

С. Б. Кочук, А. Г. Кислий

**ОБЛАДНАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ**

2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

С. Б. Кочук, А. Г. Кислий

**ОБЛАДНАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ**

Конспект лекцій

Харків «ХАІ» 2021

УДК 681.586(075.8)
К75

Рецензенти: канд. техн. наук, доц. С. Ю. Маренич,
канд. техн. наук, доц. О. М. Литвяк

Кочук, С. Б.

К75 Обладнання автоматизованих технологічних та виробничих процесів [Електронний ресурс] : консп. лекцій / С. Б. Кочук, А. Г. Кислий. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 93 с.

Розглянуто основи побудови об'єктів автоматизації з детальним описом їх інформаційних систем – датчиків інформації. Наведено матеріали лекцій до перших розділів курсів з автоматизації виробничих і технологічних процесів різних галузей промисловості. Описано приклади побудови типових датчиків авіаційних систем, що можуть бути використані при вивченні спеціалізованих дисциплін з авіоніки та авіаційного транспорту.

Для студентів, що навчаються за фахом «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва».

Іл. 69. Табл. 2. Бібліогр.: 19 назв

УДК 681. 586(075.8)

© Кочук С. Б., Кислий А. Г., 2021
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2021

ПЕРЕДМОВА

Вимірювання фізичних величин зустрічається дуже часто як у побутових, так і промислових цілях. Інформаційне забезпечення виробничих та технологічних процесів дозволяє поширити їх автоматизацію, підвищити продуктивність праці та якість продукції.

Датчики є однією із складових частин інформаційних систем на рівні з обчислювальними пристроями та інтерфейсами.

У посібнику розглянуто теоретичні питання вимірювань фізичних величин. Основну увагу приділено поясненню принципів будови датчиків, їх місцю в системах керування та впливу на характеристики автоматизованих систем.

Математичний опис датчиків також має відображати фізичні процеси вимірювань, їх статичні та динамічні характеристики, вплив зовнішніх факторів та похибок на точність вимірювань. Тому в посібнику пояснюються математичні основи опису датчиків, можливість використання схем заміщення датчиків при проектуванні систем автоматизації.

Матеріали лекцій стосуються в основному інформаційних систем, тому багато уваги приділено схемам підключення датчиків, методам перетворення різних фізичних величин на електричні сигнали. Наведено приклади розрахунку схем підключення.

Описано принципи побудови типових датчиків авіаційних систем, що можуть бути використані при вивченні спеціалізованих дисциплін з авіоніки та основ авіаційно-космічної техніки.

1. ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Склад систем автоматики

Системи автоматики призначені для отримання інформації про хід керованого процесу, її оброблення і використання при формуванні керувальних впливів на процес [1].

Системи автоматичного керування (САК) призначені для керування роботою тих чи інших технічних агрегатів або тими чи іншими процесами.

Технічні засоби, за допомогою яких побудовані автоматичні системи, називаються *елементами автоматики*.

Робота будь-якого технічного агрегату або хід технологічного процесу характеризуються різними фізичними величинами, наприклад температурою, тиском, швидкістю, витратою речовини. Ці величини мають підтримуватися на заданому рівні або змінюватися за заданим законом. За допомогою системи автоматичного регулювання (САР) автоматично вирішуються завдання змінення будь-якої фізичної величини за необхідним законом. Фізична величина, що підлягає регулюванню (зміненню за заданим законом) в САР, називається *регульованою величиною*, а технічний агрегат, в якому здійснюється автоматичне регулювання, керування — *об'єктом регулювання*. Автоматичне регулювання є окремим випадком автоматичного керування. Мета керування у цьому випадку якраз і полягає в забезпеченні необхідного закону змінення регульованої величини.

Позначимо через $y(t)$ функцію, що описує змінення у часі регульованої величини. Через $g(t)$ позначимо функцію, що характеризує необхідний закон її змінення. Величину $g(t)$ будемо називати заданою дією. Тоді основне завдання автоматичного регулювання зводиться до забезпечення рівності $y(t) = g(t)$. Більшість САР вирішують це завдання, використовуючи принцип регулювання за відхиленням.

Виробничі і технологічні процеси як об'єкти автоматизації складаються з типових елементів або пристроїв: вимірювальних пристроїв — датчиків інформації (ДІ), виконавчих механізмів (ВМ) — приводів і керуючого пристрою (КП) — регулятора. Зв'язок між зазначеними пристроями і об'єктом автоматизації (ОА) зображено на рис. 1.1.

Розглянемо суть принципу регулювання за відхиленням. Регульована величина $y(t)$ вимірюється за допомогою датчика ДІ і надходить на елемент порівняння у складі КП, де формується сигнал неузгодженості або помилки $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$. Цей сигнал надходить на підсилювач (П) і потім подається на ВМ, який і робить регульовальний вплив на ОА. Цей вплив буде змінюватися до тих пір, поки регульована величина $y(t)$ не дорівнюватиме заданій $g(t)$. На ОА постійно впливають різні фактори: навантаження об'єкта, зовнішні фактори та ін.

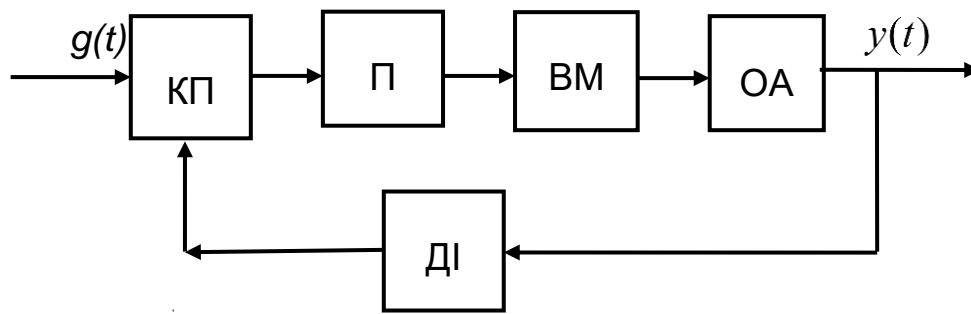


Рис. 1.1. Система автоматичного регулювання

Ці впливи прагнуть змінити величину $y(t)$. Але САР постійно визначає відхилення $y(t)$ від $g(t)$ і формує керувальний сигнал, який намагається звести це відхилення до нуля. За своїм призначенням елементи, що входять до складу систем автоматики, поділяють на *чутливі, підсилювальні і виконавчі*.

Датчики є чутливими елементами. Вони вимірюють регульовану величину об'єкта регулювання і виробляють на виході сигнал, пропорційний цій величині. Вхідною величиною датчика може бути будь-яка фізична величина: механічне переміщення, температура, тиск, витрата, вологість, зусилля та ін.

Датчики також можуть використовуватися для формування заданого впливу. Вхідний сигнал у цьому випадку може надходити від будь-якого механічного надавача, яким керує оператор, з носія інформації за заданою програмою, від керувальної обчислювальної машини. Порівняння регульованої та заданої величин здійснюється в елементі порівняння, яким є вимірювальна схема, що формує сигнал помилки (відхилення). Отриманий сигнал помилки зазвичай недостатній за потужністю для створення регульовального впливу, тому його необхідно посилити. Для цього є підсилювальні елементи. Виконавчі елементи впливають на об'єкт регулювання в напрямку відновлення належного значення регульованої величини. Зазвичай такий вплив полягає в переміщенні будь-якого органу регулювання — заслінки, клапана і т. д.

У системах автоматики розрізняють *послідовне* (рис. 1.2) та *паралельне* (рис. 1.3) з'єднання елементів, а також *з'єднання зі зворотним зв'язком* (рис. 1.4). При послідовному з'єднанні вихідний сигнал одного елемента є вхідним сигналом для наступного елемента. При паралельному з'єднанні один і той же сигнал є вхідним для двох елементів, а їх вихідні сигнали підсумовуються. Загальний коефіцієнт перетворення двох послідовно з'єднаних елементів ланцюга дорівнює добутку коефіцієнтів перетворення цих елементів: $K_{zar} = K_1 K_2$. Загальний коефіцієнт перетворення двох паралельно з'єднаних елементів дорівнює сумі коефіцієнтів перетворення кожного з цих елементів: $K_{zar} = K_1 + K_2$.

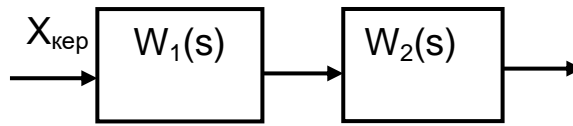


Рис. 1.2. Послідовне з'єднання елементів

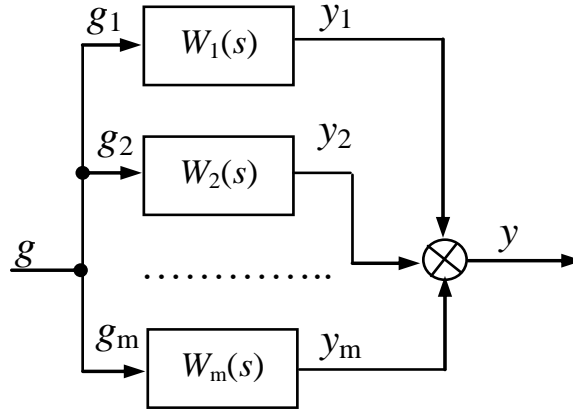


Рис. 1.3. Паралельне з'єднання елементів

При з'єднанні зі зворотним зв'язком вихідний сигнал одного елемента подається на його вхід через елемент зворотного зв'язку. На рис. 1.4. показано з'єднання зі зворотним зв'язком. Колом, розділеним на чотири сектори, показано пристрій, в якому відбувається підсумовування сигналів. Якщо сектор замальовано чорним, то сигнал, який надходить, береться зі знаком мінус. Залежно від знака сигналу зворотного зв'язку розрізняють *позитивний* і *негативний* зворотні зв'язки. На рис. 1.4, а показано з'єднання з позитивним зворотним зв'язком, на рис. 1.4, б — з негативним зворотним зв'язком. Елемент 1 підключено в прямий ланцюг, елемент 2 — у зворотний. Можна сказати, що елемент 1 охоплений зворотним зв'язком. Розглянемо коефіцієнт перетворення при з'єднанні зі зворотним зв'язком. На вхід елемента 1 поступає вхідний сигнал $x_1 = x_{\text{вх}} \pm y_2$, де знак «+» відповідає позитивному зворотному зв'язку, а знак «-» негативному.

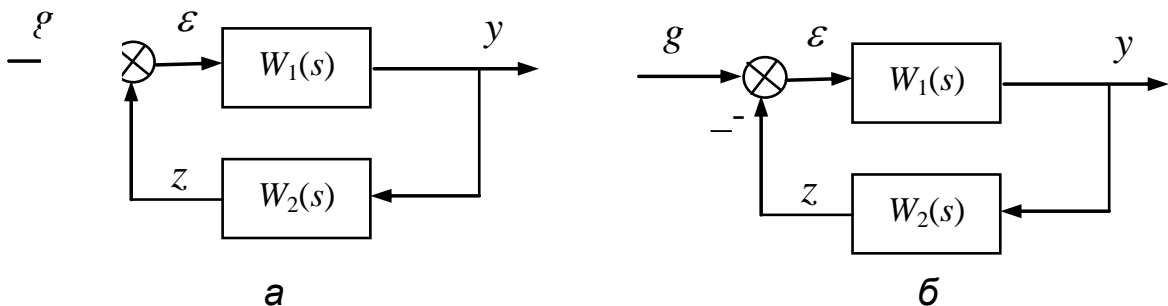


Рис. 1.4. З'єднання елементів зі зворотним зв'язком

Системи автоматики можуть бути побудовані з використанням сигналів різної фізичної природи: електричних, механічних, пневматичних, гідравлічних. Найбільшого поширення набув електричний сигнал: його зручно передавати на

відстань, обробляти і запам'ятовувати, перетворювати на інші види сигналів. Тому електричні елементи автоматики набули найбільшого розповсюдження.

Одним з основних і найважливіших видів електричних елементів є електромеханічні й магнітні елементи, які використовують електричні та магнітні явища. Переважна більшість різних неелектричних величин може бути перетворена на електричний сигнал за допомогою електромеханічних і магнітних датчиків. Посилення електричних сигналів може бути забезпечено за допомогою магнітних або релейних підсилювачів, побудованих на електромагнітних реле. Нині в основному використовуються напівпровідникові підсилювачі.

Як виконавчі елементи використовують різні типи приводів: електричний, пневматичний, гідравлічний та їх комбінації.

1.2. Поняття датчика інформації

Датчики набули широкого поширення не тільки в засобах вимірювання, але й у різних пристроях керування, сигналізації, охорони, виявлення різних об'єктів. Датчик як первинний вимірювальний перетворювач не тільки дає інформацію, а й сприймає вимірювану вхідну величину від об'єкта вимірювання. Отже, в датчику реалізуються три процеси: *сприйняття* вхідної фізичної величини, її *перетворення* на проміжну (або ж відразу на вихідну) величину тієї ж фізичної природи, *формування* вимірювального сигналу, що передається вздовж вимірювального ланцюга, що сполучається з датчиком.

Датчик — це вимірювальний перетворювач, що сприймає вхідну величину і формує еквівалентний їй в інформаційному сенсі вимірювальний сигнал.

Датчик — відокремлена, часто винесена до об'єкта дослідження конструкція, віддалена від решти вимірювальної апаратури (системи керування).

Датчик — компактний, конструктивно оформлений окремий елемент.

У вимірювально-інформаційній техніці за рубежом використовують кілька термінів, що відображають особливості виконання функцій сприйняття і формування вимірювальних сигналів: *sensor, gange* (англ.), *Geber, Primarmessumformer* (нім.), *Transducteur de mesure* (франц.). Термін «сенсор» вже давно «просочився» на сторінки вітчизняних наукових публікацій. Нині склалося таке становище, що термін «датчик» і «сенсор» використовуються для позначення вимірювального перетворювача, що виконує функції сприйняття вхідної величини і формування вимірювального сигналу.

Поняття **датчик** необхідно відрізнити від поняття **перетворювач**.

Перетворювач конвертує один тип енергії в інший, тоді як датчик перетворює будь-який тип енергії зовнішнього впливу на електричний сигнал. Перетворювачі можуть виконувати функцію приводу. Привід можна визначити як пристрій, протилежний датчику, оскільки він зазвичай перетворює електричну енергію на неелектричну. Прикладом є електродвигун. Датчик може складатися з декількох вимірювальних перетворювачів ВП (рис. 1. 5.), вони перетворюють різні види енергії.

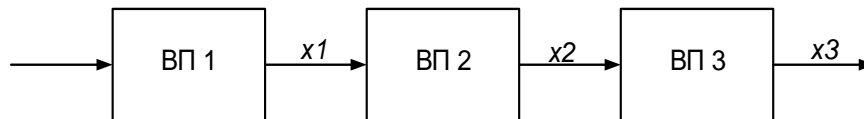


Рис. 1.5. Структура типового датчика

Крім чутливого елемента у вимірювальний ланцюг можуть входити підсилювачі, подільники, фільтри, модулятори, а також інші пристрої перетворення вимірювального сигналу. Застосовуються також уніфікуючі (нормалізуючі) перетворювачі, які зводять сигнали датчиків до встановлених норм. На рис. 1.6. показано зв'язок між біологічними та технічними системами.

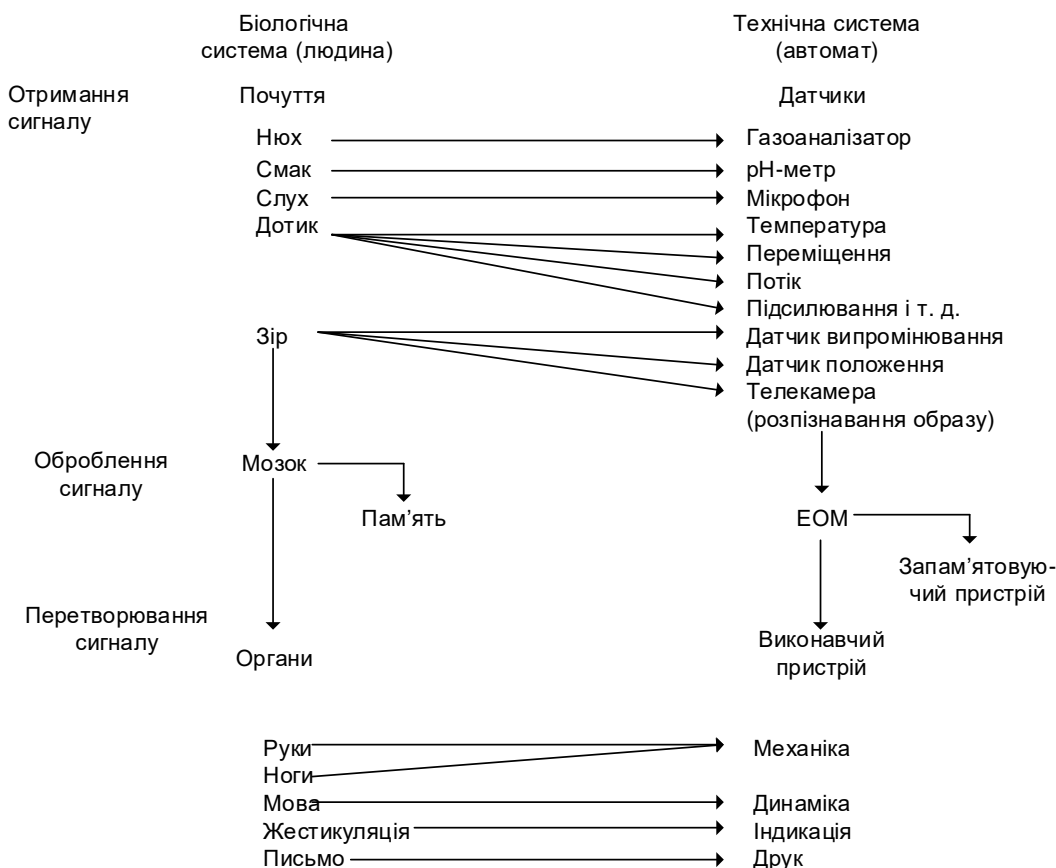


Рис. 1.6. Зв'язок між біологічними та технічними системами

Таким чином, під датчиком слід розуміти конструктивно відокремлену сукупність первинних вимірювальних перетворювачів, що сприймають одну або кілька вхідних величин і перетворюють їх на вимірювальні сигнали.

1.3. Структура датчика інформації

Датчик будь-якої фізичної величини X являє собою пристрій, який безпосередньо сприймає цю величину і перетворює її на вид, зручний для використання в системах виміру автоматичного регулювання і керування.

У загальному випадку датчик складається з чутливого (сприймального) елемента ЧЕ, передавального ПМ і підсилювального П механізмів, коригувальних пристроїв КП, вихідного перетворювача ВП. Функціональну схему типового датчика авіоніки показано на рис. 1.7.

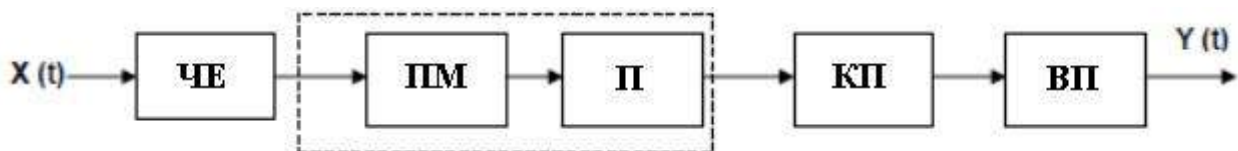


Рис. 1.7. Структура датчика інформації

У конкретних випадках будь-які з елементів загальної функціональної схеми датчика можуть бути відсутніми або один елемент може виконувати кілька функцій. Часто роль датчика може виконувати елемент, який є вихідним перетворювачем на загальній схемі (потенціометр, індуктивність, шунт амперметра і т. п.).

Чутливий, або сприймальний, елемент ЧЕ безпосередньо сприймає величину $X(t)$ і здійснює її первинне функціональне перетворення (тобто перетворення величини X на пропорційне переміщення, на змінення величини електричного опору, ємності, індуктивності, сили струму і т. д.).

Передавальний механізм ПМ і підсилювач П (часто конструктивно об'єднані) забезпечують відповідно передачу і посилення вихідної величини чутливого елемента вихідного перетворювача ВП датчика.

Коригувальний пристрій КП здійснює корекцію результатів функціонального перетворення чутливого елемента з метою усунення методичних похибок.

Вихідний перетворювач ВП забезпечує вторинне перетворення величини $X(t)$ на вигляд, зручний для її безпосереднього використання $Y(t)$.

1.4. Класифікація датчиків

Розрізняють датчики, основані на різних принципах дії (електричних, акустичних та ін.), іноді для класифікації використовуються структурні і функціональні ознаки, що характеризують датчики.

Активна (енергетична) вхідна величина може сприйматися безпосередньо. Для сприйняття ж властивостей пасивного датчика (в енергетичному сенсі) йому необхідно надати енергетичних властивостей, наприклад, пропустити через опір струм і отримати як параметр напругу, що утворилася на його опорі. Таким чином, можна виділити активні (генераторні) і пасивні (параметричні) датчики.

Класифікаційною ознакою також може бути характер вихідного сигналу датчика. Вихідний вимірювальний сигнал датчика може бути промодульований різним способом. Можуть бути використані амплітудна (АМ), частотна (ЧМ), фазова (ФМ) модуляції. Сигнал може бути поданий у безперервній, імпульсній або цифровій формі.

На вході датчиків можуть діяти фізичні величини, які вимірюються безпосередньо, або їх складові (при виконанні непрямих вимірювань). Енергетичні властивості вхідних величин дозволяють поділяти датчики на активні і пасивні. В активних датчиках вхідні величини мають енергетичну природу, в пасивних — неенергетичний (матеріальний) параметр.

Активними вхідними величинами є параметри енергії: електричної, магнітної, теплової, механічної, акустичної, оптичної, радіаційної та хімічної природи.

Електрична енергія: напруга, ЕРС, потенціал, струм, заряд, потужність, енергія.

Магнітна енергія: магніторушійна сила, магнітний потік, магнітна індукція.

Механічна енергія: сила, маса, тиск, механічна напруга, швидкість, прискорення, потужність, енергія.

Акустична енергія: акустичний тиск, інтенсивність звуку, потужність, енергія.

Теплова енергія: температура, тепловий потік, термодинамічний потенціал.

Оптична енергія: потужність випромінювання, потік випромінювання, освітленість, яскравість, спектральна щільність, сила світла, світловий потік

Іонізаційна енергія: енергія випромінювання, потужність дози випромінювання, потік випромінювання.

Хімічна енергія: молярна енергія; хімічний потенціал.

Пасивні сигнали при сприйнятті потребують перетворення їх на активні, еквівалентні вхідним енергетичним сигналам. Потім, так само як і сигнали активних датчиків, вони сприймаються і перетворюються з допомогою певного фізичного ефекту в речовині чутливого елемента на вимірювальний сигнал.

Пасивні вхідні величини

Електрична енергія: провідність, опір, діелектрична проникність.

Магнітна енергія: магнітна проникність, індуктивність, взаємоіндуктивність.

Механічна енергія: маса, механічний опір, в'язкість, тертя, твердість, довжина, площа, об'єм, витрата.

Акустична енергія: акустичний опір, акустична проникність; коефіцієнти поглинання, відбиття та розсіювання.

Теплова енергія: теплоємність; коефіцієнти теплопровідності, теплопередачі.

Оптична енергія: коефіцієнти відбиття, розсіювання, пропускання, заломлення, колір, поляризація.

Іонізаційна енергія: стала радіаційного розпаду, коефіцієнт поглинання.

Хімічна енергія: молярний об'єм; дифузія; концентрація, молярна ентропія.

За кількістю величин, які сприймаються і перетворюються можна виділити датчики **одновимірні** і **багатовимірні** (сприймають кілька вхідних величин). Багатовимірні датчики можуть мати спільні елементи і тому можуть бути простіше, ніж сукупність одновимірних датчиків.

За кількістю виконуваних датчиком функцій їх можна поділити на **однофункціональні** й **багатофункціональні**. Багатофункціональні датчики можуть крім основної функції виконувати і додаткові функції — фільтрація, оброблення аналогових сигналів і т. д. Багатофункціональні датчики іноді називають інтелектуальними. До таких датчиків належать аналогові й цифрові датчики з підсумовуванням сигналів, з перестроюваними режимами роботи і параметрами, з функціональним АЦП, метрологічним обслуговуванням і т. д.

За технологією виготовлення датчики можна умовно поділити на **елементні**, виготовлені з набору окремих елементів, та **інтегральні**, з одночасним виготовленням за інтегральною мікроелектронною технологією всіх складових частин датчика.

За взаємодією з джерелами інформації: контактні, безконтактні (дистанційної дії).

За видом вимірювальних сигналів: аналогові; цифрові.

За динамічним характером сигналів: дискретні; безперервні.

Найважливішим при аналізі роботи датчиків є розгляд принципів їх дії, застосування фізичних явищ, покладених в основу побудови датчиків.

З аналізу наведених класів систем автоматичного керування й контролю видно, що будь-яка система складається з окремих елементів, пов'язаних між собою. При цьому різноманітність автоматичних систем, призначених для контролю й керування різними за своєю фізичною природою об'єктами, породжує різноманітність елементів залежно від їхнього конструктивного виконання, фізичних принципів, покладених в основу побудови, роду енергії, використаної під час роботи, і виконуваних ними функцій.

