температурна похибка датчика переходить в розряд випадкових.

2.4 Динамічні характеристики засобів вимірювань

Для вимірювання динамічної величини з певною точністю потрібно, щоб засіб вимірювань задовольняв умовам вимірювання не тільки по статичних похибках, але і по динамічних. Останні виявляються у вигляді спотворення форми записуваного графіка вимірюваної величини і викликані інерцією приладу.

Інерційні властивості засобів вимірювань прийнято оцінювати за виглядом запису стандартних законів зміни в часі вимірюваної величини - стрибкоподібного або гармонійного.

При стрибкоподібному законі вимірювана величина миттєво набуває постійного значення x_0 (рис. 2.3, а). Закон зміни відхилення у рухомої частини приладу при стрибкоподібному законі зміни вимірюваної величини x називається *перехідною* (тимчасовою) *характеристикою засобу вимірювань*. Можливі характеристики засобу вимірювань залежно від його конструктивних особливостей приведені на рис. 2.3, б - г. Конструюючи прилад або установку, прагнуть забезпечити процес такою перехідною характеристикою, при якій відхилення у досягає сталого значення $y_0 = Sx_0$ за мінімальний час $t_{\text{зап}}$ (час запізнювання).

Динамічні властивості засобів вимірювань, для яких характерний періодичний затухаючий перехідний процес (рис. 2.3, г), математично описуються диференціальними рівняннями другого порядку. Так, рух механічної системи, на яку діє величина $P(t)$ і де вихідною є величина $x(t)$ описують рівнянням:

$$m(\partial^2 x / \partial t^2) + F(\partial x / \partial t) + W_x = P(t) , \quad (2.16)$$

де m - рухома маса системи; x - переміщення; F - коефіцієнт заспокоєння; W - жорсткість; $P(t)$ - збурююча сила. При обертальному русі рухомої частини, коли вхідною дією є момент $M(t)$, а вихідний кут повороту $\alpha(t)$ диференціальне рівняння руху має вигляд:

$$J(\partial^2 \alpha / \partial t^2) + F(\partial \alpha / \partial t) + W\alpha = M(t), \quad (2.17)$$

де J -момент інерції рухомої частини.

Рис. 2.3 Г

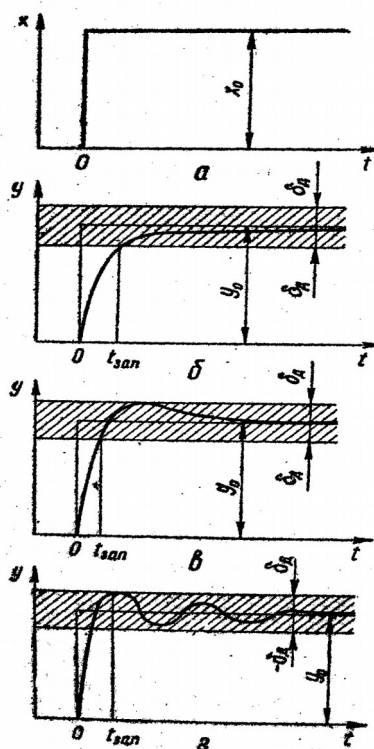
Для послідовного
диференціальне рівняння

$$L(\partial^2$$

де q - поточне значенн

У операторній форм

$$m[p^2 x($$



гу (а) і перехідні
, в, г)

ідною величиною $U(t)$

$$(2.18)$$

и так:

$$(2.19)$$

звідки

$$S(p) = x(p)/P(p) = 1/m(p^2 + hp + \omega_0^2), \quad (2.20)$$

де $F/m = h$; $W/m = \omega_0^2$.

При синусоїдальній дії $P(t) = P_{\max} \sin \omega t$ зв'язок між комплексами вхідної P і вихідної x величин можна описати співвідношенням:

$$S = x/P = 1/m(\omega_0^2 - \omega^2 + jh\omega), \quad (2.21)$$

де S - чутливість коливальної системи.

Виразимо співвідношення $\omega_0/h = Q$ і $h/2\omega_0 = \beta$ через початкові параметри коливальної ланки:

$$Q = \sqrt{mW/F}; \quad \beta = F/2\sqrt{mW}. \quad (2.22)$$

Тоді у відносних одиницях частоти ($\omega/\omega_0 = \lambda$) комплексну чутливість коливальної системи другого порядку можна охарактеризувати залежністю

$$S = 1/W(1 - \lambda^2 + j2\beta\lambda). \quad (2.23)$$

Вирази часткової і фазової характеристик відповідно мають вигляд:

$$|S| = |x|/|P| = 1/W \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\beta\lambda)^2}; \quad (2.24)$$

$$\phi = \arctg[2\beta\lambda/(1 - \lambda^2)]. \quad (2.25)$$

Оскільки при $\lambda = 0$ величина $|S| = S_0 = 1/W$ можна записати частотну характеристику у відносних координатах по обох осях:

$$M = 1/\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\beta\lambda)^2}, \quad (2.26)$$

де M - відносний коефіцієнт передачі, чисельно рівний відношенню коефіцієнта передачі на частоті ω до коефіцієнта передачі на частоті $\omega = 0$.

Такий запис зручний тим, що в цей вираз не входить жоден параметр ланки. Тому вираз (2.26) описує у відносних координатах λ і β коливальні ланки з будь-якими m, F, W .

Типове сімейство частотних характеристик для коливальних ланок другого порядку з різним ступенем заспокоєння приведено на рис. 2.4, а. Помітно, що такі ланки перетворюють сигнал без динамічної погрішності тільки при $\lambda = 0$, тобто при частоті $\omega = 0$. Із зростанням частоти відповідно зростає і погрішність перетворення. Її можна оцінити як різницю між фактичним значенням відносного коефіцієнта передачі M і одиницею:

$$\gamma_t = 1 - M = 1 / \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\beta\lambda)^2} - 1 \quad (2.27)$$

Залежність фазових спотворень (зрушення фаз) від частоти називається *фазочастотною характеристикою засобу вимірювань*. Для коливальної системи з однією мірою свободи такі характеристики показані на рис. 2.4, б. Із зменшенням сили опору криві прагнуть до граничної кривої, що зазнає розриву в точці $\lambda = 1$ тобто при резонансі.

Якщо значення λ незначне, то при $\omega < \omega_0$ вимушені коливання майже збігаються по фазі із зовнішньою силою, а при $\omega > \omega_0$ знаходяться з нею в протифазі.

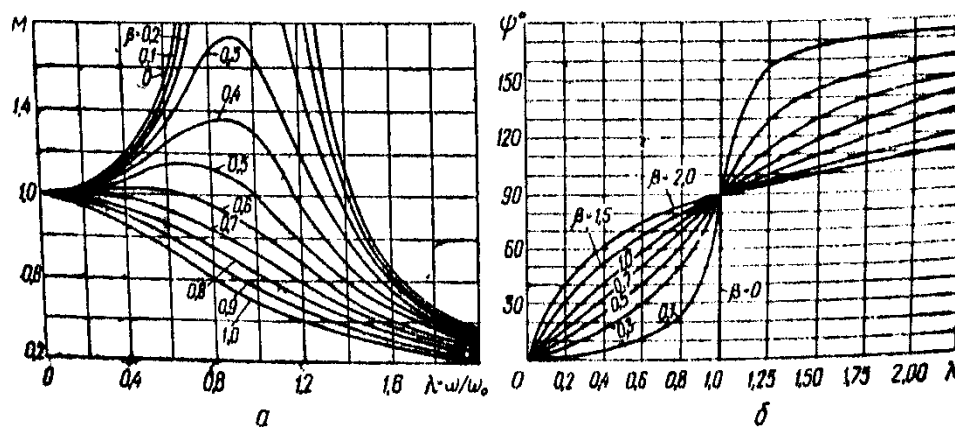


Рис. 2.4 Частотні (а) і фазочастотні (б) характеристики системи, що містить коливальні ланки другого порядку вимірювань

З викладеного ясно, що, маючи засоби амплітудно-частотними і фазочастотними характеристиками завжди можна вибрати засіб вимірювань, що задовольняє умовам вимірювання із заданою допустимою динамічною погрішністю. Але для цього потрібно знати частоту або спектр частот вимірюваного процесу. В

деяких випадках досить визначити максимальну частоту процесу, що можна зробити на основі гармонійного аналізу графіка процесу.

Для неспотвореного запису процесу $x(t)$ з максимальною частотою $\omega_{\max}$ потрібно, щоб прилад в діапазоні частот від нуля до $\omega_{\max}$ мав амплітудно- і фазочастотну характеристики, близькі до ідеальних (амплітудне спотворення, що допускаються, не більше 10%). Цей діапазон частот, в межах якого динамічна погрішність приладу не перевищує допустимого значення δ_d (див. рис. 2.3) називають *смугою пропускання частот*. Чим ширше смуга пропускання частот U приладу, тим менше його інерційність, тим більше швидкі зміни вимірюваної величини можна записати без спотворень.