Це приводить до необхідності здійснення класифікації елементів, об'єднавши їх в окремі групи з однаковими класифікаційними ознаками,

що дасть можливість проводити вивчення не кожного окремого елемента, а цілого класу.

Класифікаційні ознаки можуть бути основними й другорядними. Тому при їх виборі потрібно розглянути роль окремого елемента в системі, його характерні риси, потім установити на цій основі можливі загальні ознаки й згрупувати за ними класи елементів і, виходячи із загальної мети, розробити системи контролю й керування, виділити головні й допоміжні ознаки та спробувати їх розташувати у порядку важливості. Зведену класифікацію датчиків систем контролю й керування показано на рис. 1.8.

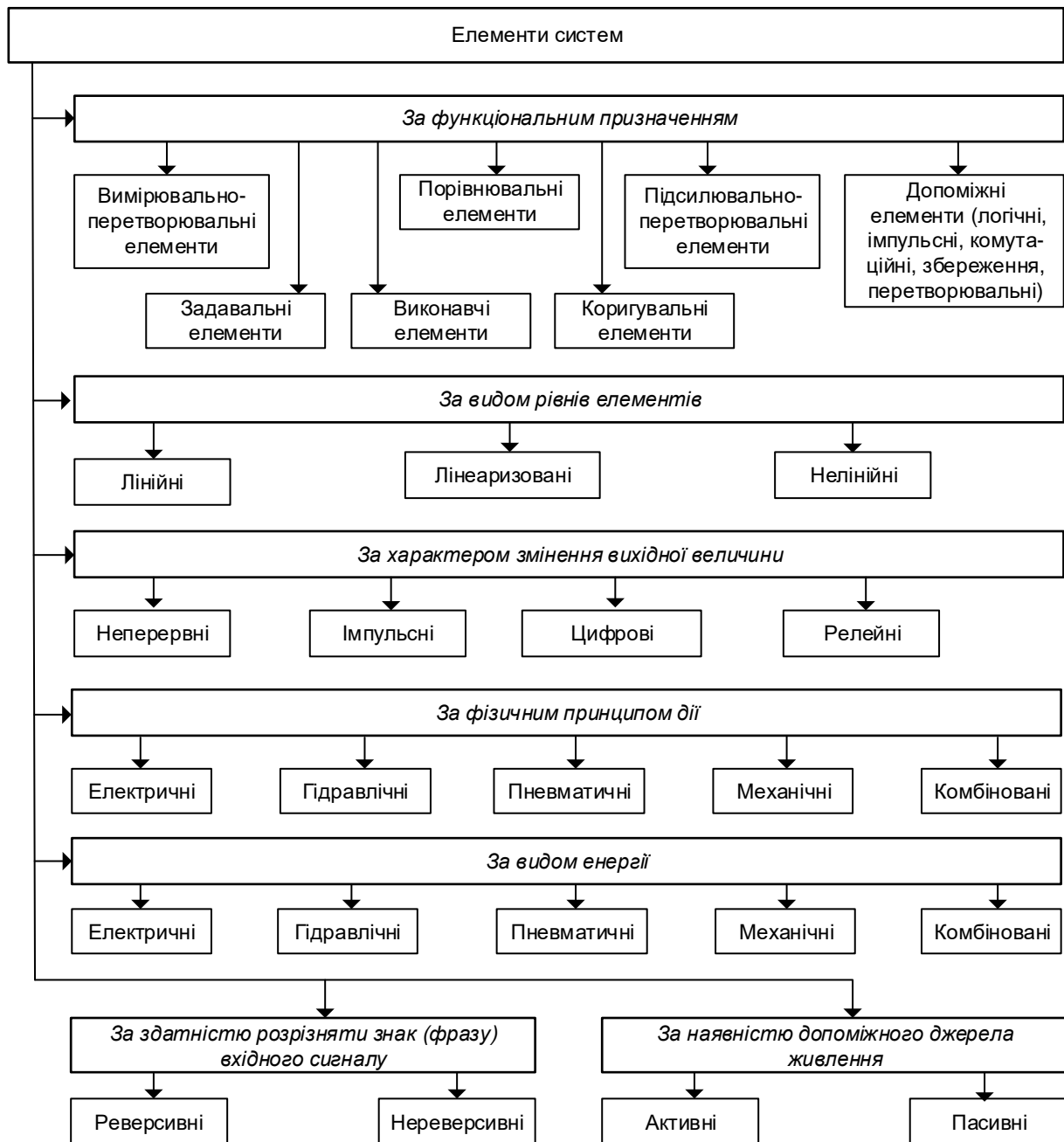


Рис. 1.8. Класифікація елементів систем автоматичного керування

Задача кожного елемента в загальному випадку полягає в якісному й кількісному перетворенні інформації, отриманої від попереднього елемента, і передачі її у формі, зручній для використання у наступному елементі. Таким чином, будь-який елемент автоматики можна розглядати у першу чергу як перетворювач енергії, на вхід якого надходить деяка величина g , а з виходу знімається величина x .

В одних елементах енергія вихідного сигналу X утворюється цілком з енергії вхідного сигналу g , такі елементи називають пасивними. В інших елементах мається додаткове джерело енергії потужністю M . Тут вхідна величина g тільки керує передачею енергії додаткового джерела на вихід елемента. Ці елементи називають активними.

Отже, за наявності додаткового джерела енергії всі елементи систем автоматичного керування й контролю можна поділити на два класи: *пасивні й активні*.

Аналізуючи наведені приклади систем, можна зазначити, що застосовані елементи використовують різний вид енергії додаткового джерела, різний фізичний принцип дії, крім того, характер змінення вихідних сигналів елементів може бути різним — неперервним, імпульсним, релейно-імпульсним. Через це можна зробити класифікацію за наведеними ознаками. Так, за видом енергії допоміжного джерела елементи можна підрозділити на *електричні, гідравлічні, пневматичні, механічні й комбіновані*.

За фізичними принципами дії розрізняють *електричні, теплові, магнітні, механічні, оптичні, акустичні, рідинні, газові* та інші елементи.

За характером змінення вихідної величини можна виділити такі класи елементів: *неперервний, імпульсний, цифровий, релейний*.

Важливою властивістю елемента є його здатність розрізняти змінення знака або фази вхідного сигналу. За цією властивістю елементи поділяють на *реверсивні (двотактні)*, в яких знак (фаза) вихідного сигналу змінюється при зміненні знака вхідного сигналу, і *нереверсивні (однотактні)*, знак (фаза) вихідного сигналу яких не залежить від полярності вхідного.

Наведена класифікація є досить корисною з погляду упорядкування елементів за різними ознаками, однак стосується вузьких питань, які пов'язані з розв'язанням задачі вибору або розроблення певного елемента або задачі побудови конкретної системи автоматичного керування. Загальні питання реалізації принципів побудови систем і їх досліджень не можна вивчити повністю в межах цих видів класифікації. Більш зручною для цієї мети є класифікація елементів за їхнім функціональним призначенням і за видом рівнянь, що описують процеси в елементі. На рис. 1.8 використовується класифікація елементів за функціональною ознакою. На цьому етапі зручно скористатися класифікацією елементів за видом їхніх рівнянь.

Приклади систем автоматичного керування й контролю дають можливість зробити висновок про те, що незважаючи на різноманітність технічних задач, які розв'язуються системами, різну фізичну природу регульованої величини, усі системи містять елементи, однакові за своїм функціональним призначенням. У зв'язку з цим множину елементів можна поділити на такі групи: *вимірjuвальню-перетворювальню (сприймальню), задавальню, порівнювальню, підсилювальню-перетворювальню, виконавчу, коригувальню, допоміжню*. Ознакою, що об'єднує групи, є визначена тут функція, яка виконується елементом у регуляторі. Нарешті, за видом рівнянь, що описують процеси, які відбуваються в елементах систем, виділяють такі елементи: *лінійні, лінеаризовані, нелінійні*.

Розміщуючи за різними видами класифікації елементи, можна побудувати зведену класифікаційну схему (див. рис. 1.8). Слід зазначити, що подібна узагальнена класифікація за багатьма з розглянутих ознак не є вичерпною і при вивченні окремих функціональних елементів буде уточнюватися.

Можливість декомпозиції регулятора на окремі елементи, що виконують більш дрібні функції, створює передумови для розроблення уніфікованої системи елементів автоматики. Уніфікація елементів полягає у розробленні універсальних типів елементів, придатних до застосування в автоматичних системах керування об'єктами різної фізичної природи. Уніфіковані елементи мають легко з'єднуватися між собою, забезпечуючи оперативне й економічне будування регуляторів з використанням агрегатно-модульного підходу, в основу якого покладено не фізичну природу впливів на вході регулятора або усередині каналу керування, а передану цими впливами інформацію. Такий підхід дає можливість збирати регулятори або керувальні пристрої різних систем автоматичного контролю й керування зі стандартних спеціалізованих елементів або блоків.

Уніфікація елементів автоматики здійснюється в межах Державної системи промислових приладів і засобів автоматизації (ДСП). Одним з основних системотехнічних принципів, покладених в основу будування ДСП, є принцип сумісності окремих елементів: інформаційної, енергетичної метрологічної, конструктивної і експлуатаційної.

Крім того, передача інформації в САК між сполученими елементами ДСП здійснюється уніфікованими сигналами електричної або пневматичної природи. Сигнали електричної природи, у свою чергу, підрозділяють на такі класи:

- 1) неперервні сигнали струму й напруги;
- 2) неперервні частотні сигнали;
- 3) кодовані сигнали.

Стандарт регламентує межі змінення сигналу кожного виду. Так, для сигналів постійного струму ДСП установлює такі межі: 0...5 мА;

– 5...0...5 мА; 0...20 мА; – 20...0...20 мА; для сигналів напруги постійного струму – 0...10 мВ; – 10...0...10 мВ; 0...100 мВ; –100...0...100 мВ; 0...1 В; – 1...0...1 В; 0...10 В; – 10...0...10 В, для пневматичних сигналів: 0,02...0,1 МПа.

Докладні відомості про прилади й пристрої ДСП до самого опису типових конструкцій містяться в Генеральному каталозі Державної системи промислових приладів і засобів автоматизації. Проектування якісно нових і удосконалення існуючих елементів автоматики слід проводити в межах ДСП, дотримуючись вимог стандартів та ідеї сумісності окремих елементів, що утворюють систему контролю й керування.

Будь-яка система контролю й керування містить (як функціонально необхідні елементи) один або кілька вимірювальних перетворювачів або датчиків, призначених для одержання первинної інформації про стан об'єкта контролю й керування (рис. 1.9). Вимірювальний перетворювач являє собою пристрій, що вимірює дійсне значення керованої або контрольованої координати і перетворює це значення на сигнал, найбільш прийнятний для подальшої його передачі по каналу керування.

На рис. 1.9: а – виконання функцій вимірювання й перетворення;

б – виконання функції перетворення сигналу; ОК – об'єкт керування, ПЕ – потенціометричний елемент; ІЕ – індуктивний елемент; МЕ – мембранний елемент; М – рухома маса акселерометра.

Слід зазначити, що елемент первинної інформації залежно від характеру застосування може виконувати функції виміру й перетворення контрольованого параметра одночасно, а може здійснювати тільки перетворення. Так, наприклад, елементи потенціометричного й індуктивного типів, які використовуються для одержання інформації про об'єкт, керованою координатою якого є лінійне або кутове переміщення (див. рис. 1.9, а), потрібно розглядати як датчики, оскільки ці елементи виконують функції виміру і перетворення керованого параметра одночасно.

Те ж саме можна сказати про ємнісний елемент, який застосовується в системі регулювання концентрації речовини в середовищі, сигнал на виході якого змінюється внаслідок змінення ємності конденсатора, що залежить від концентрації речовини. Однак ці ж елементи автоматики, які використовуються, наприклад, для одержання інформації про інші фізичні параметри керування (тиск, швидкість або прискорення рухомого об'єкта), будуть виконувати тільки функції перетворювача (див. рис. 1.9, б), оскільки як вимірники застосовуються інші чутливі до змінення цих параметрів елементи (мембранні або сильфонні приймачі тиску, акселерометри).

Датчики сигналів можна поділити на два класи: параметричні й генераторні. Основою побудови датчиків параметричного типу є властивість змінення деякого параметра чотириполюсника при зміненні

його вхідної величини, унаслідок чого вихідна величина чотириполюсника змінюється.

Генераторні датчики безпосередньо перетворюють механічну енергію на енергію електричного або іншого сигналу керування.

За видом вимірюваної (перетворюваної) величини розрізняють датчики положення, швидкості, прискорення, тиску, температури та інших фізичних величин, що є технологічними параметрами, керування якими необхідно здійснювати при автоматизації виробничо-технологічних процесів або об'єктів.

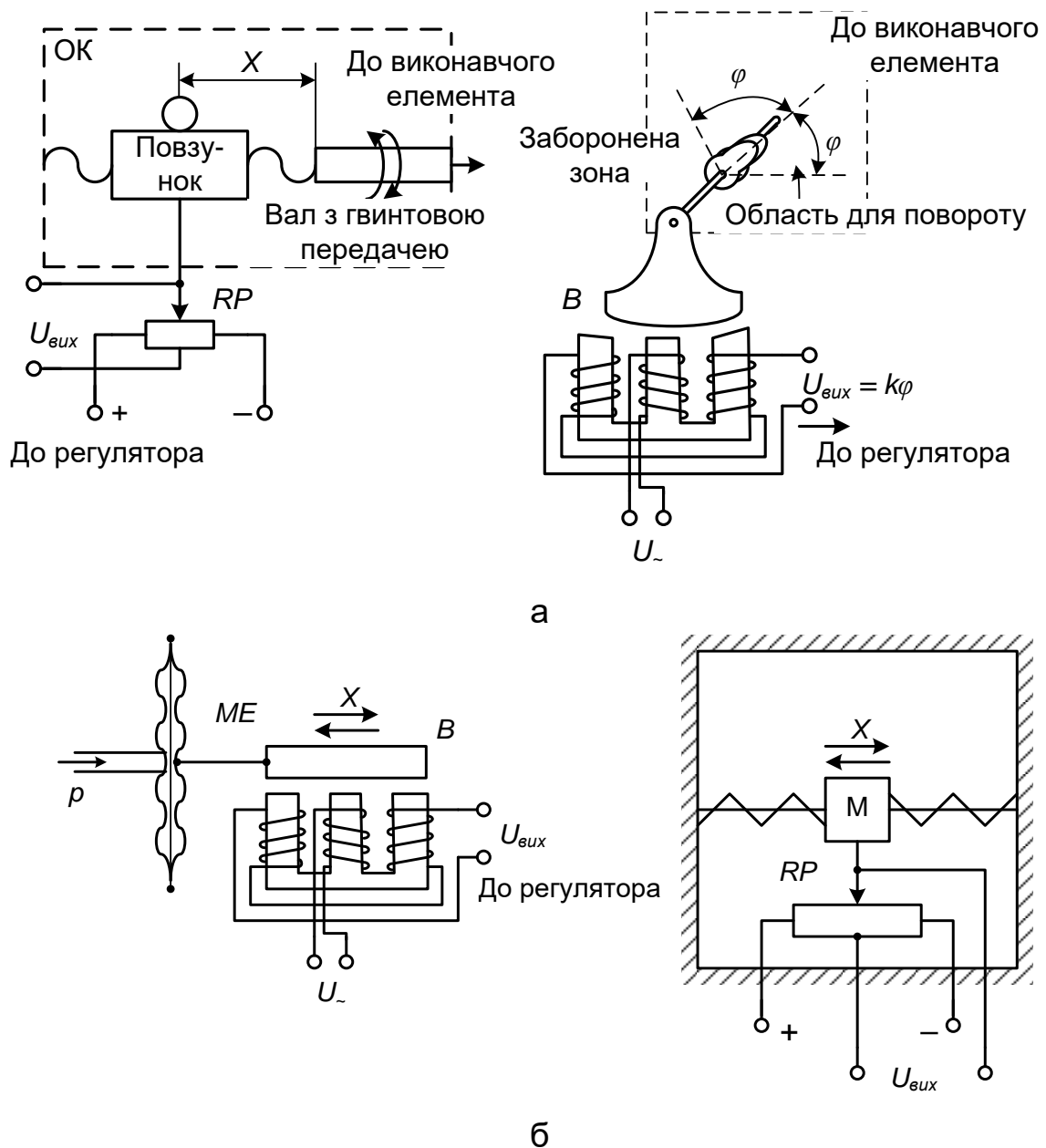


Рис. 1.9. Схеми підключення потенціометричного й індуктивного елементів

За принципом дії розрізняють датчики опору: потенціометричні, тензометричні, фоторезисторні й терморезисторні; датчики індуктивності і взаємоіндуктивності: індуктивні, індукційні датчики, сельсини, мікросини, обертальні трансформатори; магнітоіндукційні датчики, тахогенератори постійного й змінного струму та ін.

До датчиків ставлять такі вимоги:

- висока динамічна точність (формування сигналу має здійснюватися з мінімальним спотворенням). Ця вимога означає, що датчик повинен мати таку передавальну функцію, яка в межах смуги пропускання об'єкта контролю й керування зводилася б до постійної величини;

- висока статична точність роботи;

- висока надійність роботи в умовах, передбачених виробничо-технологічною і технічною нормувальною документацією;

- допустимі габарити й маса;

- високий коефіцієнт перетворення, що забезпечує реагування датчика на відносно невеликі неузгодженості між необхідним і дійсним значеннями керованої величини;

- висока потужність вихідного сигналу.

Відповідно до наведених вимог при вивченні датчиків різних типів необхідно приділити увагу таким питанням: статичній характеристиці датчика і її виду; чутливості датчика або коефіцієнту перетворення; роздільній здатності; шумам, що генеруються датчиком; потужності вихідного сигналу; потужності вхідного сигналу датчика; динамічним характеристикам.

1.5. Технічні характеристики датчиків

Усі вимірювання починаються зі сприйняття вимірюваних величин інформування вимірюваного сигналу, який потім піддається необхідним перетворенням. Переважна кількість фізичних неелектричних величин в процесі вимірювання перетворюється на електричні величини. Для здійснення подібних перетворень широке застосування знаходять різні *первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП)*. Функцію сприйняття вхідної величини виконує чутливий елемент.

Чутливий елемент – це частина ПВП, що сприймає вхідну величину, яка перетворюється на сигнал, що надходить у наступний вимірювальний ланцюг. Вимірювальний ланцюг може містити підсилювачі, подільники, модулятори та інші пристрої перетворення вимірюваного сигналу.

У загальному випадку під датчиком слід розуміти конструктивно відокремлену сукупність первинних перетворювачів, що сприймають одну або кілька вхідних величин і перетворюють їх на вимірювані сигнали.

Для опису статичних характеристик датчиків інформації широко використовують такі поняття: передавальна функція (функція, статична

характеристика) або рівняння перетворення; діапазон вимірюваних або перетворюваних значень (максимальний вхідний сигнал); діапазон вихідних значень; точність; гістерезис; нелінійність; відтворюваність; роздільна здатність; зона нечутливості та ін.

1.5.1. Статичні характеристики датчиків інформації

Похибками датчиків інформації, у тому числі й ПВП, є відхилення його реальної функції перетворення від номінальної (ідеальної передавальної функції).

Нехай є ПВП з номінальною функцією перетворення $Y_H = f_H(X)$ і реальною функцією перетворення $Y_P = f_P(X)$, наведеними на рис. 1.10.

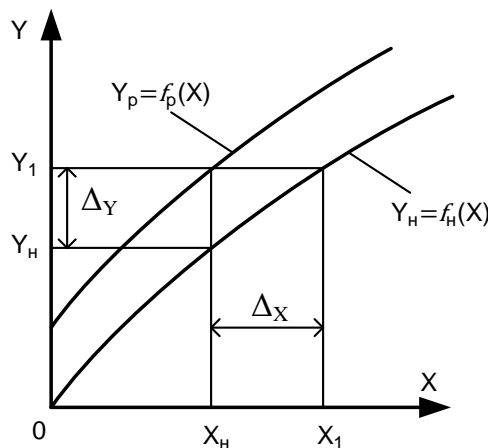


Рис. 1.10. Графіки номінальної та реальної функцій перетворення

Якщо на виході датчика величина Y_1 , то, знаючи функцію перетворення $Y_H = f_H(X)$, можна вважати, що на вхід впливає величина X_H , яка визначається рівнянням $Y_1 = f_H(X)$, а фактично на виході буде величина X_1 . Величина $\Delta_X = X_H - X_1$ називається *похибкою вимірювального перетворювача*. Іноді її називають похибкою на вході. Знаючи реальну функцію перетворення $Y_P = f_P(X)$, можна перейти від похибки перетворювача на вході Δ_X до похибки перетворювача на виході Δ_Y :

$$\Delta_Y = \Delta_X \frac{df(X)}{dX}. \quad (1.1)$$

Точність — якість датчика (ПВП), що відображує близькість до нуля його похибки. Чим меншу похибку має датчик, тим він вважається більш точним. Чисельно точність A визначається відношенням значення

вимірюваної або перетвореної величини X до досягнутого при цьому інтервалу невизначеності $d = 2\Delta$, тобто $A = x/d$.

Діапазон вимірюваних (перетворюваних) значень ΔX – це діапазон зовнішніх впливів, які датчик (ПВП) може сприйняти. Ця величина визначає максимальне значення вхідного сигналу, яке ПВП (рис. 1.11) може перетворити на вихідний сигнал, не виходячи за межі допустимих похибок. Розрізняють повний і робочий діапазони.

Повний діапазон — це діапазон значень вхідних впливів, який датчик може перетворити з похибкою, що не перевищує 100 %.

Робочий діапазон — це частина повного діапазону, в якому відносна похибка не перевищує деякого заданого значення.

Діапазон вихідних значень — алгебраїчна різниця між вихідними сигналами, які отримуються при максимальному і мінімальному вхідних впливах.

Роздільна здатність характеризує мінімальне змінення вимірюваної або перетворюваної величини, яку може відчути датчик, ПВП, і визначається як число градацій вимірюваної або перетворюваної величини, яке помітне на виході ДІ. За помітні градації можна взяти інтервали, які не перекриваються і вписуються в смугу невизначеності 2Δ перетворювача по всій її довжині (наприклад, як показано на (рис. 1.11, а)). Роздільна здатність R ДІ на інтервалі від X_1 до X_2 може бути визначена за формулою

$$R = \int_{X_1}^{X_2} \frac{dx}{2\Delta(x)} = \int_{X_1}^{X_2} A \frac{dx}{x} = \int_{X_1}^{X_2} A d(\ln x). \quad (1.2)$$

Нелінійність — це максимальне відхилення реальної характеристики перетворення від апроксимуючої прямої лінії (рис. 1.11, б).

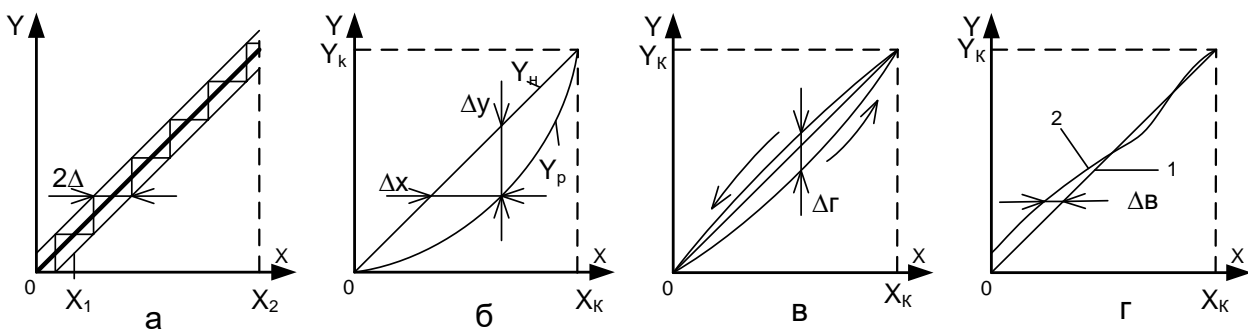


Рис. 1.11. Графіки функцій різних первинних вимірювальних перетворювачів

Гістерезис — це різниця значень вихідного сигналу ПВП для одного і того ж вхідного сигналу, отриманих при його зростанні і убутанні (рис. 1.11, в).

Відтворюваність — це здатність ПВП при дотриманні однакових умов видавати ідентичні результати. Відтворюваність результатів визначається за максимальною різницею вихідних значень ПВП, отриманих у двох циклах градування (див. рис. 1.11), і зазвичай виражається у відсотках від максимального значення вхідного сигналу:

$$\delta_B = \frac{\Delta_B}{X_K} \cdot 100 \% . \quad (1.3)$$

Насичення — це стан датчика, коли при певному рівні вхідного впливу датчик перестає відповідати наведеній градувальній характеристиці.

Оскільки у будь-якому засобі вимірювань сигнали, в тому числі й вхідний сигнал, не можуть поширюватися з нескінченно великою швидкістю, ПВП мають не тільки статичні, а й динамічні характеристики, тобто параметри, які залежать від часу. Зв'язок між вхідним впливом і вихідним сигналом ПВП (датчиків) можна описувати у вигляді лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами, які залежно від конструкції датчиків можуть мати різний порядок. Динамічні характеристики ДІ можна отримати з розв'язання таких рівнянь.

1.5.2. Динамічні характеристики датчиків інформації

До динамічних характеристик датчиків належать: передавальна функція, перехідна характеристика, амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики (АЧХ і ФЧХ) та ін.

1. Якщо в датчику немає енергонакопичувальних елементів (конденсаторів, котушок індуктивностей, маси і т. д.), то такий датчик називається датчиком *нульового порядку* з передавальною функцією

$$Y(t) = A_0 + S \cdot X(t), \quad (1.4)$$

де A_0 — постійне зміщення; S — статична чутливість.

Такі датчики належать до ДІ миттєвої дії і для них можна не визначати динамічні характеристики. На практиці в реальних датчиках на дуже високих частотах чутливість S зменшується, що може бути обумовлено наявністю пружності, маси, паразитних ємностей і т. д. Тому такі датчики називають датчиками квазінульового порядку. Прикладом такого датчика може бути реостатний датчик зміщення (переміщення).

2. Датчики, що містять один енергонакопичувальний елемент, описуються диференціальним рівнянням *першого порядку*

$$a_0 Y(t) + a_1 \frac{dY(t)}{dt} = X(t). \quad (1.5)$$

Прикладом датчика першого порядку є терморезистивний датчик, в якому роль енергонакопичувального елемента відіграє теплоємність. Для опису динамічних характеристик таких датчиків широко використовують амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики, граничну частоту f_{CP} , на якій вихідний сигнал зменшується на 3 дБ. Ця частота вважається граничною робочою частотою датчика і називається *частотою зрізу*. Вона характеризує найбільшу або найменшу частоту зовнішніх впливів (вхідної величини), яку датчик може сприйняти без спотворень.

При подачі на вхід датчика першого порядку ступеневого впливу його перехідна характеристика добре апроксимується експонентою вигляду

$$Y(t) = Y_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (1.6)$$

де Y_0 – стале значення вихідного сигналу; T – стала часу; t – час.

Стала часу T – це час, протягом якого вихідний сигнал датчика досягає рівня, що становить приблизно 63 % від сталого значення при подачі на його вхід ступеневого зовнішнього впливу. Стала часу є мірою інерційності датчика і в термінах електричних величин знаходиться як

$T = CR$. У теплових термінах під C і R розуміють теплоємність і тепловий опір. На практиці для визначення T або f датчиків першого порядку можна використовувати формулу $f_{cep} = 0,159 / T$.

3. Датчики, що містять два енергонакопичувальних елементи, описуються диференціальним рівнянням *другого порядку*

$$a_0 Y(t) + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_2 \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} = X(t). \quad (1.7)$$

Прикладом датчика другого порядку є акселерометр, в якому роль енергонакопичувальних елементів відіграють маса і пружина. При подачі на вхід датчика другого порядку ступеневого впливу на його виході практично завжди з'являються коливання. Будь-датчик другого порядку характеризується *власною (резонансною) частотою*, на якій відбувається значне збільшення вихідного сигналу. Зазвичай робочий діапазон датчиків вибирається або значно нижче власної частоти (на 60 % і більше), або вище її. Для датчиків другого порядку необхідно вказувати значення власної частоти і його *коефіцієнт загасання*, який може бути визначений як відношення більшої амплітуди до меншої амплітуди пари послідовно взятих півхвиль коливань щодо сталого значення.

1.6. Аналоги датчиків інформації

Для аналізу можливих характеристик різних перетворювачів, у тому числі ПВП, широко використовується математичне моделювання, яке

буває статичним і динамічним. Статичне моделювання ґрунтується на використанні статичних передавальних функцій. Одним із способів оцінювання динамічних характеристик є спосіб, при якому перетворювач (ПВП, датчик) розділяється на окремі елементи і кожен елемент розглядається окремо, а потім математичні описи окремих елементів об'єднуються в єдину модель. До складу динамічних моделей обов'язково має входити *незалежна змінна* — час. Розглянемо деякі елементи динамічних моделей.

1.6.1. Механічні елементи

Динамічний механічний елемент можна подати у вигляді маси (інерційного компонента), який з'єднаний з пружиною і демпфівальним (заспокійливим) пристроєм. На рис. 1.12, а і 1.13, а показано два можливих варіанти механічних моделей датчиків сили, тиску, прискорення і т. д., в яких маса m утримується пружиною з коефіцієнтом жорсткості c_0 . Рух цієї маси демпфірується пристроєм заспокоєння з коефіцієнтом загасання (заспокоєння) k .

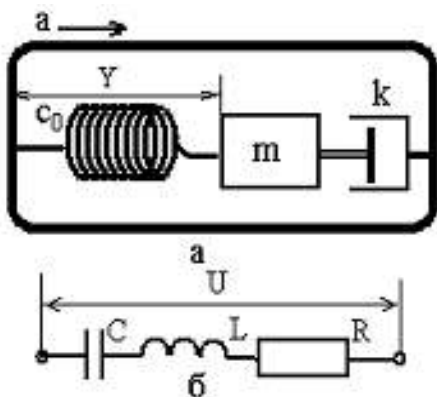


Рис. 1.12. Датчик прискорення

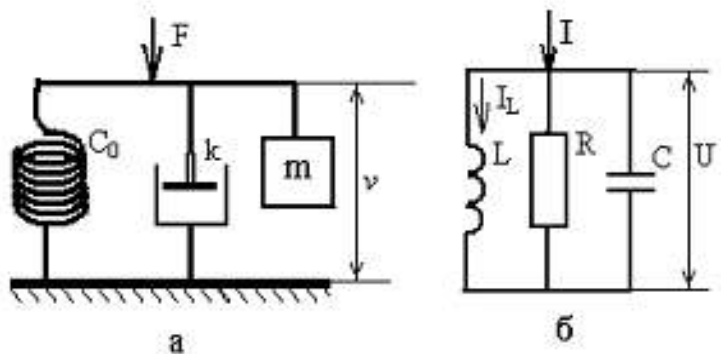


Рис. 1.13. Датчик сили

Для моделі, показаної на рис. 1.12, а, під час руху на пристрій діє прискорення $a = d^2y / dt^2$, а вихідний сигнал пропорційний відхиленню маси на відстань y . Виходячи з другого закону Ньютона отримаємо

$$m \cdot a = -k \frac{dy}{dt} - c_0 y; \quad (1.8)$$

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + k \frac{dy}{dt} + c_0 y = 0, \quad (1.9)$$

де y – зміщення рухомої частини.

Для моделі, поданої на рис. 1.13, а, при впливі на систему сили F швидкість руху V маси m відносно землі може бути визначена з рівняння

$$m \cdot \frac{dv}{dt} + kv + c_0 \int v dt = F. \quad (1.10)$$

Оскільки $v = dx/dt$, отримуємо рівняння руху рухомої частини механічної системи

$$m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} + k \frac{dy}{dt} + c_0 y = F. \quad (1.11)$$

Рівняння (1.9) і (1.11) є диференціальними рівняннями другого порядку і еквівалентними рівнянню (1.7). Для усунення небажаних коливань на виході подібних датчиків регулюванням коефіцієнта загасання k досягають стану критичного затухання.

1.6.2. Теплові елементи

До теплових елементів належать: теплові ПВП, нагрівальні елементи, радіатори, поглиначі тепла та ін. У загальному випадку вимірювальні перетворювачі, у тому числі й датчики, є складовою частиною різних пристроїв. При аналізі характеристик ВП необхідно враховувати процеси теплообміну між перетворювачем і оточуючими елементами, пристроями, середовищем. Тепло передається трьома способами: через теплопровідність, конвекцію, теплове випромінювання. У моделі з зосередженими параметрами температуру об'єкта можна визначити із рівняння теплового балансу, яке виходячи з першого закону термодинаміки можна записати у вигляді

$$C \frac{dT}{dt} = \Delta Q, \quad (1.12)$$

де $C = m \cdot c$ – теплоємність тіла, Дж/К; m – маса тіла, кг; c – питома теплоємність матеріалу тіла, Дж/(кг·К); ΔQ – інтенсивність теплового потоку, Вт. За умови лінійності теплового потоку, що проходить через тіло,

$$\Delta Q = \frac{T_1 - T_2}{R}, \quad (1.13)$$

де $T_1 - T_2$ – градієнт температури на елементі; R – тепловий опір, К/Вт.

Розглянемо поведінку теплового елемента на прикладі ртутного термометра (рис. 1.14, а). Вихідним сигналом термометра є змінення довжини $h_{рт}$ стовпчика ртуті 2, а вхідним сигналом вимірюється температура навколишнього середовища $T_{сер}$. У такому термометрі можна вважати, що змінення довжини стовпчика ртуті прямо пропорційне зміненню температури ртуті $T_{рт}$ в резервуарі 1, тобто за вихідну величину можна взяти температуру.

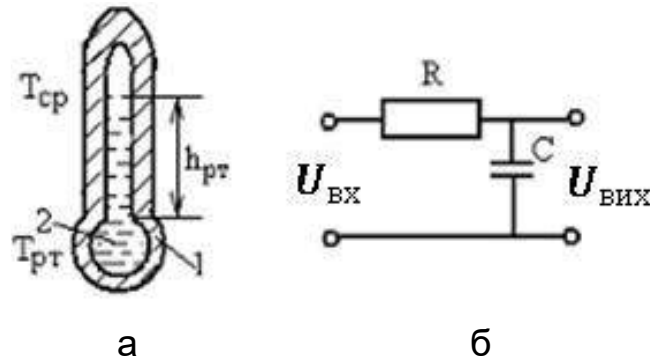


Рис. 1.14. Ртутний термометр

Теплообмін між ртуттю в резервуарі і навколишнім середовищем відбувається через стінку (зазвичай скляну) з тепловим опором R . Для такого елемента з рівнянь (1.12) і (1.13) отримаємо таке диференціальне рівняння першого порядку:

$$RC \frac{dT_{рт}}{dt} + T_{рт} = T_{сер}. \quad (1.14)$$

Вихідна реакція теплового перетворювача на ступеневий зовнішній вплив характеризується тепловою сталою часу, яка дорівнює добутку теплоємності на тепловий опір: $T = RC$. Рівняння (1.14) є типовим для теплових датчиків.

1.6.3. Електричні елементи

Існують три основних електричних елементи: конденсатор, котушка індуктивності і резистор. Для опису систем (електричних схем), що складаються з електричних елементів, широко використовуються *перший* і *другий* закони Кірхгофа. Прикладами подібних систем є схеми, показані на рис. 1.12, б, 1.13, б і 1.14, б.

Для електричного контура L – C – R (див. рис. 1.12, б) маємо

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = U, \quad (1.15)$$

де $dq = i/dt$ – закон збереження електричного заряду, $u_c = q/C$, $u_L = Ldi/dt$.

Для паралельного електричного контуру (рис. 1.13, б) можна записати рівняння

$$LC \frac{d^2 I_L}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{dI_L}{dt} + I_L = I. \quad (1.16)$$

Тут $i_R = U/R$, $i_L = 1/L \int u dt$, $i_C = C dU/dt$, а спад напруги на індуктивності $U = L di_L/dt$.

Рівняння (1.15) і (1.16) відповідають лінійному диференціальному рівнянню другого порядку (рівняння (1.7)), що описує систему з двома енергонакопичувальними елементами.

Приклад системи першого порядку з електричними елементами (одним енергонакопичувальним) показано на рис. 1.14, б. Ця система описується диференціальним рівнянням

$$C \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} + U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}}.$$

1.6.4. Електричні аналоги

У табл. 1.1 наведено зосереджені елементи механічних, теплових і електричних схем спільно з рівняннями, що описують їх поведінку.

Таблиця 1.1

Елементи схем з рівняннями

Схеми			
Механічні	Теплові	Електричні	
<p>Маса</p>  $F = m \frac{d(v)}{dt}$	<p>Теплоємність</p>  $Q = C \frac{dT}{dt}$	<p>Індуктивність</p>  $U = L \frac{di}{dt}$	<p>Ємність</p>  $i = C \frac{dU}{dt}$
<p>Пружина</p>  $F = k \int v dt$	<p>Теплоємність</p>  $T = \frac{1}{C} \int Q dt$	<p>Ємність</p>  $U = \frac{1}{C} \int i dt$	<p>Індуктивність</p>  $i = \frac{1}{L} \int U dt$
<p>Демпфер</p>  $F = bv$	<p>Тепловий опір</p>  $Q = (T_2 - T_1)/R$	<p>Опір</p>  $U = iR$	<p>Опір</p>  $i = U/R$

Наведені вище співвідношення показують, що механічні, теплові та електричні елементи описуються ідентичними математичними співвідношеннями при належному зв'язку між фізичними величинами, що характеризують таку систему. Цей зв'язок зазвичай називають відносинами еквівалентностей, і поведінку деяких неелектричних фізичних систем можна описати за допомогою електричної аналогії. Це означає, що можна взяти механічний або тепловий елемент, побудувати для нього еквівалентну електричну схему і аналізувати її за допомогою законів Кірхгофа.

Електричні аналогії можуть використовуватися при оцінюванні параметрів датчиків, а також проміжних механічних і теплових елементів між об'єктом і навколишнім середовищем.

Приклад схеми заміщення подано на рис. 1.15.

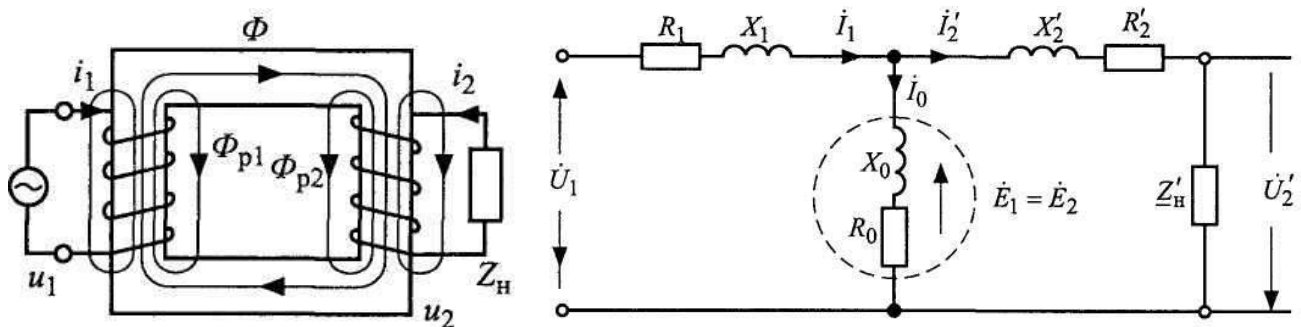


Рис. 1.15. Трансформатор і схема його заміщення

Рівняння зведеного трансформатора — це рівняння розрахунку електричного кола з двома суміжними контурами, складеними за законами Кірхгофа:

$$i_1 = i_0 + i'_2 -$$

це рівняння за першим законом Кірхгофа (для вузла електричного кола).

$$U_1 = -E_1 + I_1 R_1 + j I_1 X_1 -$$

це рівняння, складене за другим законом Кірхгофа, для замкнутого контуру з ідеальними елементами, що мають параметри R_1, X_1 .

$$U'_2 = E'_2 - I'_2 R'_2 - j I'_2 X_2 -$$

це також рівняння за другим законом Кірхгофа для замкнутого контуру з ідеальними елементами.

Спільний для суміжних контурів елемент, що індукує ЕРС $E_1 = E'_2$, повинен мати якийсь внутрішній опір

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0,$$

що забезпечує проходження в ньому струму холостого ходу. На рис. 1.15 наведено схему заміщення трансформатора, що відповідає рівнянням зведеного трансформатора.

Спільна ділянка схеми, по якій проходить струм холостого ходу I_0 , називається намагнічувальною гілкою і заміщає дію основного магнітного потоку.

2. ОСНОВНІ МЕТОДИ ТА СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ

2.1. Електричні методи вимірювання неелектричних величин

У системах автоматики сигнали керування залежать від різних неелектричних і електричних величин, що характеризують певний виробничий процес. Інформація про ці величини має бути отримана від датчика і сформована у вигляді деякого сигналу. Найбільш зручно використовувати електричний сигнал. Порівняно з іншими сигналами (наприклад, механічними, пневматичними, світловими, звуковими) електричний сигнал має цілий комплекс переваг: можливість передачі на великі відстані, простота перетворення і посилення, можливість уведення в ЕОМ. Тому електричні методи вимірювання неелектричних величин набули поширення. Вони мають забезпечувати високу точність перетворення неелектричної величини на електричний сигнал і швидко реагувати на її змінення.

Інформацію про контрольовану неелектричну величину отримують за допомогою датчика. Слід зазначити, що багато неелектричних величин зручно попередньо перетворювати на механічне переміщення, а потім вже за допомогою датчика переміщення отримати електричний сигнал. Наприклад, на переміщення перетворюються такі неелектричні величини, як тиск (за допомогою пружної мембрани), температура (за допомогою біметалічної пластини), рівень рідини (за допомогою поплавця), зусилля (за допомогою пружини). Практично більшість неелектричних величин порівняно нескладно перетворити на переміщення. Тому в автоматичі широкого поширення набули датчики переміщення. Якщо можна відразу перетворити неелектричну величину на електричний сигнал, то використовують датчики безпосереднього перетворення (наприклад, термоопір і термопари).

Отже, від датчика отримано електричний сигнал, що несе інформацію про неелектричну величину. Цей сигнал зумовлений зміненням активного опору, індуктивності, напруги, струму або будь-якого іншого електричного параметра. Щоб виміряти цей параметр, потрібен відповідний електровимірювальний прилад. А для узгодження сигналу датчика з електровимірювальним приладом необхідна вимірювальна схема. Таку схему електричного способу вимірювання неелектричної величини подано на

рис. 2.1. Кожен елемент схеми має чутливість S та опір Z . Всі вони можуть живитися від джерела електроенергії (на рис. 2.1 джерело живлення не показано). Датчик перетворює вхідну неелектричну величину x на електричний параметр y (опір, напруга або ін.). Чутливість датчика $S_D = \Delta y / \Delta x$. Вимірювальна схема перетворює змінення одного електричного параметра y на інший електричний параметр z . Чутливість вимірювальної схеми $S_{cx} = \Delta z / \Delta y$. Електровимірювальний прилад видає показання α (наприклад, у вигляді відхилення стрілки на шкалі), пропорційні параметру z .

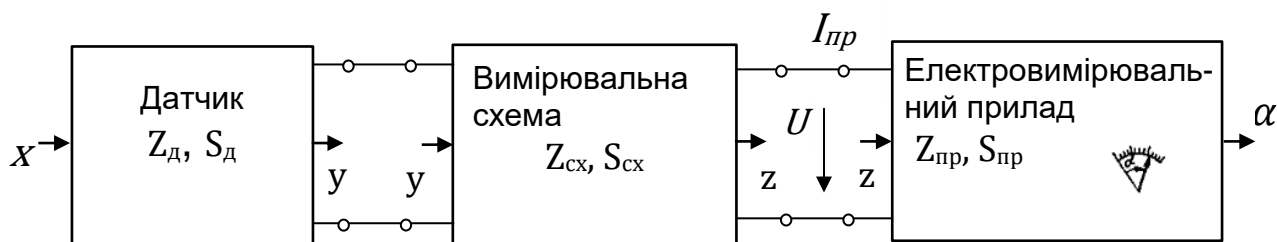


Рис. 2.1. Структурна схема електричного способу вимірювання неелектричної величини

Чутливість пристрою $S_{пр} = \Delta \alpha / \Delta z$. Чутливість, яка забезпечується при електричному методі вимірювання неелектричної величини x ,

$$S = \frac{\Delta \alpha}{\Delta x} = S_D S_{cx} S_{пр}.$$

Чутливість приладу будемо вважати величиною заданою і незмінною. А ось чутливість вимірювальної схеми можна істотно змінювати вибором як самої схеми, так і її елементів. Розрізняють два режими роботи вимірювальної схеми.

1. Внутрішній опір приладу $Z_{пр}$ значно більше вихідного опору вимірювальної схеми Z_{cx} : ($Z_{пр} \gg Z_{cx}$). У цьому випадку показання приладу залежать від напруги на виході схеми і тому для такого режиму визначають чутливість за напругою (вважаючи $\Delta z = \Delta U$):

$$S_{cxU} = \Delta U / \Delta y \quad (2.1)$$

2. Внутрішній опір приладу можна порівняти з вихідним опором вимірювальної схеми. Прилад реагує на змінення сили струму $I_{пр}$. Для такого режиму визначають чутливість за струмом:

$$S_{cxI} = \frac{\Delta I}{\Delta y}. \quad (2.2)$$

Дуже часто як вимірювальний прилад використовується міліамперметр. Надалі будемо розглядати саме чутливість за струмом.

Існуючі методи електричних вимірювань можна поділити на два класи: безпосереднього оцінювання і порівняння. При безпосередньому оцінюванні вимірювальна схема виконує лише функції перетворення вихідного сигналу датчика, наприклад посилює його або узгоджує вихідний опір датчика з вхідним опором приладу. Цей метод простий, але застосовується порівняно рідко, оскільки йому властиві значні похибки (особливо при зміні напруги живлення датчика). Метод порівняння забезпечує більш високі точність і чутливість. При цьому використовуються мостові, диференціальні та компенсаційні схеми вимірювання.

2.2. Мостова вимірювальна схема постійного струму

Принципова схема одинарного моста (рис. 2.2) складається з чотирьох резисторів з активними опорами R_1 , R_2 , R_3 та R_4 , які з'єднані в замкнутий чотирикутник $АБВГ$. Резистори R_1 – R_4 називають плечами. Плечі можна позначати і буквами, наприклад плече $АБ$. У чотирикутнику $АБВГ$ можна виділити дві діагоналі: $АВ$ і $БГ$. У діагональ $БГ$ моста підключено вимірювальний прилад, який має активний опір $R_{пр}$. У діагональ $АВ$ підключено джерело живлення з ЕРС E і внутрішнім опором R_E .

Можна підібрати опори плечей моста так, щоб потенціали точок $Б$ і $Г$, між якими підключено вимірювальний прилад, були однакові. У цьому випадку струм у ланцюзі приладу $I_{пр}$ відсутній ($I_{пр} = 0$).

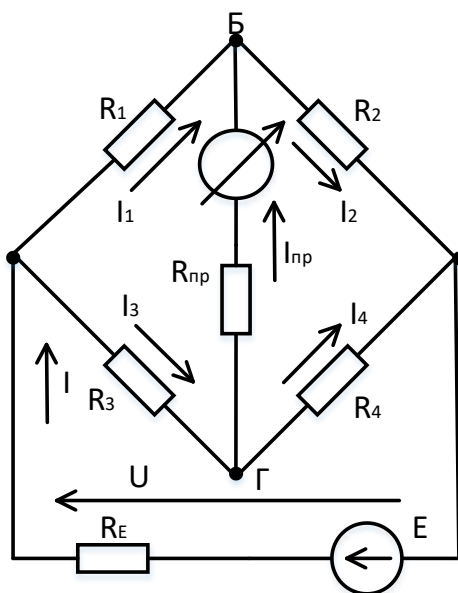


Рис. 2.2. Мостова вимірювальна схема постійного струму

Процес підбору таких опорів, що забезпечують $I_{pp} = 0$, називається зрівноважуванням або балансуванням моста. Умова рівноваги моста може бути отримана на підставі законів Кірхгофа, записаних для струмів у плечах моста з урахуванням прийнятих на рис. 2.2 напрямків струмів:

$$I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0, \quad I_2 R_2 - I_4 R_4 = 0. \quad (2.3)$$

Звідси

$$I_1 R_1 = I_3 R_3, \quad I_2 R_2 = I_4 R_4. \quad (2.4)$$

Поділивши (2.3) на (2.4), отримаємо

$$I_1 R_1 / (I_2 R_2) = I_3 R_3 / (I_4 R_4). \quad (2.5)$$

Оскільки у зрівноваженому мосту струм в ланцюзі приладу $I_{pp} = 0$, то $I_1 = I_2$, $I_3 = I_4$ і рівність (2.5) має вигляд $R_1/R_2 = R_3/R_4$ або

$$R_1 R_4 = R_2 R_3, \quad (2.6)$$

тобто умову рівноваги моста можна сформулювати так: добутки опорів протилежних плечей мають бути рівні.

За допомогою зрівноваженої мостової схеми можна виміряти невідомий опір R_x , підключивши його в одне із плечей моста, наприклад в плече BF замість резистора R_4 . При трьох відомих опорах R_1 , R_2 , R_3 невідомий опір можна визначити за формулою $R_x = R_2 R_3 / R_1$. Зрівноважування моста може бути досягнуто зміненням або одного опору R_2 , або відношення двох опорів R_3/R_1 . У зрівноважених мостах вимірювальний прилад має бути дуже чутливим, реагувати на малі струми. Саме за показаннями цього приладу і фіксується рівновага моста. Тому у зрівноважених мостах як вимірювальний прилад використовується зазвичай гальванометр.

Крім зрівноважених існують так звані незрівноважені (або незбалансовані) мости, в яких $I_{pp} \neq 0$ і вимірювальний опір R_x визначається саме за відхиленням стрілки приладу, тобто за величиною I_{pp} , оскільки $I_{pp} = f(R_x)$

Як вимірювальний прилад у незрівноважених мостах використовується амперметр (оскільки струми невеликі, то зазвичай мілі- або мікроамперметр). Зрівноважені мости потребують ручного або автоматичного балансування, в той час як незрівноважені мости не потребують регулювання при кожному вимірі. Тому незрівноважені мости простіше, їх частіше використовують для електричних вимірювань неелектричних величин.