2.5. Структурні схеми засобів вимірювань

Будь-який засіб вимірювань перетворить ту або іншу вимірювану величину у відповідні числові відліки, що дозволяє судити про її значення. При цьому сигнал, що несе інформацію про значення вимірюваної величини, до отримання потрібного вихідного сигналу зазвичай зазнає декілька перетворень. Отже, структуру кожного засобу вимірювань можна представити у вигляді ланцюга вимірювальних перетворювачів, що трансформують сигнали різної фізичної природи. Вимірювана величина поступає на вхід першого вимірювального перетворювача, званого вхідним або первинним, його вихідна величина є вхідною для другого вимірювального перетворювача і так далі. Перетворення здійснюється до тих пір, поки на виході останнього вимірювального перетворювача не буде отримана вихідна величина, зручна для передачі, посилення, виміру або реєстрації електричними засобами.

Вхідні в засіб вимірювань перетворювачі розрізняються насамперед фізичними основами вимірюваної величини. Так, вхідною величиною стрижньового пружного елемента є сила, а вихідний — деформація пружного елемента. Між собою ці дві величини зв'язані відповідно до закону Гуку:

$$\varepsilon = P/sE, \quad (2.28)$$

де P - сила (вхідна величина пружного елементу); ε - відносна деформація (вихідна величина пружного елементу); E — модуль подовжньої пружності. Перетворити деформацію пружного елементу на електричний сигнал можна за допомогою резистивних, ємкісних, індуктивних, п'єзоелектричних і інших перетворювачів.

Представляючи датчики для електричного вимірювання неелектричних величин у вигляді послідовного ланцюга вимірювальних перетворювачів, можна встановити, що більшість датчиків сил, деформацій, моментів і інших механічних величин мають практично однакову структурну схему. Так, в структурній схемі тензорезисторного датчика сили (рис. 2.5, а) вимірювана сила P пружним елементом перетвориться в деформацію Δl яка сприймається

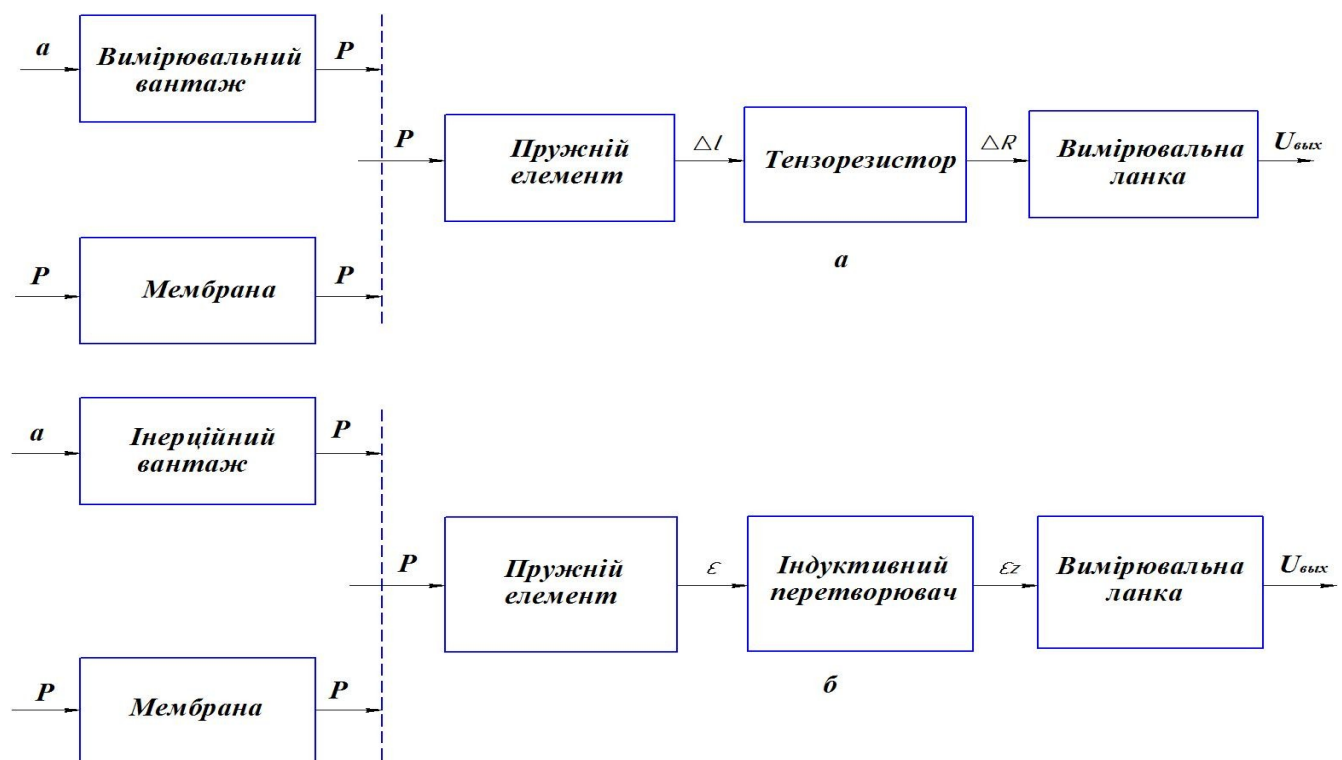


Рис. 2.5 Структурні схеми датчиків сили:

а - тензорезисторного; б - індуктивного

тензорезистором і перетвориться в зміну ΔR опору тензорезистора. Це зміна у вимірювальному ланцюзі перетвориться у вихідну напругу $U_{\text{вых}}$.