На підставі законів Кірхгофа можуть бути отримані вирази для струму в діагоналі моста, що містить вимірювальний прилад:

через напругу живлення U :

$$I_{\text{пр}} = \frac{U(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{M}, \quad (2.7)$$

через струм живлення I :

$$I_{\text{пр}} = \frac{I(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{N}, \quad (2.8)$$

де

$$M = (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)R_{\text{пр}} + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2); \quad (2.9)$$

$$N = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)R_{\text{пр}} + (R_1 + R_3)(R_2 + R_4). \quad (2.10)$$

З (2.7) або (2.8), прирівнявши $I_{\text{пр}}$ до нуля, можна вивести вже отриману нами умову рівноваги моста (2.6).

Складне з'єднання опорів $R_1 - R_4$, $R_{\text{пр}}$ у мостовій схемі можна перетворити на еквівалентний опір R_M — вхідний опір моста по діагоналі живлення АВ. Еквівалентну схему моста показано на рис. 2.3.

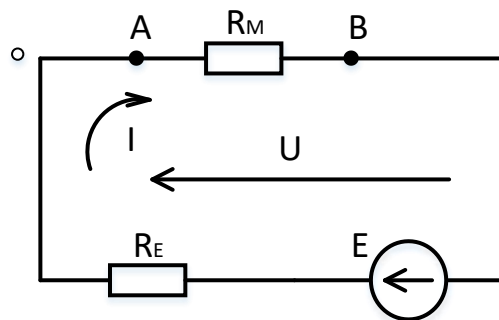


Рис. 2.3. Еквівалентна схема моста

Залежно від співвідношення R_M і R_E розрізняють низькоомні і високоомні мостові вимірвальні схеми.

Якщо $R_M \ll R_E$, то міст називають *низькоомним*. У таких мостах змінення опору плечей майже не впливає на струм живлення, тобто можна вважати, що $I \approx \text{const}$. При розрахунку низькоомних мостів зазвичай використовують рівняння (2.8).

Якщо $R_M \gg R_E$, то міст називається *високоомним*. У цьому випадку постійною величиною можна вважати напругу на затискачах моста $U = E - IR_E \approx \text{const}$. При розрахунку високоомних мостів зазвичай використовують рівняння (2.7).

Розділивши (2.7) на (2.8), отримаємо вираз для вхідного опору моста

$$R_M = U/I = M/N. \quad (2.11)$$

2.3. Мостова схема змінного струму

У плечі мостової схеми змінного струму (рис. 2.4) підключено повні опори, що складаються з активної і реактивної складових. Будемо користуватися комплексною формою запису повних опорів $\underline{Z} = R + jX$. В діагональ AB моста підключено джерело змінної синусоїдальної напруги \underline{U} , а в діагональ $БГ$ — вимірювальний прилад змінного струму.

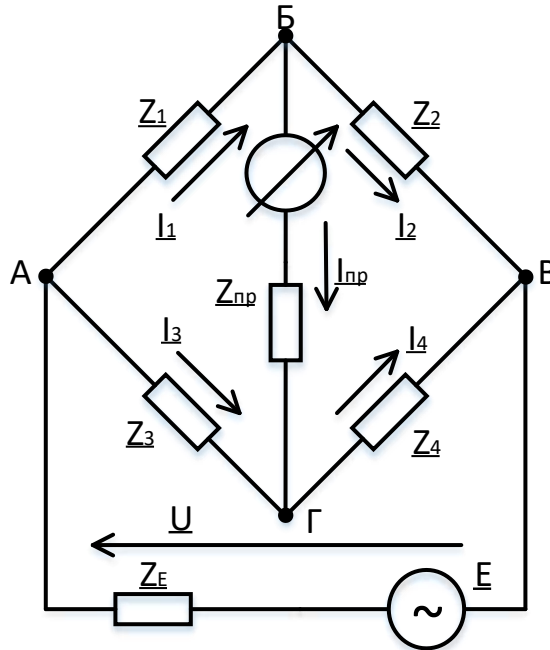


Рис. 2.4. Мостова вимірювальна схема на змінному струмі

Напрямки струмів у плечах моста можуть бути вибрані довільно. Струм вимірювальної діагоналі

$$\underline{I}_{\text{пр}} = \underline{I} \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 - \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{N}} = \underline{U} \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 - \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{M}}, \quad (2.12)$$

де

$$\underline{N} = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) \underline{Z}_{\text{пр}} + (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3)(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4); \quad (2.13)$$

$$\underline{M} = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) \underline{Z}_{\text{пр}} + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4) + \underline{Z}_3 \underline{Z}_4 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) \quad (2.14)$$

— комплексні вирази \underline{M} \underline{N} , аналогічні виразам у рівняннях (2.9) і (2.10) для моста постійного струму.

Умови рівноваги моста змінного струму отримаємо, прирівнявши (2.12) до нуля:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3, \quad (2.15)$$

де

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = z_1 e^{j\varphi_1}; \quad \underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 = z_2 e^{j\varphi_2}; \\ \underline{Z}_3 = R_3 + jX_3 = z_3 e^{j\varphi_3}; \quad \underline{Z}_4 = R_4 + jX_4 = z_4 e^{j\varphi_4}.$$

При показовій формі запису комплексної величини модуль

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad \text{а аргумент} \quad \varphi = \arctg(X/R).$$

Відповідно до умов рівноваги моста підставимо в (2.15) значення повних опорів

$$(R_1 + jX_1)(R_4 + jX_4) = (R_2 + jX_2)(R_3 + jX_3). \quad (2.16)$$

Запишемо ліву і праву частини у вигляді дійсної та уявної складових:

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 + j(R_1 X_4 + R_4 X_1) = R_2 R_3 - X_2 X_3 + j(R_2 X_3 + R_3 X_2). \quad (2.17)$$

Дві комплексні величини рівні тільки в тому випадку, якщо рівні порізно їх дійсні та уявні частини:

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3; \quad (2.18)$$

$$R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2. \quad (2.19)$$

Таким чином, отримуємо дві незалежні умови рівноваги, які мають виконуватися одночасно. Якщо в мостах постійного струму є одна умова рівноваги і зрівноваження досягається регулюванням одного опору, то в мостах змінного струму для зрівноважування необхідно регулювати не менше двох параметрів схеми. Труднощі зрівноважування моста змінного струму полягають у тому, що під час забезпечення однієї умови (наприклад, рівності добутків модулів опорів у протилежних плечах) порушується інше співвідношення — між фазовими зміщеннями.

Зазвичай такі мости регулюються вручну методом послідовних наближень.

У деяких окремих випадках зрівноважування моста забезпечується виконанням однієї з трьох умов.

1. Якщо $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0$, тобто плечі моста мають тільки реактивні опори, то умова рівноваги $X_1 X_4 = X_2 X_3$.

2. Якщо $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 0$, тобто плечі моста мають тільки активні опори, умова рівноваги $R_1 R_4 = R_2 R_3$.

3. Якщо два сусідніх плеча мають тільки реактивні опори, а два інших тільки активні (будь-яка пара сусідніх плечей), наприклад

$$R_1 = R_3 = X_2 = X_4 = 0, \quad \text{то умова рівноваги:} \quad X_1 R_4 = R_2 X_3.$$

Слід мати на увазі, що котушки індуктивності завжди крім індуктивного опору мають активний опір, який в деяких випадках настільки малий, що ним можна знехтувати.

Розрахунок чутливості моста змінного струму можна виконати відповідно до комплексного опору Z_4 .

Чутливість моста за струмом

$$S_{exI} = \frac{UZ_4}{M} . \quad (2.20)$$

Чутливість за напругою

$$S_{exU} = \frac{IZ_4}{N} . \quad (2.21)$$

Зрівноважування моста змінного струму може здійснюватися автоматично при співвідношеннях опорів плечей, розглянутих для окремих випадків 1—3.

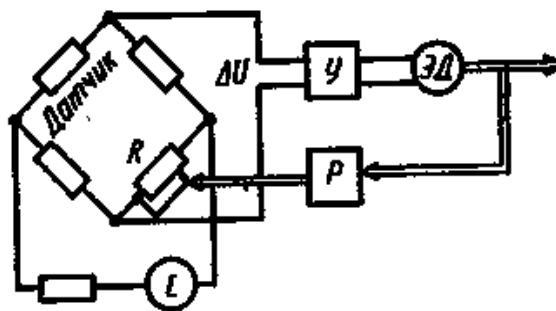


Рис. 2.5. Схема автоматичного зрівноважування моста

Автоматичне зрівноважування мостів змінного і постійного струму виконується за схемою, показаною на рис. 2.5. Напряга розбалансу ΔU знімається з вимірювальної діагоналі моста і подається на виконавчий мікроелектродвигун (ЕД) через підсилювач (П). Двигун через редуктор (Р) переміщує движок змінного резистора R до тих пір, поки не буде забезпечено умову рівноваги і напруга розбалансу ΔU не дорівнюватиме нулю. Одночасно буде переміщатися і стрілка за шкалою, яка може бути проградуєрована в одиницях опору датчика або у відповідних цьому опору одиницях вимірюваної неелектричної величини.

2.4. Диференціальні вимірювальні схеми

Диференціальна схема складається з двох суміжних контурів з джерелом живлення, а вимірювальний прилад, підключений у загальну гілку контурів, реагує на різницю контурних струмів. У диференціальній схемі можуть бути використані як параметричні датчики (зі змінними опорами), так і генераторні (зі змінною ЕРС). Диференціальну схему підключення параметричних датчиків показано на рис. 2.6 (а — датчик підключено в один контур;

б — датчик підключено в обидва контури). ЕРС, що живлять обидва контури, однакові. Диференціальну схему підключення генераторного датчика показано на рис. 2.7. У цій схемі датчиком є так званий диференціальний

трансформатор. При зміні магнітного зв'язку між обмотками трансформатора ЕРС лівого контуру, наприклад, зростає, а правого — зменшується. Змінення магнітного зв'язку обумовлено контрольованою неелектричною величиною. Наприклад, воно може бути спричинене переміщенням феромагнітного осердя в диференціальному трансформаторі.

Порівняємо диференціальну і мостову вимірювальні схеми за чутливістю. В обох схемах (див. рис. 2.6, а, б) будемо використовувати однакові датчики зі змінним активним опором $R + \Delta R$ і однакове живлення — від вторинної обмотки трансформатора з ЕРС, яка дорівнює $2E$ (при диференціальній схемі є вивід від середньої точки).

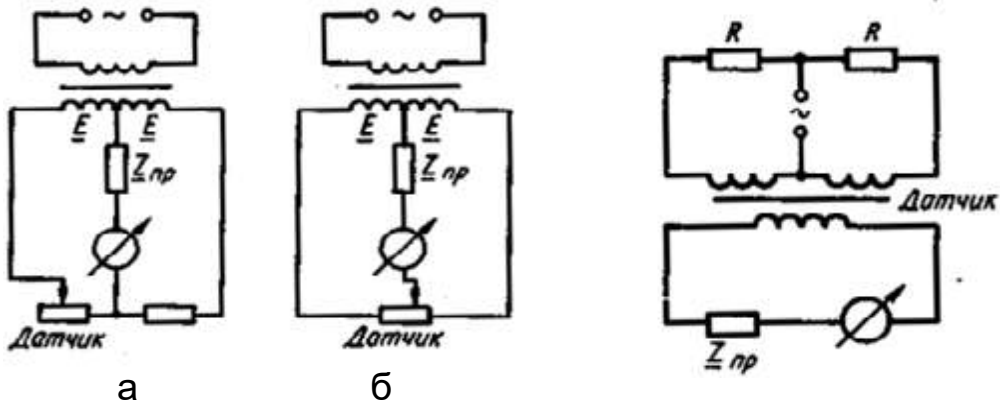


Рис. 2.6. Диференціальні схеми підключення параметричних датчиків

Рис. 2.7. Диференціальна схема підключення генераторного датчика

Для розрахунку струмів у диференціальній схемі (див. рис. 2.6, а) використовуємо метод накладення: спочатку визначимо струми від однієї ЕРС, потім — від іншої (рис. 2.8).

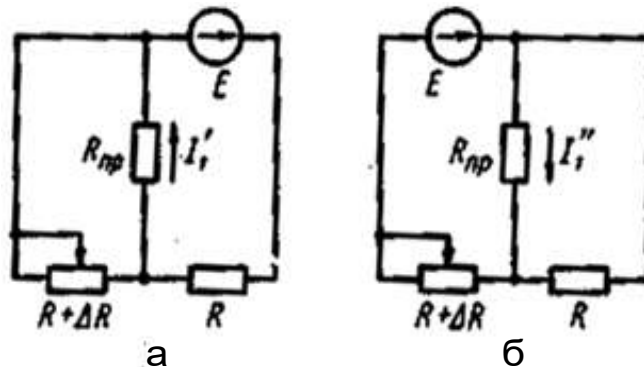


Рис. 2.8. До розрахунку диференціальної схеми підключення датчика

Струм через прилад для розрахункової схеми (див. рис. 2.8, а)

$$I'_{\text{пр}} = \frac{1}{R_{\text{пр}}} \cdot \left[E - \frac{E \cdot R}{R + R_{\text{пр}} \cdot (R + \Delta R) / (R_{\text{пр}} + R + \Delta R)} \right]$$

Струм через прилад для розрахункової схеми (див. рис. 2.8, б)

$$I''_{\text{пр}} = \frac{1}{R_{\text{пр}}} \cdot \left[E - \frac{E \cdot (R + \Delta R)}{R + \Delta R + R_{\text{пр}} \cdot R / (R + R_{\text{пр}})} \right]$$

Результуючий струм через прилад

$$\Delta I_{\text{пр}} = I'_{\text{пр}} - I''_{\text{пр}} = \frac{E}{R_{\text{пр}}} \cdot \left[\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_{\text{пр}} \cdot R / (R_{\text{пр}} + R)} - \frac{R}{R + R_{\text{пр}} \cdot (R + \Delta R) / (R_{\text{пр}} + R + \Delta R)} \right]$$

2.5. Компенсаційні вимірювальні схеми

Компенсаційні схеми використовують для вимірювання неелектричних величин, які перетворюються датчиками на ЕРС або напругу. Сигнал датчика порівнюється з компенсувальною напругою, яка виробляється потенціометром. Підбір компенсувальної напруги виконується вручну або автоматично.

Прилади з автоматичною компенсацією називають також автоматичними потенціометрами.

Розглянемо найпростішу компенсаційну схему (рис. 2.9) з ручним зрівноважуванням.

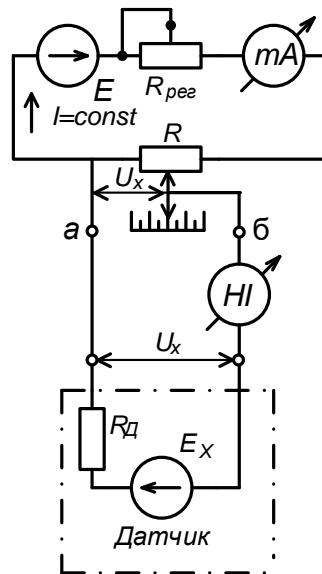


Рис.2.9. Компенсаційна вимірювальна схема з ручним зрівноважуванням

Вимірювана ЕРС E_x або напруга U_x зрівноважуються рівною і протилежною за знаком напругою U_k , яка знімається зі змінного дротяного резистора R . Цей резистор має два нерухомих виводи і один рухомий,

виконаний у вигляді щітки, яка ковзається по дроту. Весь опір резистора R підключено в ланцюг джерела живлення з ЕРС E . Змінний опір R_K пропорційний переміщенню x движка (щітки): $R_K = (R/l) \cdot x$, де l – загальна довжина дротяної намотки між нерухомими виводами. Відповідно компенсувальна напруга U_K буде пропорційною переміщенню движка x , $U_K = (IR/l) \cdot x$, де I – струм, який проходить через резистор R під дією ЕРС E .

Движок необхідно переміщувати до тих пір, поки компенсувальна напруга U_K не зрівняється з вимірюваною напругою U_x : $U_K = U_x$. Для визначення положення точної компенсації використовується чутливий прилад (гальванометр або мікроамперметр). Струм через прилад

$$I_{\text{пр}} = (U_x - U_K) / (R_D + R_{\text{пр}} + R_K), \quad (2.22)$$

де R_D – опір датчика; $R_{\text{пр}}$ – опір пристрою.

Якщо компенсація відбулася, то струм через прилад дорівнює нулю: $I_{\text{пр}} = 0$. Отже, прилад у цьому випадку потрібен не для вимірювання струму, а для визначення його нульового значення. Тому такий прилад називають нуль-індикатором (НІ). Для отримання значення вимірюваної напруги движок можна з'єднати зі стрілкою, а вздовж резистора R розташувати шкалу, проградувати її в одиницях напруги або відразу в одиницях тієї неелектричної величини, яка перетворюється датчиком на ЕРС E_x . Зазначимо, що при компенсаційному методі вимірювання $E_x = U_x$. Дійсно, $U_x = E_x - I_{\text{пр}}R_D$, але у момент компенсації $I_{\text{пр}} = 0$.

Точність вимірювання при компенсаційному методі залежить від стабільності підтримки струму в ланцюзі живлення резистора R . Адже саме від сили цього струму залежить значення компенсувальної напруги U_K . Якщо ЕРС джерела живлення E зменшилася (через розряд акумулятора або батарейки), то зменшиться і струм. Для компенсації доведеться на більшу відстань x перемістити движок резистора R , і стрілка вкаже на інше, помилкове значення вимірюваної величини. Для підтримки стабільного струму живлення можна використовувати резистор регулювання $R_{\text{рег}}$ і міліамперметр або застосувати джерело стабілізованої напруги.

3. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕННЯ ТА ПЕРЕМІЩЕННЯ

3.1. Потенціометричні вимірювальні перетворювачі

Потенціометричний вимірювальний перетворювач (датчик) являє собою змінний електричний опір, величина вихідної напруги якого залежить від положення струмознімального контакту (рис. 3.1).

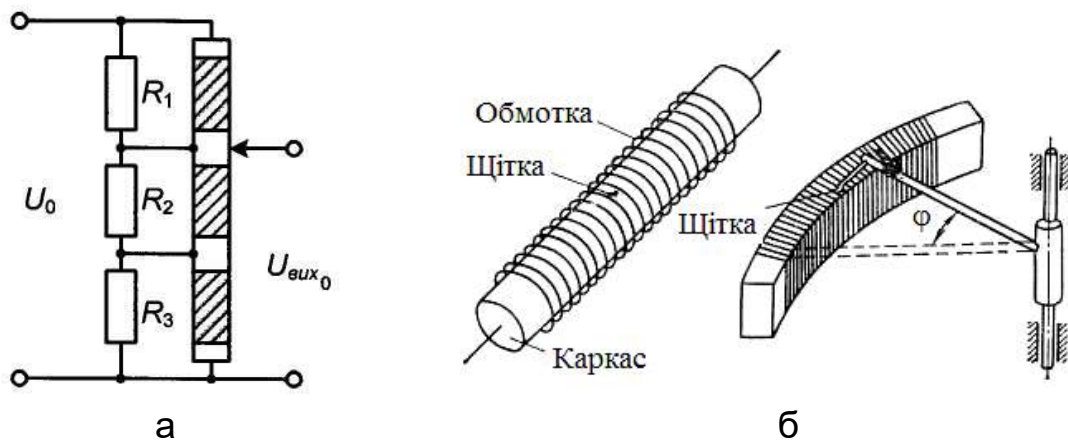


Рис. 3.1. Потенціометричні вимірювальні перетворювачі:
а – ламельний; б – безперервного намотування

Потенціометричні датчики призначені для вимірювання й перетворення лінійних і кутових переміщень на електричний сигнал, а також для відтворення найпростіших функціональних залежностей в автоматичних і обчислювальних пристроях неперервного типу. Іноді потенціометр застосовують як перетворювальний елемент. У цьому випадку його з'єднують з яким-небудь чутливим елементом.

За способом виконання резистора потенціометричні датчики розподіляються на ламельні, безперервного намотування і з резистивним шаром. У ламельних потенціометрах використовуються постійні резистори, що припаюються до ламелей (див. рис. 3.1, а).

Під час руху струмознімача по контактних ламелях опір змінюється. У таких потенціометрах змінення опором може відбуватися в широких межах.

У потенціометрах неперервного намотування змінним опором є намотаний на каркас в один ряд тонкий дріт, по зачищеній поверхні якого ковзає струмознімач. Опір таких потенціометрів становить від декількох десятків омів до десятків кілоомів. Таким чином, потенціометр неперервного намотування складається з каркаса, обмотки і струмознімача (див. рис. 3.1, б).

Каркас, виготовлений з ізоляційних матеріалів, має форму стрижня, кільця або вигнутої пластинки. Як ізоляційний матеріал використовують гетинакс, текстоліт, кераміку або матеріал, покритий непровідним шаром оксиду.

Обмотку виготовляють з емальованого дроту, діаметр якого визначає точність потенціометра. Датчики високого класу точності намотуються дротом діаметром 0,03...0,1 мм, датчики низького класу – 0,1...0,4 мм. Як обмотувальний дріт застосовують константан, манганін, фехраль і сплави на основі благородних металів. Обмотка укладається на каркас рівномірно, оскільки це також впливає на точність роботи датчика.

Струмознімач (щітка) виконується з більш м'якого матеріалу, ніж матеріал обмотувального дроту, щоб уникнути перетирання витків при

тривалій роботі. Движок має форму вигнутої пружної пластини для створення контактного тиску з силою, що коливається від 0,005 до 0,15 Н.

Допустима густина струму залежить від матеріалу проводу й умов охолодження каркаса. При неперервній роботі потенціометра з манганіною або константовою обмоткою перегрів не повинен перевищувати 40...50 °С, що може бути досяжним при густині струму не більш 10 А/мм², якщо каркас виготовлений із пластмаси, і 30 А/мм² для потенціометрів з металевим каркасом, що має кращу тепловіддачу. Використання як обмотки сплавів з металів дає можливість підвищити рівень допустимого перегріву до 70...80 °С, що сприяє застосуванню значно більшої густини струму — близько 40...50 А/мм².

Переваги потенціометричних датчиків:

- найпростіший принцип дії;
- помірна вартість;
- високий рівень вимірюваного сигналу;
- компактність і мала вага;
- стабільність показань.

Недоліки:

- внутрішнє тертя, що знижує точність, призводить до зносу і шумів, зменшує термін служби;
- вплив навколишнього середовища (вологість, пил);
- вібрація контактів.

Залежно від характеру руху повзунка потенціометри поділяють на датчики лінійного та кутового переміщення (рис. 3.2). Щітка датчика лінійних переміщень робить прямолінійний поступальний рух, а щітка датчика кутового переміщення — коловий рух (див. рис. 3.2, а, б).

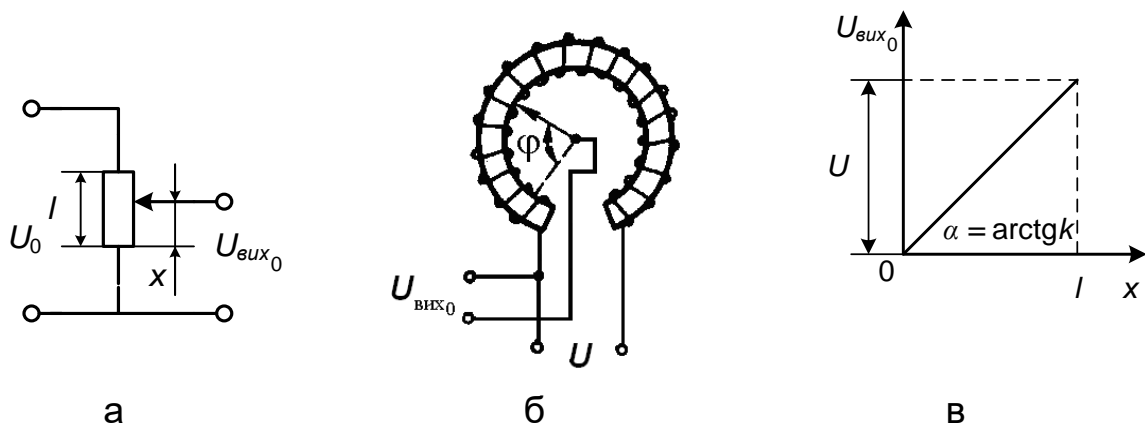


Рис. 3.2. Потенціометричні датчики: а – лінійного переміщення; б – кутового переміщення; в – статична характеристика датчика

Принцип дії датчика з неперервним намотуванням полягає у такому: до затискачів потенціометра прикладається напруга постійного або змінного струму незмінної величини. При переміщенні повзуна потенціометра вихідна напруга $U_{вих0}$ змінюється пропорційно вхідній

величині x . Тут здійснюється перетворення переміщення на електричну напругу.

Для режиму холостого ходу статична характеристика датчика є лінійною, оскільки справедливим є співвідношення

$$U_{\text{вих}_0} = \frac{U}{R} \cdot r, \quad (3.1)$$

де U — напруга живлення потенціометра; R — опір обмотки; r — опір частини обмотки, що припадає на довжину переміщення x движка потенціометра (див. рис. 3.2, а).

З огляду на те, що

$$\frac{r}{R} = \frac{x}{l},$$

де l — загальна довжина обмотки, одержимо

$$U_{\text{вих}_0} = \frac{U}{l} \cdot x = kx, \quad (3.2)$$

де k — коефіцієнт перетворення потенціометра.

Для потенціометра кутового переміщення за відсутності навантаження

$$U_{\text{вих}_0} = k\varphi, \quad (3.3)$$

де φ — кут повороту движка від нульового положення (див. рис. 3.2, б).

З отриманих виразів (3.1) – (3.3) випливає, що статична характеристика лінійних потенціометрів за відсутності навантаження являє собою пряму, яка проходить через початок координат, з коефіцієнтом нахилу k (див. рис. 3.2, в). Наведена статична характеристика дає можливість зробити висновок про те, що розглянуті потенціометричні вимірювальні перетворювачі не реагують на знак вхідного сигналу, тобто вони належать до класу одноктактних елементів.

Однак на основі одноктактних потенціометрів можна побудувати двотактні вимірювальні перетворювачі, що реагують на знак вхідного сигналу. Існує кілька схем підключення потенціометрів, що утворять двотактний потенціометричний датчик (рис. 3.3).

Для схем, зображених на рис. 3.3, а, б, статична характеристика являє собою пряму I, а для схем на рис. 3.3, в, г — пряму II, (рис. 3.4).

Відмінність характеристик полягає в їх крутості, яка визначається тим, що при зміні вхідного сигналу він відпрацьовується в схемах між двома повзунками, що відхиляються від нейтрального положення в протилежні напрямки на величину x .

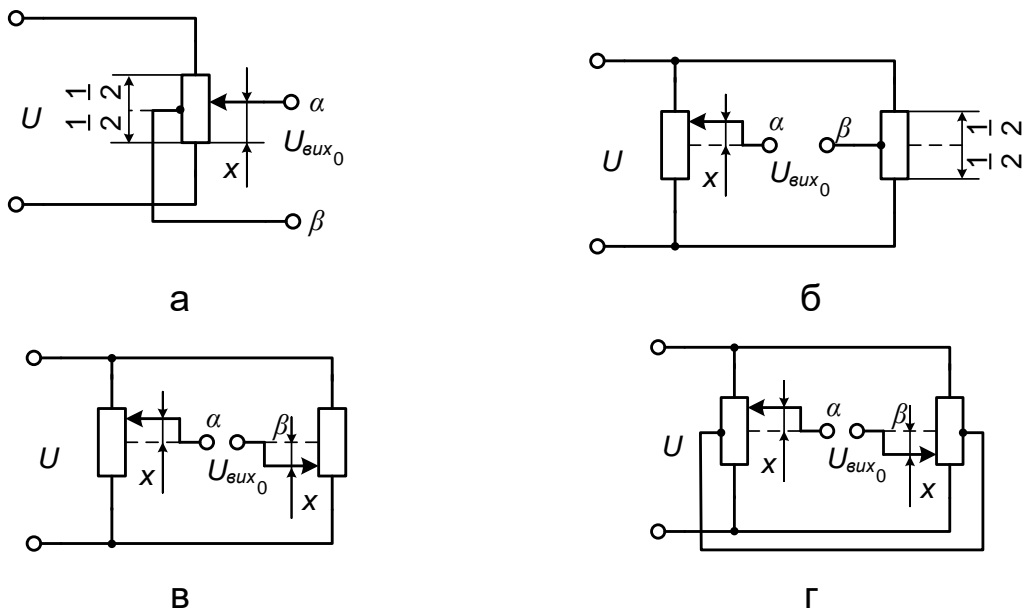


Рис. 3.3. Схеми двотактних потенціометричних вимірювальних перетворювачів

При цьому потенціал точки α зростає на величину U_α , а потенціал точки β змінюється за абсолютною величиною як і потенціал точки α , але має протилежний знак.

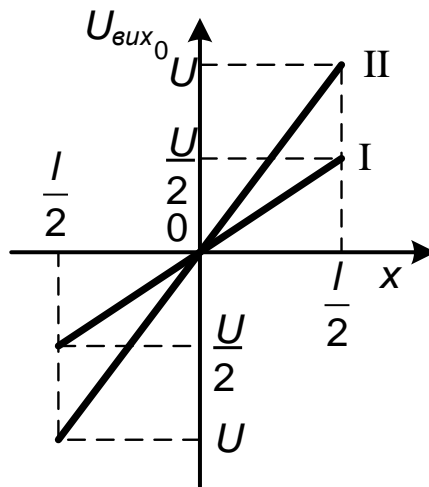


Рис. 3.4. Статичні характеристики двотактних потенціометричних вимірювальних перетворювачів

Різниця потенціалів U_α і U_β збільшується вдвічі порівняно зі схемами (див. рис. 3.3, а, б), де потенціал однієї з точок увесь час зберігає постійне значення. Звідси випливає, що схеми з двома щітками мають при тих же параметрах потенціометрів удвічі більший коефіцієнт перетворення сигналу порівняно зі схемами з однією щіткою.

Розглянуті ідеальні характеристики потенціометричних датчиків можуть сильно відрізнятися від реальних через наявність різного роду похибок, які необхідно враховувати при проектуванні систем контролю й керування.

3.2. Функціональні потенціометричні датчики

В автоматичних і обчислювальних системах крім лінійних потенціометричних датчиків часто застосовуються потенціометри, в яких зв'язок між вхідною й вихідною величинами описується деякою функціональною залежністю вигляду

$$U_{\text{вих}} = \{kx^2; k \ln x; k \sin x; \sqrt[2]{x}; \dots\}. \quad (3.4)$$

Функціональні потенціометричні датчики можна виготовляти такими способами: змінням діаметра дроту уздовж намотування; змінням кроку намотування; застосуванням каркаса визначеної конфігурації; шунтуванням ділянок лінійних потенціометрів опорами різної величини. Перші два з них пов'язані з труднощами технологічного характеру, тому частіше використовують третій і четвертий шляхи.

Визначимо конфігурацію каркаса, за допомогою якого можна реалізувати деяку функціональну залежність загального вигляду

$$U_x = f(x).$$

Схему функціонального потенціометричного датчика зображено на рис. 3.5.

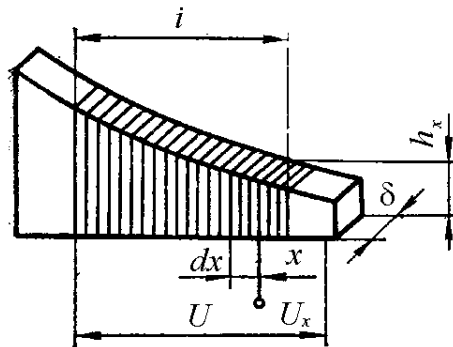


Рис. 3.5. Приклад конфігурації каскаду функціонального потенціометра

Нехай x є положення щітки потенціометра; h_x — висота каркаса в цій координаті; U_x — напруга, що знімається з потенціометра в цій координаті; l — довжина намотування потенціометра; b — товщина пластини каркаса; W — кількість витків; R — опір потенціометра; r_x — опір частини потенціометра, що відповідає довжині намотування x ; S — площа поперечного розрізу намотувального дроту; ρ — питомий опір.

При переміщенні щітки з положення x на величину dx відбувається зміння опору на величину

$$dr_x = \frac{2\rho \cdot (b + h_x) \cdot \frac{W}{l} dx}{S} = \frac{2\rho \cdot h_x \cdot W}{l \cdot S} dx.$$

Оскільки $b \ll h_x$, то можна вважати, що $(b + h_x) \approx h_x$

Зі змінням опору на величину dr_x вихідна напруга змінюється на величину

$$dU_{\text{вих}} = \frac{U}{R} dr_x = \frac{2U \cdot W \cdot \rho}{R \cdot l \cdot S} h_x dx. \quad (3.5)$$

На основі формули (3.5) визначимо значення h_x , що описує конфігурацію каркаса потенціометричного датчика

$$h_x = k \frac{dU_{\text{вих}}}{dx}, \quad (3.6)$$

де коефіцієнт

$$k = \frac{R \cdot l \cdot S}{2U \cdot W \cdot \rho}.$$

Вираз (3.6) дає можливість визначити закон змінення ширини каркаса h_x при заданому виді функціонального зв'язку

$$U_x = f(x).$$

Так, при реалізації квадратичної залежності функція $U_x = f(x)$ набуває вигляду

$$U_{\text{вих}} = k_0 \cdot x^2. \quad (3.7)$$

Підставивши (3.7) у (3.6), одержимо

$$h_x = 2k \cdot k_0 \cdot x = c \cdot x. \quad (3.8)$$

Таким чином, квадратичну залежність можна реалізувати за допомогою потенціометра, висота каркаса якого буде змінюватися за лінійним законом (3.8).

До переваг дротових потенціометричних вимірювальних перетворювачів можна віднести простоту конструкції, малі габарити й масу; можливість одержання лінійних статичних характеристик з високою точністю; стабільність характеристик; можливість роботи на змінному й постійному струмі; малий перехідний опір; низький температурний коефіцієнт опору (ТКО). Недоліками цих елементів слід вважати наявність ковзного контакту, що може стати причиною відмовлень унаслідок окиснювання контактної доріжки, перетирання витків або відгинання повзунка; похибки у роботі внаслідок навантаження; порівняно невеликий коефіцієнт перетворення й високий поріг чутливості; наявність шумів; схильність до електроерозії під дією імпульсних розрядів; обмеженість швидкості лінійного переміщення або частоти обертання (до $100 \dots 200 \text{ хв}^{-1}$) струмознімача внаслідок його вібрацій під час переходу з витка на виток і підвищення при цьому рівня динамічного шуму; обмежена можливість використання на змінному струмі підвищеної частоти

(до 1 кГц), що обумовлено зростанням індуктивності та ємності обмотки; низька зносостійкість.

Прагнення подолати означені недоліки дротових потенціометричних датчиків привели до створення прецизійних потенціометрів з резистивними елементами на основі провідної пластмаси. Однорідна за структурою резистивна плівка забезпечує низький рівень динамічних шумів і можливість роботи при високих швидкостях переміщення струмознімача (до 1000 хв^{-1}), а мала індуктивність і ємність створюють сприятливі умови при роботі недротових потенціометрів на високих частотах. Однак ці елементи мають більш низьку точність і стабільність, а також великий температурний коефіцієнт опору і високий перехідний опір у точці контакту.

На реальні характеристики ПД впливають такі похибки:

Зона нечутливості — при переході контакту з одного витка проводу на інший відбувається стрибок напруги.

Нерівномірність статичної характеристики пов'язана з коливаннями діаметра дроту по довжині, його питомим опором і точністю намотування.

Наявність люфту між движком контакту і втулкою.

Нерівномірність натиску щітки впливає на величину опору контакту.

Вплив електричного опору навантаження R_n . Її величину вибирають у 10 — 100 разів більше опору датчика.

Розрізняють такі типи потенціометричних датчиків:

T / TS — високоточний прилад (0,075 %), що працює в діапазоні осьових переміщень 150 мм. Використовують для колової швидкості до 10 м/с.

TR / TRS — такий же, як попередній, але з поворотною пружиною. Переміщення досягає 100 мм. Витримує вищі поперечні навантаження на наконечнику.

$TE1$ — модель, яка містить електронну схему для нормалізації сигналів з аналоговим виходом. $TE1$ з поворотною пружиною — модифікація для вирішення більш широкого кола завдань. Датчик більш стійкий при підвищених поперечних навантаженнях.

TEX — ПД з поворотною головкою і з відстеженням лінійних переміщень об'єктів на відстань до 300 мм.

$TX2$ — модель з поворотною головкою або з хомутами для кріплення. Застосовуються у важких умовах експлуатації. Рівень захисту становить IP 67, точність — 0,05 %.

3.3. Індуктивні вимірювальні перетворювачі

Індуктивні датчики (ІД) призначені для вимірювання порівняно малих кутових або лінійних механічних переміщень і їх перетворення на електричний сигнал змінного струму. В основу роботи індуктивного вимірювального перетворювача покладено властивість дроселя з

повітряним зазором змінювати індуктивність при змінній величині повітряного зазору. Використовують ІД для вимірювання переміщень, тиску, сил, рівнів, витрат газу та рідини: вимірюваний параметр за допомогою різних чутливих елементів перетворюється на змінення переміщення.

Переваги ІД:

- простота і міцність конструкції,
- відсутність ковзних контактів;
- можливість підключення до джерел промислової частоти;
- відносно велика вихідна потужність (до десятків ват)
- значна чутливість.

Недоліки:

- точність залежить від стабільності напруги живлення за частотою;
- можлива робота тільки на змінному струмі.

Найпростіший індуктивний датчик складається з ярма 1, на якому міститься обмотка 2 якоря 3, який утримується пружинами (рис. 3.6, а). Ярмо та якір виконуються із шихтованого магнітом'якого матеріалу. Обмотка намотується мідним дротом з малим активним опором.

Принцип дії однопотактного індуктивного вимірювального перетворювача полягає в такому. На обмотку 2 через опір навантаження R_H подається напруга живлення змінного струму з частотою від 50 до декількох кілогерц. Струм, що проходить в ланцюзі обмотки,

$$I = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{(R_H + r_d)^2 + (\omega L)^2}}, \quad (3.9)$$

де r_d — активний опір дроселя; ω — частота живильної напруги;
 L — індуктивність обмотки датчика.

Оскільки активний опір $R = R_H + r_d$ являє собою постійну величину, то змінення струму I може відбуватися тільки внаслідок змінення індуктивної складової опору $x_L = \omega L$, яка у свою чергу залежить від величини повітряного зазору δ .

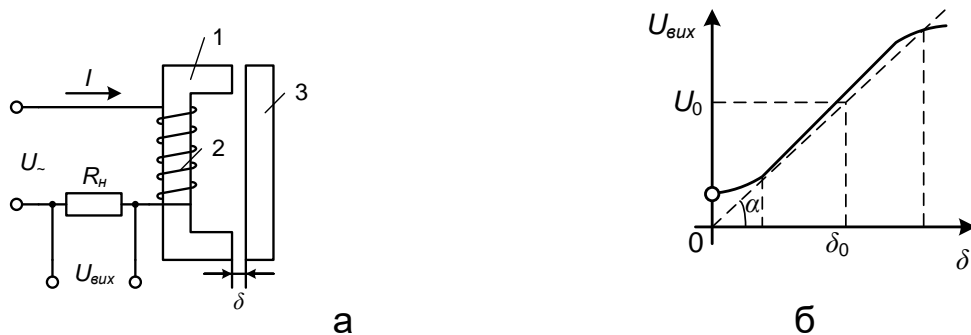


Рис. 3.6. Електрична схема однопотактного індуктивного датчика (а) та його статична характеристика (б)

Таким чином, кожному значенню зазору δ відповідає цілком певне значення струму I , що створює спад напруги на резисторі R_H :

$$U_{\text{вих}} = I \cdot R_H, \quad (3.10)$$

яка є вихідним сигналом вимірювального перетворювача.

Зв'язок між вхідним сигналом і механічним переміщенням δ , вихідним сигналом та електричною напругою $U_{\text{вих}}$ визначається статичною характеристикою

$$U_{\text{вих}} = f(\delta). \quad (3.11)$$

Аналітичний вираз функції (3.11) можна одержати, установивши зв'язок між індуктивністю L і величиною зазору δ . Будемо вважати повітряний зазор досить малим. Тоді потоками розсіювання можна знехтувати і знайти величину потокозчеплення

$$\Psi = \Phi \cdot W, \quad (3.12)$$

де Φ — магнітний потік, який створюється обмоткою; W — кількість витків обмотки.

З іншого боку,

$$\Psi = L \cdot I. \quad (3.13)$$

Порівнюючи (3.12) та (3.13), одержуємо

$$L = \Phi \cdot W / I. \quad (3.14)$$

Магнітний потік Φ прямо пропорційний силі намагнічування й обернено пропорційний магнітному опору

$$\Phi = \frac{F}{R_{\text{м.з}} + R_{\text{м}}}.$$

Тут $R_{\text{м.з}}$ — магнітний опір зазору; $R_{\text{м}}$ — магнітний опір заліза.

Сила намагнічування $F = IW$, а магнітний опір зазору набагато більший за опір заліза:

$$L = \frac{0.4\pi W^2}{\frac{2\delta}{\mu_0 S}} 10^{-8} \text{ Гн}, \quad (3.15)$$

де μ_0 — магнітна проникність повітря; S — площа поперечного перерізу магнітопроводу.

З огляду на (3.15) і здійснивши послідовно підстановку значення L в (3.11) та (3.12), одержимо

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\sim} R_H}{\sqrt{(R_H + r_D)^2 + \left(\frac{0.4\pi\mu_0 S W^2 \omega}{2\delta} 10^{-8}\right)^2}}. \quad (3.16)$$

В існуючих вимірювальних перетворювачах активний опір обмотки r_d , а також опір навантаження набагато менший за індуктивний опір, тому

$$U_{\text{вих}} \approx \frac{2U_{\sim} R_H \cdot 10^8}{0,4\pi\mu_0 S W^2 \omega} \delta = K\delta. \quad (3.17)$$

Таким чином, напруга на виході датчика при змінненні зазору змінюється за лінійним законом, тобто статична характеристика являє собою пряму, що проходить через початок координат під кутом нахилу $a = \arctg(k)$ до осі абсцис (див. рис. 3.6, б), це ідеальна статична характеристика. Реальну характеристику перетворювача показано на рис. 3.6, б суцільною лінією.

Аналіз принципу дії і статичної характеристики однотактного індуктивного вимірювального перетворювача дає можливість зазначити такі його недоліки:

1) фаза вихідного сигналу не залежить від напрямку переміщення якоря;

2) для вимірювання переміщення в обох напрямках має бути початковий зазор δ_0 , що приводить до наявності початкового значення напруги U_0 ;

3) на якір постійно діє електромагнітна сила, що прагне притягти його до ярма. При великій потужності сигналу вихідного ланцюга вона може набувати істотних значень, що потребує введення компенсуючих сил, які створюються протидіючими пружинами. Це значно ускладнює пристрій. Через зазначені недоліки однотактні індуктивні вимірювальні перетворювачі використовуються тільки як допоміжні елементи систем. У головних ланцюгах систем контролю й керування застосовують двотактні індуктивні вимірювальні перетворювачі.

Двотактні індуктивні вимірювальні перетворювачі

Існують дві основні схеми підключення двотактних індуктивних вимірювальних перетворювачів: диференціальна та мостова.

Розглянемо диференціальну схему. Схема підключення індуктивного вимірювального перетворювача припускає наявність трансформатора із середньою точкою (рис. 3.7).

Обидві обмотки вимірювального перетворювача мають однакову кількість витків W . Осердя обмоток ідентичні за своїми характеристиками. Опір навантаження підключається між середньою точкою обмотки трансформатора і середньою точкою обмоток вимірювального перетворювача. При такому підключенні струм, що проходить через опір навантаження, дорівнює різниці струмів правої і лівої половин схеми

$$I_{\text{вих}} = I_1 - I_2. \quad (3.18)$$

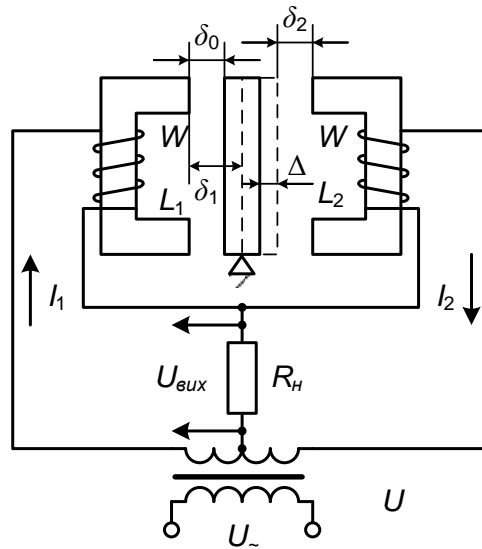


Рис. 3.7. Диференціальна схема двотактного індуктивного вимірювального перетворювача

Вихідна напруга визначається як

$$U_{\text{вих}} = (I_1 - I_2)R_H.$$

У вихідному положенні зазори між якорем і ярмом однакові

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_0.$$

Тоді індуктивності кожної половини датчика, обумовлені величиною зазорів,

$$L_1 = L_2 = L_0.$$

Отже, струми I_1 і I_2 дорівнюють один одному, але протилежні за фазою, а струм навантаження згідно з (5.10) дорівнює нулю. Це означає, що напруга на виході датчика відсутня. Таким чином, двотактний індуктивний датчик забезпечує рівність нулю вихідного сигналу ($U_{\text{вих}} = 0$) при нульовому сигналі на вході ($\Delta = 0$).

При переміщенні якоря на величину Δ ширина зазорів змінюється: один збільшується, а другий зменшується на ту саму величину:

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta;$$

$$\delta_2 = \delta_0 - \Delta.$$

Це приводить до змінення індуктивностей, оскільки магнітний опір першого зазору збільшується, а другого – зменшується, що відповідає зменшенню значення індуктивності L_1 і збільшенню значення індуктивності L_2 . При невеликих переміщеннях індуктивність змінюється майже за лінійним законом. На рис. 3.8 зображено графік залежності

$$L = f(\Delta)$$

для обох половин індуктивного датчика.

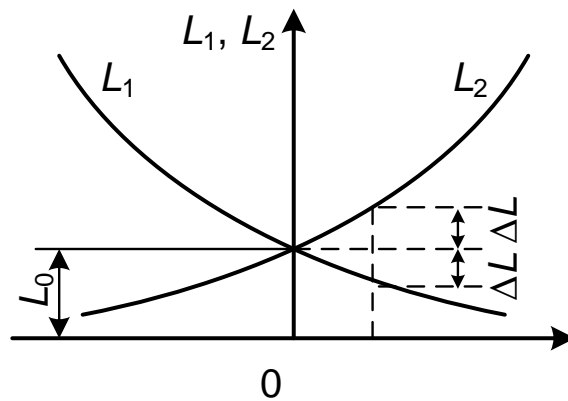


Рис. 3.8. Графік залежності індуктивності електричного плеча датчика від величини зазору

Відповідно до графіка

$$L_1 = L_0 - \Delta L; \quad L_2 = L_0 + \Delta L.$$

Змінення індуктивностей L_1 та L_2 призведе до порушення балансу струмів: струм I_1 збільшиться, а I_2 — зменшиться. У навантаженні виникне результуючий струм, що створює вихідну напругу. При зміні напрямку переміщення якоря фаза вихідної напруги зміниться на 180° відносно напруги опорного живлення.

Трансформаторні індуктивні вимірювальні перетворювачі, або індукційні датчики, призначені для вимірювання регульованої координати положення, що являє собою механічне переміщення малих і великих діапазонів.

Принцип дії трансформаторних індуктивних вимірювальних перетворювачів ґрунтується на використанні змінення взаємної індуктивності між обмотками під час переміщення якоря (рис. 3.9). Обмотки ланцюга живлення W_1 та W_2 підключаються зустрічно і мають однакову кількість витків: $W_1 = W_2 = W$.

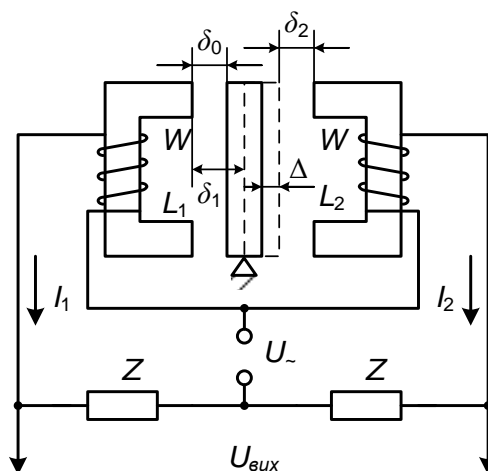


Рис. 3.9. Трансформаторний індукційний вимірювальний перетворювач

Отже, магнітні потоки Φ_1 та Φ_2 , які створюються струмом, що проходить в цих обмотках, будуть спрямовані в середньому осерді назустріч один одному, а вихідна напруга визначиться як

$$U_{\text{вих}} = 4.44 \cdot f \cdot W_0 \cdot (\Phi_1 - \Phi_2), \quad (3.19)$$

де f — частота напруги живлення;

W_0 — кількість витків обмотки середнього осердя.

Потоки Φ_1 і Φ_2 пропорційні індуктивностям відповідних обмоток:

$$\Phi_1 = \frac{L_1 \cdot I}{W}; \quad \Phi_2 = \frac{L_2 \cdot I}{W}. \quad (3.20)$$

Зазор δ_0 є постійним, тому на величину індуктивності впливає тільки площа перекриття осердя S , що змінюється під час переміщенні якоря.

Таким чином, у нейтральному положенні ($\Delta = 0$) площі перекриття S_1 і S_2 дорівнюють одна одній, що приводить до рівності потоків Φ_1 і Φ_2 , а отже, $U_{\text{вих}} = 0$

Під час переміщення якоря на величину Δ відбувається змінення площ перекриття крайніх стрижнів на ΔS . Тоді на основі (3.19), (3.20) справедливі співвідношення:

$$\Phi_1 = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot W I 10^8}{\delta_0} \cdot (S_0 + \Delta S),$$

$$\Phi_2 = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot W I 10^8}{\delta_0} \cdot (S_0 - \Delta S),$$

а вихідна напруга датчика відповідно до рівняння має значення

$$U_{\text{вих}} = k_1 \cdot \Delta S.$$

Залежність $U_{\text{вих}}$ від Δ наведено на рис. 3.10.