Заміна вимірювального перетворювача резистора, наприклад, індуктивним дозволяє отримати іншу обширну групу датчиків - індуктивних (рис. 2.5, б). Подібну структурну схему можуть мати і датчики з іншими принципами перетворення механічної величини в електричну - ємкісні, реостатні, магнітопружні і різного типу генераторні перетворювачі.

Розглядаючи фізичні процеси у всіх відомих вимірювальних перетворювачах, можна, в кожному випадку встановити зв'язок між вихідною і вхідною величинами:

$$y=f(x). \quad (2.29)$$

Математичний (або графічний) опис цього зв'язку носить назву *функції*. Аналогічна характеристика для засобу вимірювань в цілому називається *функцією перетворення засобу вимірювань*.

Залежно від виду зв'язку між окремими вимірювальними перетворювачами розрізняють два основні види структурних схем засобів вимірювань — *прямого перетворення і перетворення, що врівноважує* (компенсаційного).

Засіб вимірювань, виконаний відповідно до структурної схеми рис. 2.6, а, є засобом вимірювань прямого перетворення. Його чутливість визначається твором чутливості окремих перетворювачів $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ і може бути знайдена як відношення вихідної величини до вхідної (для лінійної функції перетворення):

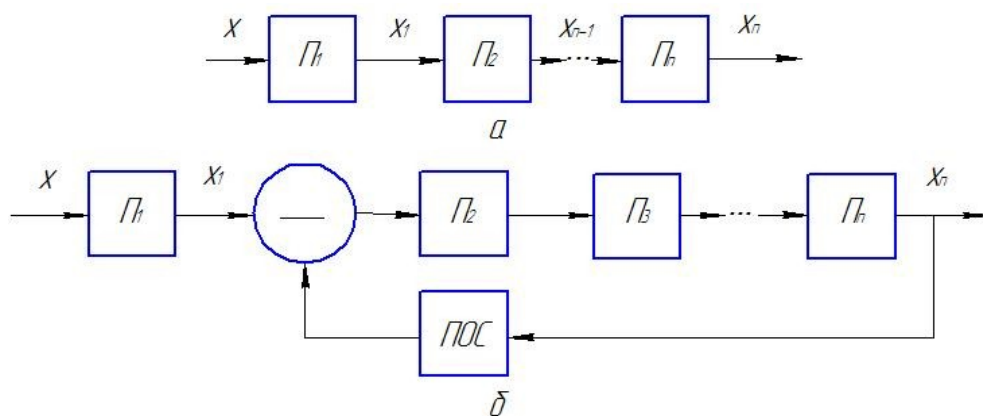


Рис. 2.6 Структурні схеми засобів вимірювань: а – прямого перетворення; б – перетворення зрівноважуючого

$$S = S_1 S_2 \dots S_n = y/x. \quad (2.30)$$

Останнім часом все ширше упроваджуються в практику засоби вимірювань врівноважуючого перетворення (рис. 2.6, б). Їх відмітна особливість полягає у тому, що разом з ланцюгом прямої трансформації в них є і зворотний ланцюг. Він включає перетворювач зворотного зв'язку (ПЗЗ) зі чутливістю β і може в загальному випадку складатися з декількох вимірювальних перетворювачів та охоплювати будь-яке бажане число перетворювачів, що стоять в ланцюзі прямого перетворення. Це додатковий ланцюг забезпечує перетворення вихідної величини прямого перетворення в однорідну з вхідною величиною (частіше - електричною в неелектричну).

Функція перетворення ділянки ланцюга із зворотним зв'язком (рис.2.6, б).

$$y_i = S_0 x_1 / (1 + S_0 \beta) = S_y x_1,$$

де $S_y = S_0 / (1 + S_0 \beta)$ - чутливість ланцюга врівноважуючого перетворення; $S_0 = S_2 S_3 \dots S_n$ - чутливість ланцюга прямого перетворення, охопленим ланцюгом зворотного перетворення; β - чутливість зворотного перетворення.

Введення в структурну схему зворотного перетворювача зменшує погрішність ланцюга прямого перетворення. При $S_0 \beta > 1$ погрішність ланцюга врівноважуючого перетворення визначається тільки погрішністю ланцюга зворотного перетворення, тому ланцюг β має бути дуже стабільною.