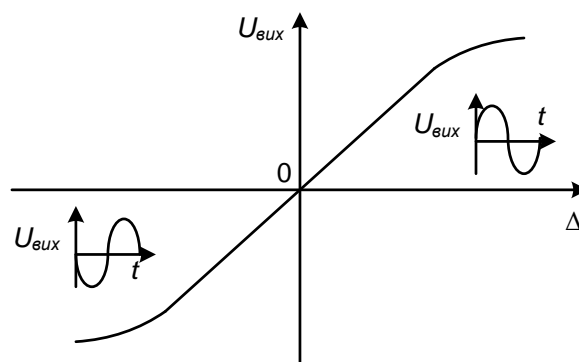


Рис. 3.10. Статична характеристика трансформаторного індукційного вимірювального перетворювача

З огляду на те, що збільшення площі ΔS є пропорційним переміщенню якоря Δ

$$U_{\text{вих}} = k\Delta. \quad (3.21)$$

Таким чином, статична характеристика трансформаторного індуктивного вимірювального перетворювача у робочому діапазоні є лінійною залежністю.

Варіанти конструкцій індуктивних датчиків подано на рис. 3.11.

Тип датчику		Змінний зазор	Змінна площа зазору	Соленоїдні
Індуктивні	Одинарні			
	Диференціальні			
Взаємніндуктивні	Одинарні			
	Диференціальні			

Рис. 3.11. Варіанти конструкцій індуктивних датчиків

Динамічні властивості індуктивних вимірювальних перетворювачів визначають, виходячи з умов їх роботи. Зазвичай механічні переміщення, що являють собою вхідний сигнал датчика, мають більш низьку частоту порівняно з частотою живильної напруги. Тому змінення амплітуди вихідної напруги з достатньою точністю визначається рівнянням сталого режиму (3.21). Отже, кожний з розглянутих індуктивних вимірювальних перетворювачів можна вважати безінерційною ланкою з передатною функцією

$$W(p) = \frac{U(p)}{\Delta(p)} = k$$

і застосовувати для його опису всі динамічні характеристики підсилювальної ланки з огляду при цьому на реально існуючий робочий діапазон частот датчика. Коли діапазон вимірюваних переміщень регульованої координати охоплює ділянки насичення (див. рис. 3.10), лінійна залежність індуктивного датчика є неприйнятною, оскільки вона не враховує частотних перекручувань сигналу, внесених цим елементом. У цьому випадку можна скористатися еквівалентним комплексним коефіцієнтом передачі, обчисливши коефіцієнти гармонійної лінеаризації.

3.4. Ємнісні вимірювальні перетворювачі

Ємнісні вимірювальні перетворювачі являють собою конденсатори, в яких змінення відстані між пластинами, площі перекриття пластин або діелектричної проникності діелектрика, поміщеного між пластинами, перетвориться на змінення ємності.

Ємнісні вимірювальні перетворювачі можна поділити на такі групи залежно від вибраної класифікаційної ознаки:

1) за призначенням ємнісного датчика: датчики лінійного й кутового переміщення; датчики рівня й лінійних розмірів; датчики температури; датчики зусиль;

2) за конструктивним виконанням: датчики із плоскопаралельними пластинами конденсатора; з циліндричною формою конденсатора; з діелектриком між пластинами; без діелектрика;

3) за видом змінюваного параметра конденсатора: датчики зі змінюваною площею перекриття пластин; зі змінюваним зазором між обкладками конденсатора; зі змінюваною діелектричною проникністю.

Принцип дії і характеристики ємнісних вимірювальних перетворювачів

Ємнісні вимірювальні перетворювачі працюють на змінному струмі. Принцип їхньої дії оснований на змінненні ємності конденсатора під впливом контрольованої координати керованого об'єкта. Ємність визначається співвідношенням

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\delta}, \quad (3.22)$$

де ε — відносна діелектрична проникність діелектрика;

S — площа пластини;

δ — відстань між пластинами;

$\varepsilon_0 = \frac{1}{6\pi \cdot 10^9} \text{ м}^{-1}$ — діелектрична проникність вакууму.

Як видно з виразу, на ємність конденсатора можна впливати зміненням:

— зазору δ між пластинами (рис. 3.12, а);

— площі перекриття S пластин (рис. 3.12, б);

— діелектричної проникності ε речовини, що знаходиться в зазорі δ між обкладками конденсатора (рис. 3.12, в).

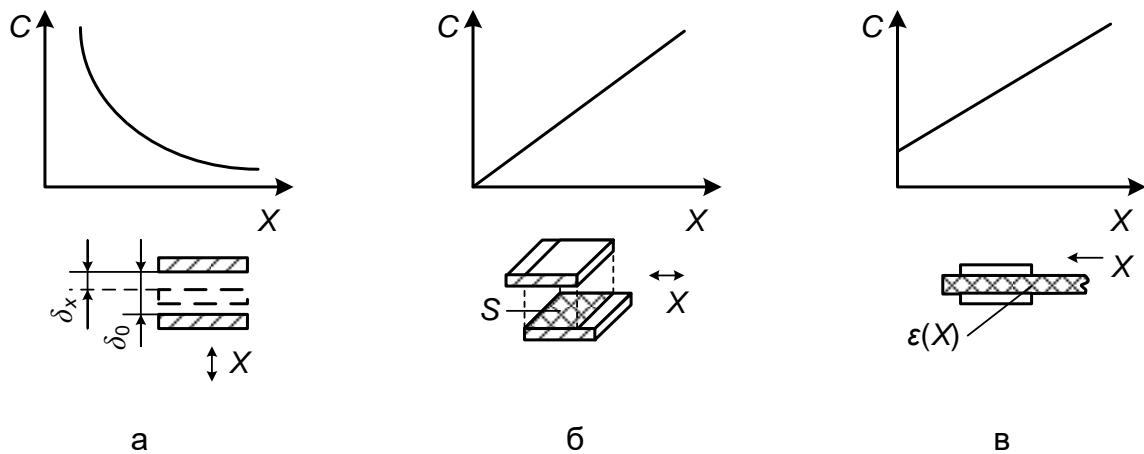


Рис. 3.12. Графіки змінення ємності при зміненні параметрів перетворювача

Вибір того або іншого параметра конденсатора, який буде змінюватись, залежить від характеру вимірюваної величини. Так, при вимірюванні кутових механічних переміщень найбільш зручно використовувати змінення площі перекриття пластин (рис. 3.13).

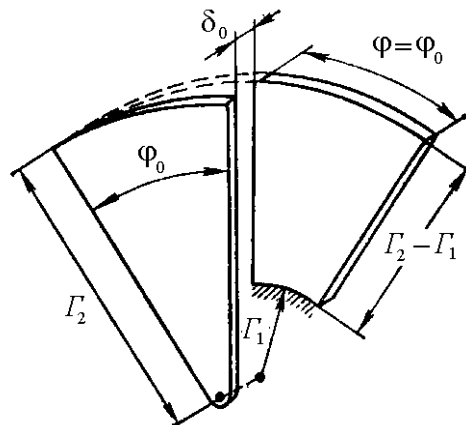


Рис. 3.13. Ємнісний вимірювальний перетворювач кутового переміщення

У цьому випадку ємність вимірювального перетворювача

$$C(\varphi) = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{2\delta_0} (\varphi - \varphi_0)$$

або з огляду на те, що всі величини у виразі є постійними, окрім вимірюваної змінної φ :

$$C = k\varphi.$$

Отже, статична характеристика такого ємнісного датчика буде лінійною. При вимірюванні лінійного переміщення як змінюваного параметра конденсатора можна вибрати величину δ , тоді

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\delta_x},$$

а статична характеристика вимірювального перетворювача буде нелінійною. У зв'язку з цим такі датчики слід застосовувати в тих випадках, коли діапазон змінення контрольованої величини відповідає порівняно невеликій ділянці характеристики, на якій її можна вважати лінійною. При вимірюванні порівняно великих лінійних переміщень доцільно використовувати як змінюваний параметр конденсатора площу перекриття пластин.

Однак розглянуті схеми ємнісних датчиків не мають властивості реверсивності. Подолання цього недоліку здійснюється шляхом застосування мостових схем підключення двотактних ємнісних вимірювальних перетворювачів (рис. 3.14, а).

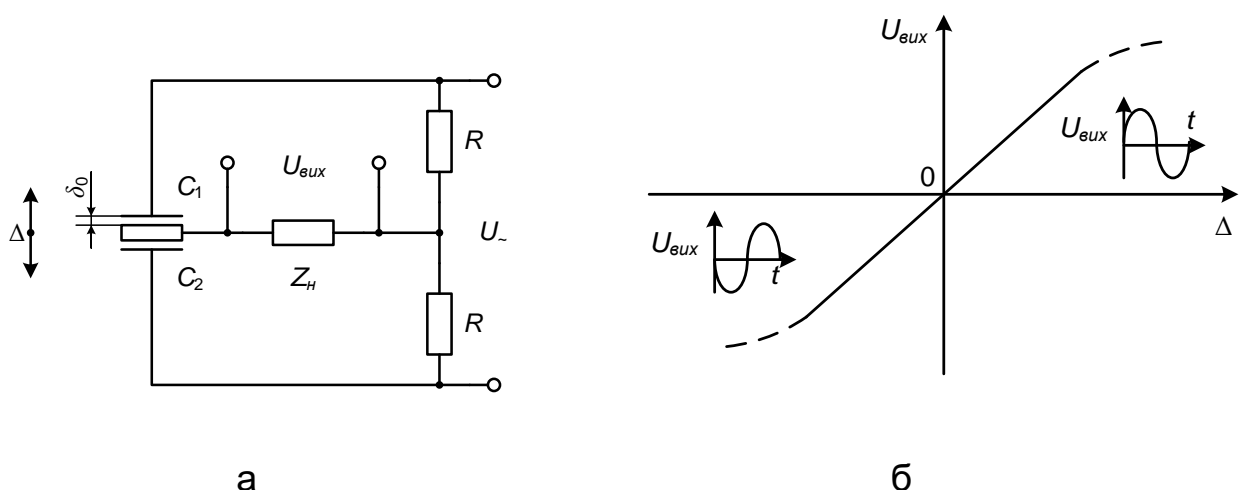


Рис. 3.14. Електрична схема двотактного ємнісного датчика (а) та його статична характеристика (б)

Ємність кожного плеча такого ємнісного датчика відповідно до (3.22)

$$C_1 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\delta_1};$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\delta_2},$$

де δ_1 і δ_2 — величини зазорів для нижньої і верхньої частин схеми відповідно.

При переміщенні $\Delta = 0$, ємності C_1 і C_2 дорівнюють одна одній: $C_1 = C_2 = C_0$. Якщо значення $\Delta \neq 0$, то відбувається змінення ємностей:

$$C_1 = \frac{C_0}{1 + \frac{\Delta}{\delta_0}};$$

$$C_2 = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta}{\delta_0}}.$$

Вихідна напруга мостової схеми

$$U_{\text{вих}} = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \cdot \frac{U}{2} = \frac{U}{2\delta_0} \Delta = k\Delta.$$

Отже, статична характеристика двотактного ємнісного датчика являє собою лінійну функцію (рис. 3.14, б). При змінненні напрямку переміщення середньої пластини фаза вихідного сигналу змінюється на 180° відносно фази напруги живлення датчика, що є опорною напругою.

Слід зазначити, що підключення навантаження призводить до спотворення лінійності, однак при малих значеннях Δ характеристику з достатнім ступенем точності можна вважати лінійною.

Застосування ємнісних вимірювальних перетворювачів для вимірювання таких фізичних параметрів, як лінійні розміри, концентрація речовини, температура, зусилля основане на використанні властивості змінення діелектричної проникності залежно від змінення вимірюваного параметра, наприклад, при змінненні вологості проникність повітряного зазору між обкладками змінюється. Діелектрична проникність більшості діелектриків не залишається постійною і при змінненні температури, причому їх температурний коефіцієнт можна вважати досить високим.

Підключення ємнісних датчиків зі змінюваною діелектричною проникністю здійснюється за мостовою або диференціальною схемою. Для збільшення чутливості датчика застосовується паралельне підключення

обкладок конденсаторів, для яких створюються однакові умови. При вимірюванні концентрації датчики розміщують у відповідному середовищі.

Перевагами ємнісних вимірювальних перетворювачів є висока чутливість; велика роздільна здатність при малих значеннях вхідного сигналу; простота конструкції, малі габарити й маса; незначна величина сили притягання між пластинами конденсатора, яку необхідно подолати під час переміщення рухомих пластин. Ємнісні вимірювальні перетворювачі є майже безінерційними елементами з передавальною функцією $W(p) = k$, оскільки частота напруги живлення датчика на два і більше порядків перевищує частоту вхідного вимірюваного сигналу.

До недоліків ємнісних вимірювальних перетворювачів слід віднести порівняно низький рівень потужності вихідного сигналу; нестабільність характеристик при зміні параметрів середовища; вплив паразитних ємностей. Для зменшення втрат потужності вихідного сигналу застосовують узгодження навантаження з внутрішнім опором схеми.

Реактивний опір навантаження вибирають таким, що дорівнює за величиною та є зворотним за знаком внутрішньому опору датчика, тобто настроюють схему в резонанс. Для зменшення похибок, спричинених зміненням параметрів навколишнього середовища (температури, вологості), елементи ємнісного датчика виготовляють зі сплавів з малим температурним коефіцієнтом розширення і застосовують герметизацію датчика, що у свою чергу усуває вплив паразитних ємностей, якщо герметичний корпус виконується у вигляді екрана.

4. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ І ТИСКУ

4.1. Методи і особливості вимірювання температури

З усіх фізичних величин найчастіше вимірюваною є температура. Температура являє собою дуже важливу характеристику стану речовини, тому необхідним є ретельний контроль і точні вимірювання температур.

Розрізняють такі методи вимірювання температур:

— оптичні, основані на зміні спектрального розподілу випромінювання або спектральних ліній внаслідок ефекту Доплера, обумовленого тепловим рухом молекул;

— механічні, основані на розширенні твердого тіла, рідини або газу при постійному тиску, на зміні тиску насиченої пари або швидкості звуку;

— електричні, основані на залежності від температури опору, на ефекті Зеєбека (термоелектричний ефект — явище виникнення ЕРС в замкнутому електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різномірних провідників, контакти між якими знаходяться при різних

температурах) або на залежності частоти коливань кварцового кристала від температури.

Авіаційні термометри призначені для вимірювання температури газів у газотурбінних двигунах, масла, повітря в окремих відсіках ЛА, головок циліндрів поршневих двигунів і т.д. Вони можуть бути побудовані на будь-якому фізичному явищі, в якому температура однозначно пов'язана з будь-яким легко вимірюваним параметром (наприклад, зі зміненням об'єму, тиску, ЕРС і т. д.). У зв'язку з цим будь-який термометр має чутливий елемент, що реагує на температуру і перетворює її на іншу фізичну величину, зручну для передачі і вимірювання.

Оскільки чутливий елемент стикається із середовищем, температуру якої необхідно виміряти, то температура чутливого елемента повинна відповідати температурі цього середовища. Збіг цих температур залежить від багатьох факторів і в першу чергу від розміру, форми і матеріалу чутливого елемента, середовища і умов передачі тепла до чутливого елемента.

Тепло до чутливого елемента термометра може передаватися через конвекцію, випромінювання і теплопровідність.

Залежно від того, який відбувається теплообмін між середовищем і чутливим елементом, а також від того, де і температуру якого тіла необхідно виміряти, і вибирають метод вимірювання температури і тип термометра.

4.2. Класифікація термометрів. Механічні термометри

За призначенням усі авіаційні термометри можна поділити на термометри масла, охолоджувальної рідини, циліндрів, навколишнього повітря, вихідних газів реактивного двигуна і т. д.

За принципом дії термометри можна поділити:

- на механічні (біметалічні);
- електромеханічні, тобто механічні термометри з електричною дистанційною передачею показань;
- електричні; до них належать термометри опору і термоелектричні термометри.

Найбільшого поширення на сучасних літальних апаратах набули термометри опору і термоелектричні термометри. Термометри опору використовуються для вимірювання температур до 150...200 °С (термометри масла, охолоджувальної рідини, навколишнього повітря і т. д.).

Термоелектричні термометри використовуються для вимірювання температур до 300...350 °С (термометри циліндрів) і до 900...1000 °С (термометри вихідних газів).

Механічні термометри застосовуються як для вимірювання, так і для регулювання (сигналізації) температури. Залежно від конструкції

чутливого елемента розрізняють дилатометричні і біметалеві термометри. При вимірюванні температури дилатометричними термометрами використовується різниця абсолютного лінійного подовження двох стрижнів, виготовлених із різних матеріалів. Біметалевий термометр складається з двох спаяних між собою та зігнутих металевих пластинок з різними коефіцієнтами лінійного розширення. Унаслідок змінення температури в обох конструкціях утворюється сила пружної деформації, а переміщення, що виникає при цьому, буде пропорційним величині змінення температури. Біметалеві термометри останнім часом знайшли широке застосування завдяки відсутності споживання при вимірюваннях зовнішньої енергії. Клас точності приладів не перевищує 2 %.

4.3. Електричні термометри опору

В електричних термометрах опору використовується властивість провідників і напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміненні температури. Зі збільшенням температури електричний опір металів збільшується, а напівпровідників зменшується. Наприклад, при нагріванні від 0 до 100 °С опір більшості металів збільшується на 40 %. Користуючись однозначною залежністю між опором і температурою, можна вимірювання температури звести до вимірювання опору.

При виборі матеріалу для термочутливого елемента термометрів опору виходять з таких вимог:

- має бути однозначна залежність опору матеріалу від температури;
- вибраний матеріал повинен мати достатню чутливість і відсутність впливу середовища на чутливий елемент;
- матеріал має бути зручним для виготовлення чутливого елемента;
- виготовлений чутливий елемент має бути надійним в експлуатації;
- матеріал повинен мати постійні хімічні та фізичні властивості;
- матеріал повинен мати по можливості великий і постійний температурний коефіцієнт електричного опору;
- доцільно вибирати матеріал з великим питомим опором.

Усім цим вимогам відповідають більшість металів і значна кількість напівпровідників (хлориди, кремній, телур, германій, окис урану, нікелю, марганцю та ін.). Основними матеріалами для виготовлення чутливих елементів термометрів опору є мідь, нікель, залізо, платина, що мають великий температурний коефіцієнт опору. Найточнішим, стабільним і універсальним є термометр опору з чистої платини. Похибка платинового термометра не перевищує $\pm 0,1$ °С. Чутливі елементи з платини застосовуються до температури 1000 °С.

Дуже важливо, щоб метали були чисті, оскільки домішки знижують температурний коефіцієнт опору.

Температурний коефіцієнт опору становить для нікелю 0,006 1/°С, для міді — 0,004 1/°С, а для карбіду силіцію — 0,04 1/°С. Чим більше питомий

опір матеріалу, тим менші розміри матиме чутливий елемент термометра, тому доцільно вибирати матеріали з великим питомим опором.

Опір міді змінюється під дією температури приблизно за лінійним законом, але її можна застосовувати тільки до температури 150 °С, оскільки при більш високих температурах вона окислюється. Найбільшого поширення набули нікелеві чутливі елементи у зв'язку з тим, що нікель має досить великий температурний коефіцієнт опору, питомий опір, важко піддається окисненню.

Для технічних вимірювань температурний коефіцієнт опору (ТКО) за точністю поділяють на класи — А±0,05 %; В±0,1 %; С±0,2 %.

Опір металевого провідника залежно від змінення температури можна визначити за формулою

$$R = R_0[1 + \alpha(t^\circ - t^\circ_0)],$$

де R_0 — опір провідника при початковій температурі; α — температурний коефіцієнт опору провідника, 1/°С.

Вирішивши рівняння щодо $t - t_0$, отримаємо

$$t - t_0 = \frac{R - R_0}{R_0 \alpha}.$$

Вважаючи R_0 і α постійними величинами, можна зробити висновок про те, що змінення температури є пропорційним збільшенню опору провідника. Таким чином, вимірюючи електричний опір провідника, можна вимірювати температуру середовища, що оточує провідник. У термометрах опору вимірювання температури зводять до перетворення сигналу на змінення опору і до вимірювання опору за допомогою мостових схем. При цьому застосовуються компенсаційні методи вимірювання (головним чином у датчиках регуляторів температури) і методи відхилення (бортові візуальні прилади).

Прикладом є термометр опору ТУЕ-48.

Уніфікований електричний термометр опору ТУЕ-48 призначено для дистанційного вимірювання температури масла, води, зовнішнього повітря з робочим діапазоном температур від -70 до +130 °С. Теплочутливий елемент приймача R_d (рис. 4.1) складається з нікелевого дроту ($d = 0,05$ мм), намотаного на пластини зі слюди. Ізоляція нікелевої обмотки із зовнішнього боку виконана з тонких слюдяних прокладок, поверх яких закріплені срібні теплопровідні пластини, що стикаються з корпусом датчика. Корпус датчика виготовлено з нержавіючої сталі. Теплочутливий елемент підключено в схему незрівноваженого моста постійного струму. Як показчик застосовується логометр магнітоелектричної системи з рухомим магнітом М, для з'ясування принципу роботи схеми при вимірюванні температури розглянемо потенціали точок А, В, С, тобто тих

точок, до яких підключені рамки логометра. Котушки I і II підключено в діагоналі моста.

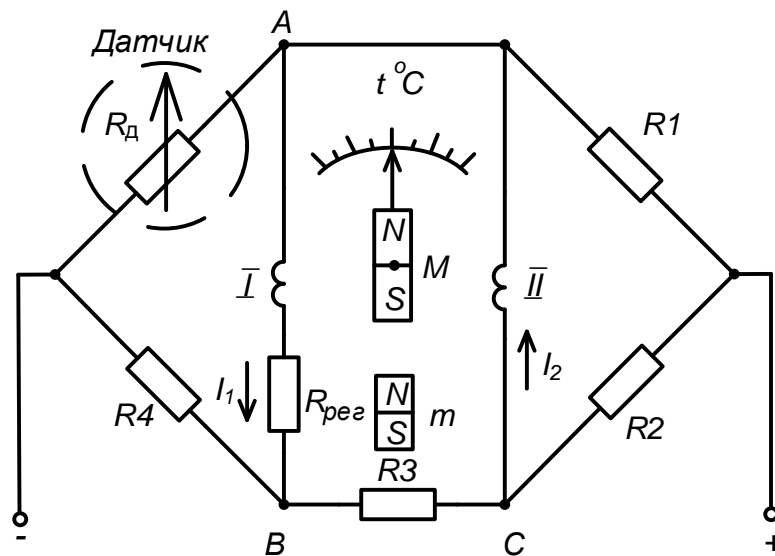


Рис. 4.1. Термометр опоры ТУЕ-48

Схема розрахована так, що при температурі t_1° (середина діапазону вимірювання) потенціал точки А лежить посередині значень потенціалів точок В і С. При зниженні температури до t_2° , коли R_d зменшується, потенціал U_a точки А знизиться. Різниця напруг між точками А і В зменшиться, а між точками А і С — зросте. У результаті відбудеться перерозподіл струмів I_1 і I_2 і логометр вкаже нове значення температури.

Обидві рамки логометра мають однакову кількість витків, але опір рамки I менше, ніж рамки II, тому в ланцюг рамки I для забезпечення симетричності підключено регульовальний опір $R_{пер}$. При однаковій кількості витків опір рамки I менше тому, що конструктивно вона виконана менших розмірів, оскільки є внутрішньою рамкою.

Для компенсації температурної інструментальної похибки в мостову схему підключається ряд опорів, виготовлених з матеріалів з різними температурними коефіцієнтами опорів.

Для повернення стрілки в нульове положення при вимкненому струмі є нерухомий магніт m .

Термістори

У термометрах можуть використовуватись напівпровідникові чутливі елементи – термістори. У напівпровідників залежність опору від температури зворотна, з підвищенням температури опір знижується. Чутливість термометрів опоры з ЧЕ з напівпровідників дуже висока, вище (приблизно в 10 разів), ніж металевих.

Однак температурна залежність електротермоопору напівпровідників зазвичай нелінійна, а стабільність їх характеристик невисока через незворотні змінення внаслідок старіння.

Для термісторів характерними є великий ТКО (у десятки разів вище, ніж у металів), простота пристрою, здатність працювати в будь-яких кліматичних пристроях при значних механічних навантаженнях. Основними параметрами термістора є: номінальний опір, ТКО, інтервал робочих температур, максимально допустима потужність розсіювання.

4.4. Термодинамічні термометри

Термодинамічні термометри основані на принципі вимірювання термоелектрорушійної сили (термоЕРС). Як теплочутливий елемент в них використовується спай двох різнорідних провідників, який називається термопарою. Спай термопари, поміщений у середовище, температуру якого необхідно виміряти, прийнято називати гарячим спаєм. Вільні кінці термопар, що приєднуються до покажчика, умовно називають холодним спаєм. Якщо в електричному ланцюзі нагрівати гарячий спай до температури U , то в ланцюзі з'являється термоелектрорушійна сила. Різниця термоелектрорушійних сил гарячого і холодного спаїв

$$e = \varphi_1(t_1) - \varphi_2(t_2).$$

Термоелектрорушійна сила виникає внаслідок того, що в місцях дотику двох різнорідних металів існує електрична провідність, у результаті якої електрони можуть переходити з одного металу в інший, утворюючи контактну ЕРС. При $t_1 = t_2$ контактні ЕРС гарячого і холодного спаїв рівні і протилежні за знаком. Термоелектрорушійна сила у замкнутому електричному ланцюзі, утвореному гарячим і холодним спаями, виникає тільки при різній температурі спаїв і буде тим більше, чим більше різниця температур. Крім того, наявність термоЕРС, залежить від матеріалів спаїв.

Для багатьох термопар можна скористатись виразом

$$e = K(t_1 - t_2),$$

де K — коефіцієнт пропорційності, що залежить від матеріалів термопар.

Термопари виготовляють як з благородних металів і сплавів, так і з неблагородних. Благородні метали використовуються в термопарах для особливо точних вимірювань, а також для вимірювань високих температур. Для технічних вимірювань використовуються термопари з неблагородних металів і їх сплавів. Виготовлення таких термопар дешевше, а їх термоЕРС більше.

В авіаційних термопарах найбільше застосування набули термопари хромель-копелева, мідь-копелева та ін. Термопари для вимірювання високих температур захищені міцними вогнетривкими і газонепроникними оболонками. Ці оболонки повинні мати велику теплопровідність і здатність витримувати різкі перепади температури.

ТермоЕРС термопар вимірюють або компенсаційним, або безпосереднім методом. Компенсаційний метод широко використовується

в системах автоматичного регулювання температури силових установок літальних апаратів. В авіаційних термометрах застосовується безпосередній метод вимірювання.

Як показчики для термоелектричних термометрів застосовують магнітоелектричні гальванометри.

Термопари можуть бути з'єднані послідовно з метою підвищення чутливості приладу і вимірювання середньої по колу перерізу потоку газів температури двигуна. Розміщують їх симетрично в деякому перерізі реактивного сопла.

Наприклад, у вимірювача температури ТВГ-11т показчик типу ТВГ-1 являє собою вібростійкий магнітоелектричний мілівольтметр. Шкала показчика рівномірна з кутом розмаху 240° . Ціна поділки в діапазоні $400 \dots 900^\circ\text{C}$ дорівнює 10°C .

Термопара Т-1т має термоелектроди з нікель-кобальтового сплаву і спеціалью (марки НК-СА). Термоелектроди зварені разом і утворюють спай, який розміщується в жаромічному кожусі (рис. 4.2), мають довжину 65 мм та діаметр 6,5 мм.

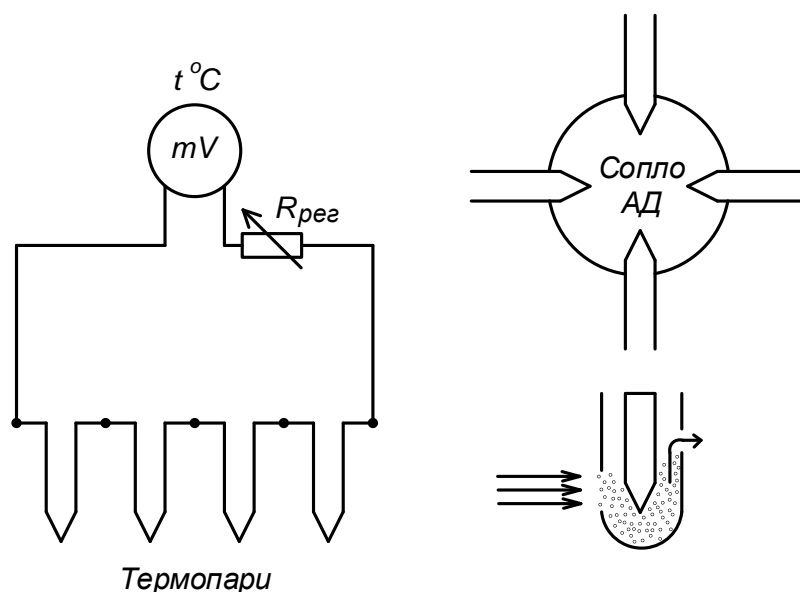


Рис. 4.2. Термоелектричний термометр

Розміщення гарячого спаю в замкнутому кожусі забезпечує спай від прямого динамічного удару газу при високій температурі. Газовий потік потрапляє в простір кожуха, що оточує гарячий спай, через отвір (5x5 мм) і виходить через калібрований отвір діаметром 0,8 мм.

Таким чином, конструкція датчика забезпечує вимірювання температури газу в загальмованому потоці, що і характеризує тепловий режим газотурбінного двигуна.

4.5. Шкали температур

Фізичні властивості матеріалів залежать від температури, тому завжди можна за зміненням одного з фізичних параметрів даного матеріалу залежно від температури визначити шкалу, яка дозволяє порівнювати температури і деяким способом встановлювати рівність двох температур. Однак така шкала виявляється абсолютно довільною, оскільки вона основана на певній властивості даного матеріалу. При калібруванні приладів використовується поняття **потрійна точка води** — суворо певні значення температури і тиску, при яких вода може одночасно і рівноіснують існувати у вигляді трьох фаз — в твердому, рідкому та газоподібному станах. Потрійна точка води — температура 273,16 K (0,01 °C) і тиск 611,657 Па .

Існує кілька різновидів шкал.

1. Термодинамічні або абсолютні.

До них належать:

— шкала Кельвіна. Одиниця виміру — кельвін (K), який визначається з тієї умови, що температура води в потрійній точці дорівнює 273,16 K;

— шкала Ренкіна. Одиниця виміру — градус Ренкіна (°R), який дорівнює 5/9 кельвіна; при такому визначенні температура в потрійній точці води дорівнює 459,670 °R.

2. Похідні шкали.

За допомогою зміщення нуля термодинамічної шкали можна отримати нові шкали температур, які не є абсолютними, але з такою одиницею виміру, як у вихідної абсолютної шкали:

— шкала Цельсія. Вона виходить з абсолютної шкали Кельвіна, якщо за нуль взяти температуру замерзання води; одиниця виміру цієї шкали — градус Цельсія (°C), який дорівнює одному кельвіну: $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,16$.

— шкала Фаренгейта. Ця шкала виходить зміщенням нуля абсолютної температури шкали Ренкіна; одиниця виміру — градус Фаренгейта (°F), який дорівнює одному градусу Ренкіна: $T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459,67$.

4.6. Методи вимірювання тиску

Тиск — макроскопічний фізичний параметр, який дорівнює силі, що діє на одиницю площі. Тиск може бути виміряний шляхом вимірювання сили (напруження), що впливає на пружну стінку, або шляхом вимірювання деформації пружного елемента, що сприймає тиск.

Тиск є параметром процесу і може змінюватися з часом. Він може бути квазістаціонарним або повільно мінливим у часі у разі статичного тиску, або більш-менш змінюється в разі динамічного тиску. Щоб відстежувати ці змінення, використовують деформаційні прилади тиску. У цих приладах переміщення чутливого пружистого елемента

(мембрани, сільфона, одно - або багатовиткової пружини) відбувається під впливом тиску, що вимірюється. Далі воно перетворюється за допомогою передаточного механізму (секторного або важільного) на переміщення покажчика або механізму, пов'язаного із системою передачі показань тиску на відстань. Деякі схеми пружистих елементів наведено на рис. 4.4.

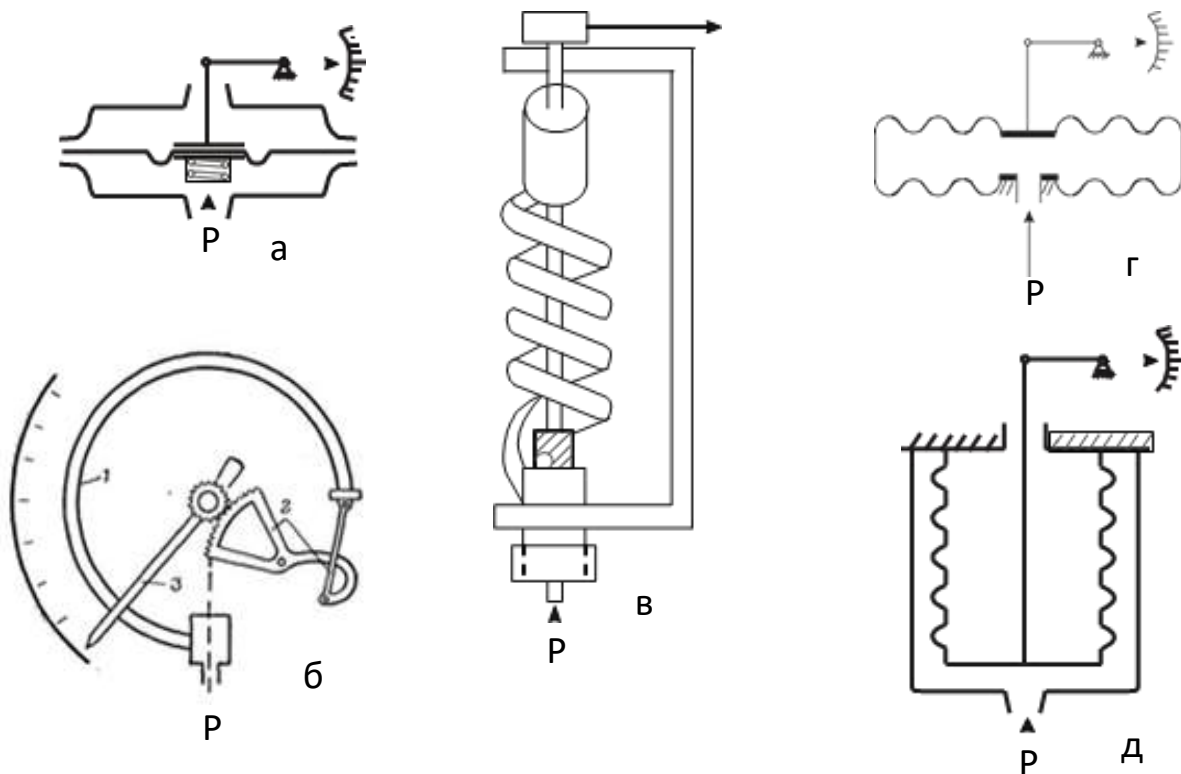


Рис. 4.4. Схеми пружистих елементів деформаційних приладів тиску:
 а – плоска мембрана; б – одновиткова трубчаста пружина;
 в – багатовиткова трубчаста пружина; г – мембранна коробка; д – сільфон;
 P – тиск, що вимірюється

Чутливі елементи (див. рис. 4.4) механічних перетворювачів тиску повинні мати такі властивості:

- а) високу власну частоту, що забезпечує високу швидкодію;
- б) мінімальний зворотний вплив на вимірювану величину, що дозволяє запобігти спотворенню пульсацій на поверхні чутливого елемента.

Іншою важливою характеристикою є допустима для датчика величина тиску, що визначає діапазон вимірювань (0...10 бар, 0...500 бар, ± 500 мбар), тобто діапазон, в якому можливі вимірювання з високою точністю (похибка – 0,1 %, 0,5 %, 1 %...). Ця точність обмежується помилками, пов'язаними з відхиленням від лінійності або гістерезисними явищами. Для перетворення тиску на електричний сигнал застосовуються

потенціометричні, тензорезистивні (провідникові і напівпровідникові), ємнісні, п'єзоелектричні (змінний тиск), індуктивні перетворювачі.

Розрізняють такі манометри: абсолютного, надлишкового тиску і різниці тисків (диференціальні манометри).

Датчик тиску на основі MEMS

Мікромеханічні датчики тиску поділяють на дві групи: п'єзорезистивного та ємнісного типу.

П'єзоелементи – кристали з властивістю вироблення електричного заряду при стисненні.

Сила виникає через різницю тисків, що діють на мембрану площею S .

Сила пружності внаслідок деформації k залежить від матеріалу і геометрії мембрани.

У випадку з п'єзорезисторами, на які діє мембрана, сила обчислюється за виникаючою електричною напругою. Для датчиків ємнісного типу сила обчислюється за зміненням ємності.

На рис. 4.5 зображено датчик тиску ємнісного типу.

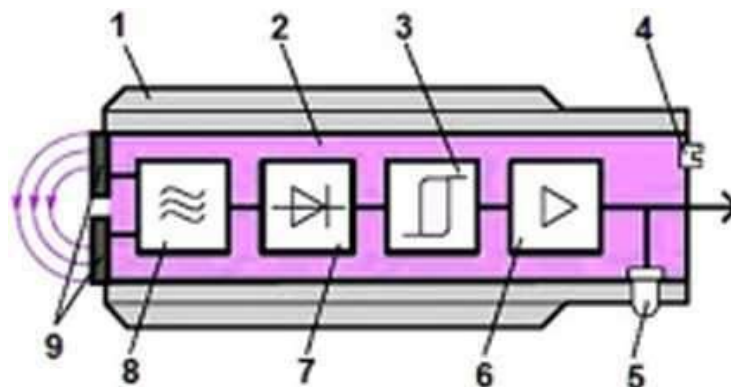


Рис. 4.5. Датчик тиску ємнісного типу

Він виконаний у вигляді повітряного конденсатора: одна його пластина є нерухомою, а друга – пересувається під впливом пружного перетворювача.

Корпус датчика 1 виконано з поліаміду або латуні; 2 – компаунд, що виготовляється зі спеціальної смоли; 3 – тригер створює необхідну крутість сигналу комутації і величину гістерезису; 4 – підстроювальний елемент; 5 – світлодіод, який показує положення вимикача; 6 – підсилювач, що підвищує сигнал виходу до необхідної величини; 7 – демодулятор, який модифікує змінення коливань високої частоти у змінення напруги; 8 – генератор, що створює електричне поле для впливу на об'єкт; 9 – електроди конденсатора.

Таблиця 4.1

Співвідношення одиниць вимірювання тиску в різних системах і системі одиниць СІ

Системи одиниць СІ	Інші системи одиниць
0,1 МПа = 10^5 Па	1 бар або 1 атм (фізична)
$9,81 \cdot 10^4$ Па	1 кгс/см ² або 1 атм (технічна)
9,81 Па	1 кгс/м ² або 1 мм вод. ст.
133,3 Па	1 мм рт. ст.

5. ДАТЧИКИ СИЛИ, ВАГИ, МОМЕНТУ

5.1. Вимірювання сили і напруження

Сила зазвичай вимірюється за деформацією пружного чутливого елемента. Деякі поширені механічні перетворювачі сили і деформації наведено на рис. 5.1. Деформація механічних елементів, що сприймають силу, вимірюється тензорезистивними, п'єзоелектричними, магнітопружними та індуктивними перетворювачами. Датчики для вимірювання сили називають динамометрами.

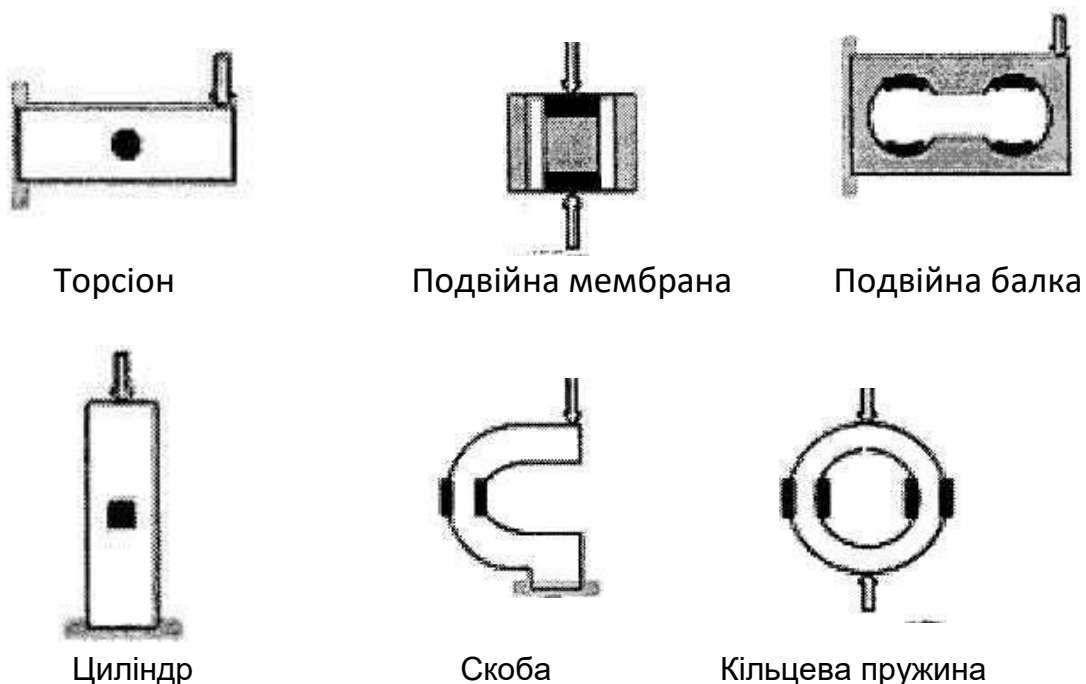


Рис. 5.1. Механічні перетворювачі сили

Тензорезистивні динамометри дуже поширені в різних областях науки і техніки. Для кожного механічного елемента вибирають місця розміщення (наклеювання, приварювання) тензорезисторів, де забезпечена максимальна чутливість і лінійність. Зведена похибка тензорезистивних динамометрів знаходиться в межах 0,03...2 %.

Індуктивні динамометри конструктивно відрізняються від тензорезистивних, оскільки при їх застосуванні для вимірювання лінійних переміщень необхідно співвісне переміщення пружного елемента та інших частин динамометра один відносно одного. Зведена похибка індуктивних динамометрів, що випускаються для технічних вимірювань, становить 0,2...1 %. На відміну від тензорезистивних в індуктивних динамометрах практично відсутня поперечна чутливість.

Магнітопружні динамометри. Принцип дії магнітопружних перетворювачів оснований на магнітопружному ефекті. У феромагнітних речовинах доменна структура розпорядкована, а їх сумарний магнітний момент дорівнює нулю. У магнітному полі відбувається орієнтація доменів у напрямку магнітних ліній. Орієнтація доменів призводить до збільшення магнітної індукції у феромагнетик. Під впливом зовнішньої механічної сили феромагнетик деформується, орієнтація доменів дещо змінюється, змінюється і індукція.

Найпростіший варіант конструкції магнітного датчика сили подано на рис. 5.2. На феромагнітному осердді 1 розміщена котушка індуктивності 2. У разі дії на осердя сили 3 воно деформується і переходить в напружений стан.

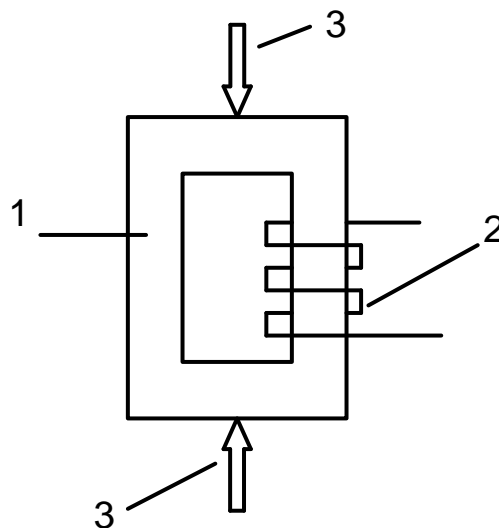


Рис. 5.2. Магнітний датчик сили

Змінення стану осердя призводить до змінення його магнітної проникності. Це обумовлює пропорційне змінення магнітного опору осердя. У результаті змінюється індуктивність котушки. Таким чином, трансформація фізичного впливу деформувальної сили в електричний

сигнал (рис. 5.3, варіант 1) можна відобразити у вигляді послідовних перетворень.

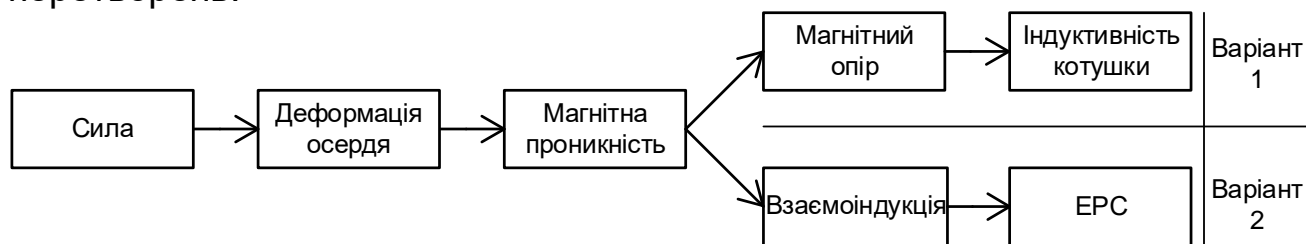


Рис. 5.3. Трансформація сигналів у магнітних датчиках сили

Більш поширеними є магнітні датчики сили з двома обмотками. Первинна обмотка такого датчика живиться від генератора, у вторинній обмотці наводиться ЕРС. При деформації осердя змінюється магнітна проникність і пов'язана з нею взаємоіндуктивність (рис. 5.3, варіант 2). Кінцевим результатом дії сили є змінення ЕРС у вторинній обмотці датчика.

Магнітопружні динамометри зазвичай застосовуються для не дуже точних вимірювань (їх зведена похибка становить кілька відсотків). Їх характеристики нелінійні, їм притаманний гістерезис (більше 1 %), змінення магнітної проникності внаслідок старіння феромагнетика, а також помітний вплив температури.

П'єзоелектричні датчики

Робота п'єзоелектричного датчика основана на фізичному явищі, яке називається п'єзоелектричним ефектом. Цей ефект виявляється в деяких кристалах у вигляді появи на їх гранях електричних зарядів різних знаків при стисненні кристала в певному напрямку. Слово "п'єзо" грецькою означає "давлю". Залежно від значення сили стиснення (або розтягування) змінюється кількість зарядів, а отже, і різниця потенціалів, заміряна між гранями.

П'єзоелектричні датчики належать до генераторного типу. Широко відомі п'єзоелектричні звукознімачі: голка звукознімача сприймає всі змінення глибини звукової доріжки і передає їх на п'єзокристал. Вихідна напруга з п'єзокристала посилюється, і через динамік ми чуємо записані звуки.

Поява зарядів на гранях залежно від стиснення називається прямим п'єзоелектом. Існує і зворотний п'єзоелефект: при подачі напруги на межі кристала змінюються його розміри (він стискається або розширюється). Зворотний п'єзоелемент знайшов застосування в ультразвукових генераторах. А оснований на прямому п'єзоелекті п'єзоелектричні датчики використовуються в автоматичі для вимірювання тисків, вібрацій, прискорень, інших параметрів швидкодіючих процесів.

Найбільш яскраво п'єзоелектричний ефект виражено в кристалах сегнетової солі: при одній і тій же силі з'являється у тисячу разів більша кількість електрики, ніж у кварцу. Однак ці заряди досить швидко

зменшуються через малий питомий опір. Властивості сегнетової солі змінюються залежно від температури і вологості. Тому п'єзоелементи з сегнетової солі застосовуються для вимірювання швидкозмінних сил і тисків при малій вологості і неширокому діапазоні змінення температури навколишнього середовища.

Титанат барію має і велике значення п'єзоелектричного модуля (на два порядки вище, ніж у кварцу), і високу механічну міцність, і незалежність параметрів від змінення вологості. Його недолік – старіння, з часом він втрачає свої властивості (приблизно на 10 % за рік).

П'єзоелектричні датчики застосовуються для вимірювання тиску, сили, прискорення. На рис. 4.4 показано пристрій п'єзоелектричного датчика тиску з двома кварцовими пластинами.

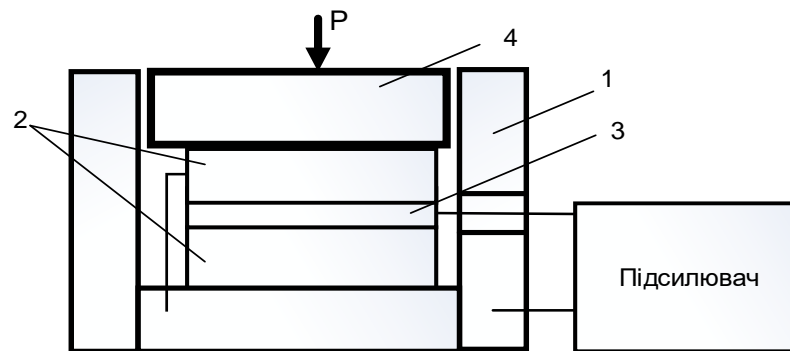


Рис. 5.4. П'єзоелектричний датчик тиску

Конструктивно п'єзоелектричний датчик сили складається з корпусу 1, в якому встановлено дві п'єзопластини 2 з розташованим між ними виводом 3. Другим виводом є корпус датчика. На його основі розташована нижня п'єзопластина. Сила P прикладається до рухомого елемента 4.

5.2. Датчики ваги

Тензодатчик ваги перетворює механічну деформацію чутливого тензорезистора (фольга, плівка, дріт) на електричний сигнал.

Зовнішній вигляд чутливого тензорезистора на фользі зображено на рис. 5.5, одного з найпоширеніших тензодатчиків НХ711 – на рис. 5.6.

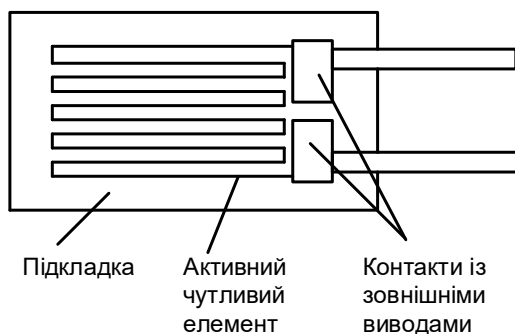


Рис. 5.5. Тензорезистор на фользі

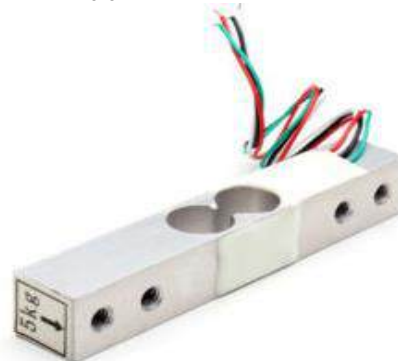


Рис. 5.6. Тензодатчик НХ711

Приклад реалізації ваг на Arduino подано на рис. 5.7, на платі реалізовано 24-бітний АЦП.

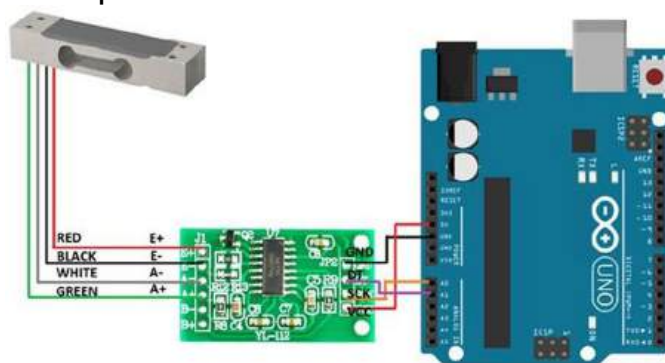


Рис. 5.7. Підключення датчика до АЦП мікроконтролера

5.3. Вимірювання крутного моменту

Вимірювання крутного моменту $M_{кр}$ є необхідним для визначення потужності, переданої валом від приводу до навантаження: $P = M_{кр} \cdot \omega$, де ω – колова частота (швидкість обертання вала), рад/с, при дослідженні, а в деяких випадках і при експлуатації механізмів.

Вимірювання крутного моменту на валу ґрунтується на тому, що при передачі моменту вал скручується. Фактично вимірювання крутного моменту зводиться до вимірювання кута закручування вала (рис. 5.8).

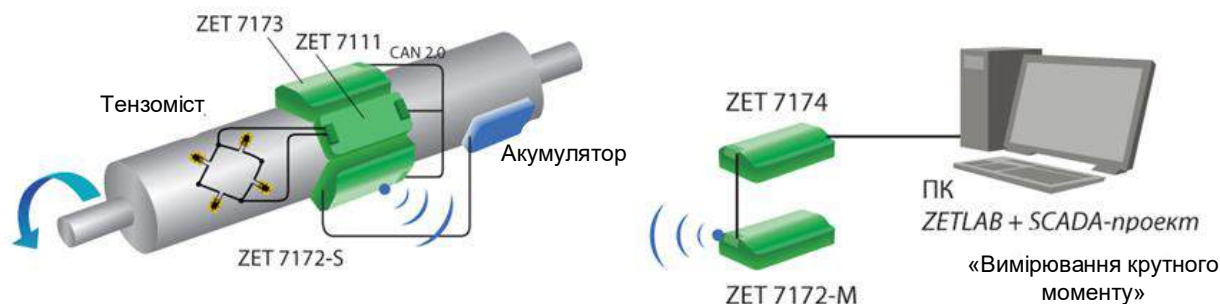


Рис. 5.8. Вимірювання кута закручування вала

Вимірювання малих деформацій може бути реалізовано за допомогою тензометричних датчиків, наклеєних на вал.

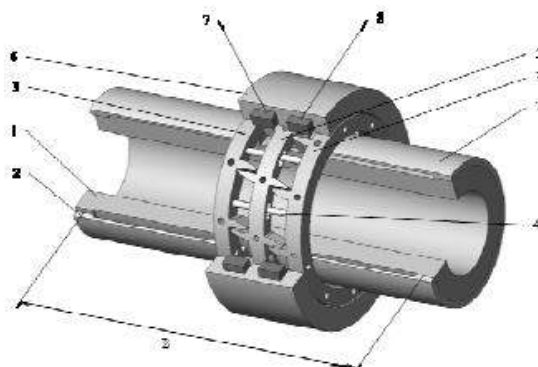


Рис. 5.9. Індуктивний датчик крутного моменту

На рис. 5.9 показано датчик крутного моменту, в якому зв'язок з елементами конструкції датчика, розміщеними на обертовому валу, здійснюється через магнітне поле. На валу 1 на відстані B (база вимірювання) закріплено гільзи 2, на яких розміщені елементи магнітного ланцюга датчика — два статорних кільця 3, жорстко зв'язаних за допомогою шпильок 4, і роторне кільце 5.

Оскільки гільзи не передають крутного моменту, вони не скручуються і кут взаємного повороту внутрішніх торців гільз дорівнює куту закручування вала на довжині B . При передачі крутного моменту роторне кільце 5 переміщується відносно статорних кілець 3.

На статорних і роторному кільцях, виконаних з феромагнітного матеріалу, є зубці, розташовані в осьовому напрямку. При повороті роторного кільця повітряні зазори між зубцями статорного і роторного кілець змінюються, що призводить до диференціального змінення магнітного опору між роторним кільцем і кожним зі статорних кілець.

6. ДАТЧИКИ ПРИСКОРЕННЯ ТА ВІБРАЦІЙ

Згідно з фундаментальними законами механіки прискорення входить у залежність між силою і масою: $F = ma$. Тому в датчиках прискорення використовуються фізичні явища, що дозволяють отримане значення сили на основі співвідношення $a = F/m$, перетворювати в електричний сигнал, пропорційний прискоренню.

Датчики прискорення залежно від використововуваного фізичного явища можуть бути основані:

- на безпосередньому вимірюванні сили (п'єзоелектричні датчики, датчики із зрівноважуванням моменту або сили);
- вимірюванні сили непрямым шляхом за переміщенням або деформацією чутливого елемента.

Вимірювання прискорення рухомих об'єктів-літаків, ракет, наземних або морських транспортних засобів виконується:

- слідкувальними акселерометрами;
- датчиками переміщення (індуктивні, ємнісні, потенціометричні, оптичні);
- акселерометрами з тензометричними датчиками, що вимірюють напруження;
- акселерометрами зі змінною індуктивністю, з металевими тензометричними або п'єзорезистивними датчиками.

6.1. Вимірювання лінійних прискорень

Прискорення є абсолютною величиною, яка не залежить від вибору системи координат. Для вимірювання лінійних прискорень застосовуються

датчики лінійних прискорень (акселерометри). Усі акселерометри містять інерційну масу, що реагує на дію прискорення.

За кількістю вимірюваних складових вектора лінійного прискорення датчики можуть бути одно-, дво- і тривісні, що вимірюють, відповідно, одну, дві або три компоненти вектора.

За конструкцією одновісні датчики лінійних прискорень можуть бути осьовими і маятниковими.

За способом організації зусилля протидії силі інерції, яка діє на інерційну масу, акселерометри поділяють на прості (пружинні) і компенсаційні.

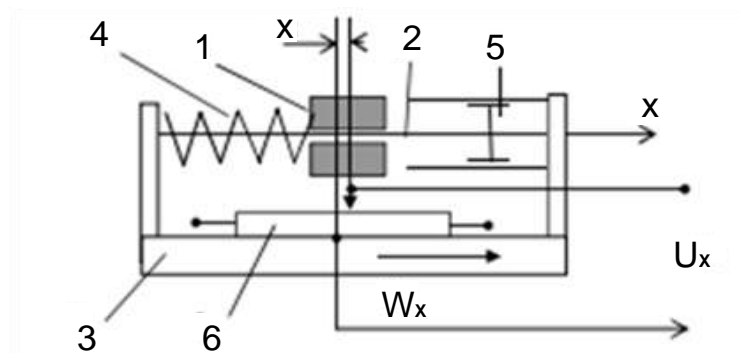


Рис.6.1. Схема простого осьового акселерометра

Простий осьовий акселерометр, показаний на рис. 6.1, містить інерційну масу (1), яка може переміщуватися по напрямній (2) тільки уздовж однієї осі. Інерційна маса пов'язана з основою приладу (3) через пружину (4) і демпфер (5). Для вимірювання переміщення інерційної маси використовується датчик (потенціометричний) лінійних переміщень (6).

Складемо рівняння руху інерційної маси акселерометра.

Припустимо, що основа датчика, жорстко зв'язана з корпусом об'єкта, рухається у напрямку осі x з прискоренням W_x . Відповідно до закону Ньютона

$$m(W_x + \frac{d^2x}{dt^2}) = \sum F_i = -cx - k_d \frac{dx}{dt} + F_{зб}.$$

Тут

$$W_x + \frac{d^2x}{dt^2}$$

– абсолютне прискорення інерційної маси, що складається з абсолютного прискорення основи W_x і відносного прискорення вантажу $\frac{d^2x}{dt^2}$; cX – сила протидії пружини; $-k_d \frac{dx}{dt}$ – сила опору демпфера; $F_{зб}$ – інші діючі сили (сили збудження).

Вираз (74) можна подати у вигляді

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + k_d \frac{dx}{dt} + cx = -mW_x + F_{зб}. \quad (6.1)$$

Отримано рівняння руху інерційної маси при дії прискорення основи. На основі цього рівняння можна скласти передавальну функцію.

З рівняння (6.1) випливає, що при прискоренні основи в позитивному напрямку ($W_x > 0$) вантаж зміщується в негативному напрямку.

Стале значення переміщення вантажу

$$x_{ст} = -\frac{m}{c} W_x. \quad (6.2)$$

Необхідну власну частоту коливань $\sigma_0 = 1/T$ і декремент загасання ξ при конструюванні датчика можна забезпечити вибором параметрів m , c і k_d .

Демпфер, що забезпечує загасання коливань інерційної маси, може бути пневматичний, гідравлічний або магнітоелектричний.

Останнім часом значно розширилися сфери застосування мехатронних мікродатчиків.

Це визначається, по-перше, тією обставиною, що при створенні мехатронних мікродатчиків можуть бути реалізовані такі нові принципи перетворення неелектричних параметрів на електричні вимірювальні сигнали, які не можуть бути здійснені в подібних пристроях, що діють на макрорівні. По-друге, в мехатронних мікродатчиках можуть бути застосовані нові дорогі матеріали, використати які у відповідних пристроях, реалізованих на макрорівні, з економічних причин не є можливим. По-третє, динамічні характеристики мехатронних мікродатчиків унаслідок мінімальних розмірів їх чутливих елементів значно вищі за характеристики відповідних датчиків інших типів. По-четверте, мехатронні мікродатчики значно менше споживають енергії.

Важливим напрямом робіт в області МЕМС є створення інерційних мікродатчиків. Розроблено декілька варіантів мікроакселерометрів, які мають високу точність.

Однією з важливих областей використання акселерометрів — є інерціальна навігація. В основі інерціальної навігації лежить дуже проста ідея — інтегралом від прискорення є швидкість руху основи, на якій встановлено акселерометр, а подвійним інтегралом від прискорення — переміщення основи в інерціальному просторі. За допомогою інерціальної навігації стає можливим визначати положення рухомого об'єкта (літального апарата, корабля і т. п.) автономно — без використання радіохвиль, орієнтирів, метеопоправки на вітер і т. д.

6.2. Вимірювання вібрацій

Одними з найважливіших є параметри механічного руху, зокрема параметри періодичних переміщень досліджуваного об'єкта в просторі (вібрації). Цими параметрами є вібропереміщення (амплітуда вібрації) і віброшвидкість (частота вібрації).

Датчик лінійних прискорень може бути використаний для вимірювання параметрів вібрації. Для цього датчик встановлюють в тій точці об'єкта, в якій потрібно виконати вимір і зафіксувати прискорення, спричинені вібрацією.

За результатами вимірювання визначається спектр вібрацій — частоти і амплітуди прискорень на кожній частоті. За необхідності за цими результатами можна визначити швидкості й переміщення при вібрації на кожній частоті.

Специфічною областю застосування датчиків лінійних прискорень є сейсмометрія — вимірювання коливань земної поверхні для реєстрації землетрусів як природного, так і штучного (при випробуваннях ядерної зброї) походження.

Методи вимірювання вібрації

Існує дві групи методів вимірювання параметрів вібрації: контактні, які мають механічний зв'язок датчика з досліджуваним об'єктом, і безконтактні.

Контактні методи

1. З використанням п'єзоелектричних датчиків. Вони дозволяють проводити вимірювання з високою точністю в діапазоні низьких частот і відносно великих амплітуд вібрації.
2. Метод відкритого резонатора. Суть методу полягає у вимірюванні параметрів НВЧ-резонатора надвисокої частоти (НВЧ), що змінюються внаслідок вібрації досліджуваного об'єкта. Резонатор має два дзеркала, причому одне з них фіксовано, а інше механічно зв'язане з досліджуваним об'єктом.

Безконтактні методи оснований на зондуванні об'єкта звуковими і електромагнітними хвилями.

1. Метод ультразвукової фазометрії. Він полягає у вимірюванні поточного значення різниці фаз опорного сигналу ультразвукової частоти і сигналу, відбитого від досліджуваного об'єкта. Як чутливий елемент використовується п'єзоелектрична кераміка.

2. Зондування об'єкта видимим світлом:

- реєстрація ефекту Доплера — гомодинний метод, який дозволяє вимірювати амплітуди і фази гармонійних вібрацій;
- голографічні методи.

3. Використання НВЧ-випромінювання: методи поділяються на інтерференційні та резонаторні.

В основі інтерференційних методів лежить зондування досліджуваного об'єкта хвилями ВЧ- і НВЧ-діапазонів, прийом і аналіз відбитих (розсіяних) об'єктом хвиль. Між випромінювачем і досліджуваним об'єктом у результаті інтерференції утворюється стояча хвиля. Вібрація об'єкта призводить до амплітудної і фазової модуляції відбитої хвилі і до утворення сигналу биття. У виділеного сигналу змінного струму амплітуда пропорційна вібропереміщенню, а частота відповідає частоті вібрації об'єкта.

Резонаторні методи основані на розміщенні віброуючого об'єкта в полі НВЧ-резонатора (поза або хоча б частково всередині його), внаслідок чого змінюються характеристики резонатора. Безконтактне вимірювання параметрів вібрації резонаторним методом є можливим і при підключенні приймально-передавальної антени в частотнозадавальному ланцюгу НВЧ-генератора, тобто при роботі в автогенераторному режимі. Такі системи називаються автодинними генераторами або просто автодинами.

7. ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Інформація про швидкість польоту необхідна для успішного вирішення завдань пілотування і навігації. Для ЛА існує мінімальна безпечна швидкість польоту, при якій крило літака розвиває достатню піднімальну силу і забезпечує стійкий політ. Зменшення швидкості нижче безпечної межі призводить до втрати піднімальної сили і звалювання літака в штопор, тобто до аварійної ситуації.

Вимірювання швидкості необхідно і для навігації – визначення положення літака в просторі і вибору раціональної траєкторії польоту.

Найпростіший метод вимірювання швидкості польоту застосовувався ще на перших ЛА і полягає він у вимірюванні швидкісного напору від набігаючого на ЛА повітряного потоку.

Відповідно до законів аеродинаміки (закон Бернуллі), якщо штучно загальмувати набігаючий повітряний потік, це призведе до підвищення тиску внаслідок швидкісного напору.

7.1. Системи живлення аерометричних приладів

Системи живлення аерометричних приладів призначені для сприйняття повного і статичного тисків у набігаючому повітряному потоці і передачі їх по трубопроводах в чутливі елементи аерометричних приладів, датчиків систем повітряних сигналів, систем реєстрації параметрів польоту, систем керування літальним апаратом (ЛА).

Системи живлення аерометричних приладів складаються з приймачів повітряних тисків, трубопроводів, кранів перемикачів, вологовідстійників

та інших елементів.

Приймачі повітряних тисків забезпечують сприйняття повного p_{Π} і статичного $p_{ст}$ тисків, необхідних для роботи аерометричних та інших пристроїв. Повний тиск є сумою статичного і динамічного тисків:

$$p_{\Pi} = p_{ст} + p_{д},$$

де $p_{д} = \rho \cdot \frac{V^2}{2}$ — динамічний тиск (швидкісний напір повітря);

ρ — щільність повітря;

V — повітряна швидкість польоту ЛА.

Приймачі повітряних тисків поділяють на приймачі, що сприймають повний і статичний тиски (рис. 7.1), повний тиск (рис. 7.2) або статичний тиск.

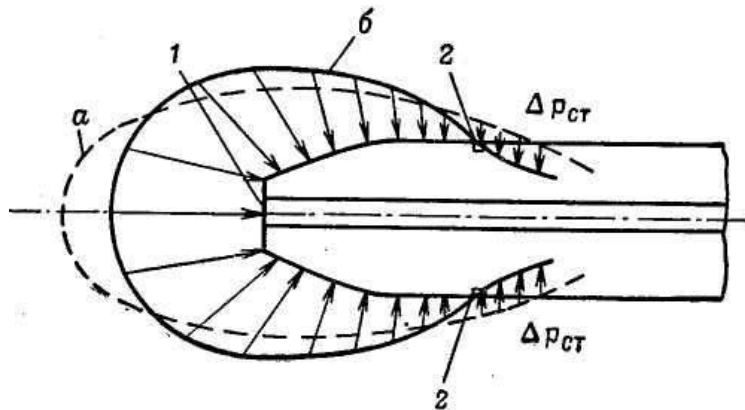


Рис. 7.1. Приймач повітряних тисків:

а, б — епюри тисків; 1 — отвір повного тиску; 2 — отвори статичного тиску

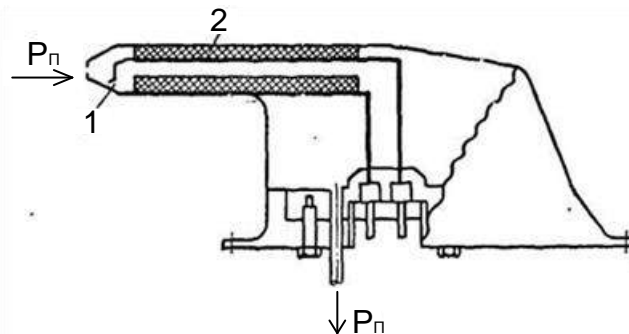


Рис. 7.2. Приймач повного тиску: 1 — козирок; 2 — обігрівальний елемент

Напруга постійного струму подається на обігрівальний елемент через штепсельний рознім.

На літальних апаратах, де встановлені приймачі повного тиску, для сприйняття статичного тиску застосовуються приймачі статичного тиску (ПСТ). Приймачем ПСТ є герметична камера, яка кріпиться на внутрішній обшивці фюзеляжу. Камера сполучається з атмосферою через отвір у фюзеляжі.

7.2. Прилади для вимірювання повітряної швидкості

Прилади, призначені для вимірювання швидкості польоту літального апарата, називаються показчиками швидкості.

Розрізняють швидкості польоту ЛА відносно землі і повітря. Швидкість ЛА відносно землі називається шляховою швидкістю. Швидкість руху ЛА відносно повітря називається істинною повітряною швидкістю. Істинна повітряна швидкість, зведена до нормальної щільності повітря ($\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$), називається індикаторною (приладною) швидкістю. Якщо політ відбувається при нормальній щільності повітря ρ_0 , то індикаторна швидкість $V_{\text{інд}}$ дорівнює істинній повітряній швидкості $V_{\text{іст}}$. Знання $V_{\text{іст}}$ необхідне для літаководіння, а інформація про $V_{\text{інд}}$ потрібна льотчику для пілотування ЛА. Існує кілька методів вимірювання швидкості польоту ЛА: інерційні, доплерівський, аерометричні та ін.

У цьому підрозділі розглядається аерометричний метод вимірювання повітряної швидкості, оснований на вимірюванні швидкісного напору (динамічного тиску) p_d , який створюється зустрічним потоком повітря: 7.1

$$p_d = p_n - p_{ст};$$

$$p_d = \frac{\rho_0 V_{\text{інд}}^2}{2}. \quad (7.1)$$

При швидкостях польоту до 400 км/год градувальні формули показників індикаторної та істинної повітряної швидкостей мають вигляд

$$V_{\text{інд}} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho_0}}; \quad (7.2)$$

$$V_{\text{іст}} = V_{\text{інд}} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_H}} = V_{\text{інд}} \sqrt{\frac{p_0 T_H}{p_{ст} T_0}}. \quad (7.3)$$

$$\text{де } \rho_0 = \frac{p_0}{K \cdot g \cdot R \cdot T_0}; \quad \rho_H = \frac{p_{ст}}{K \cdot g \cdot R \cdot T_H};$$

ρ_0, T_0, p_0 — щільність, температура і статичний тиск біля землі;

$\rho_H, T_H, p_{ст}$ — щільність, температура і статичний тиск повітря на висоті;

R — газова стала, яка дорівнює 29,27 м/К;

K — показник адіабати, який дорівнює 1,41.

Щільність повітря зменшується зі збільшенням висоти польоту, тому індикаторна швидкість на висоті буде менше істинної повітряної швидкості. Наприклад, на висоті 14 км $V_{\text{іст}}$ більше $V_{\text{інд}}$ приблизно у два рази.

З формул видно, що індикаторна швидкість є функцією швидкісного напору (динамічного тиску). Швидкісний напір характеризує величину піднімальної сили, керованість і стійкість ЛА. Принципову схему показчика $V_{\text{інд}}$ зображено на рис. 7.3, кінематичну — на рис.7.4

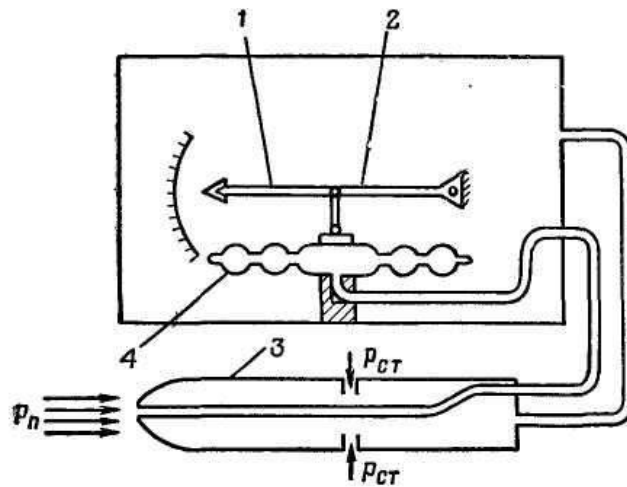


Рис. 7.3. Принципова схема показчика повітряної швидкості:
 1 — стрілка; 2 — передавальний механізм; 3 — приймач повітряних тисків;
 4 — манометрична коробка

. У герметичний корпус приладу подається статичний тиск повітря $p_{\text{ст}}$, а в манометричну коробку — повний тиск p_n . При зміні динамічного тиску $p_d = p_n - p_{\text{ст}}$ коробка деформується і через передавальний механізм переміщує стрілку, яка показує індикаторну швидкість польоту за шкалою.

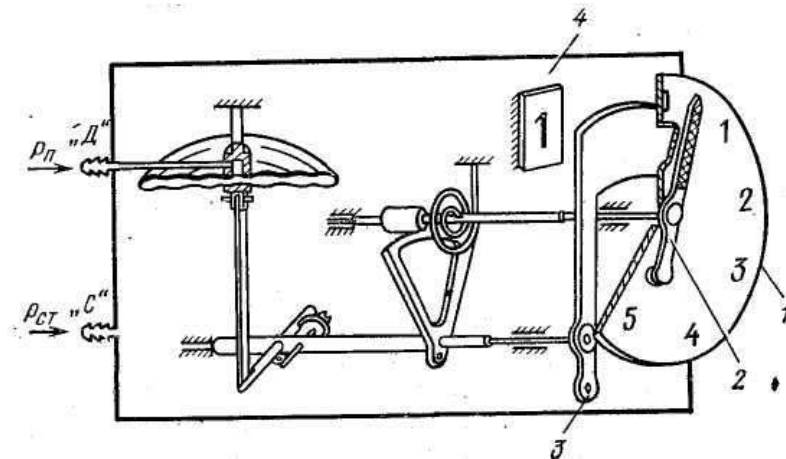


Рис. 7.4. Кінематична схема показчика приладної швидкості:
 1 — шкала; 2 — стрілка; 3 — шторка; 4 — лічильник

Для отримання істинної повітряної швидкості у показання показчика $V_{\text{інд}}$ вводяться поправки на змінення статичного тиску і температури зовнішнього повітря. Ці поправки вводяться анероїдною коробкою.

7.3. Варіометри

Варіометр — прилад, що вимірює вертикальну швидкість польоту літака. Варіометри застосовуються як пілотажні прилади, а також в САК.

Існує кілька методів вимірювання вертикальної швидкості польоту V_y літака:

1. *Диференціювання сигналу датчика висоти.* Вихідний сигнал датчика висоти подають на вхід RC-ланцюга, з виходу RC-ланцюга знімають сигнал, пропорційний першій похідній вимірюваної висоти за часом.

2. *Інтегрування вертикального прискорення.* На ЛА вихідний сигнал акселерометра лінійних прискорень, вісь чутливості якого орієнтують по вертикалі місця, подають на інтегрувальний пристрій і отримують вертикальну швидкість V_y .

3. *Манометричний метод* оснований на диференціюванні статичного тиску $p_{ст}$. Основні конструктивні параметри варіометра (рис. 7.5) визначаються градуювальною формулою $\Delta p = f(V_y)$:

$$\Delta p = \frac{128 \cdot V_{вар} \cdot l \cdot \mu \cdot T_k}{\pi \cdot d^4 \cdot R \cdot T_1 \cdot T}$$

де $V_{вар}$ — об'єм корпусу 1; l , d — відповідно довжина і діаметр капіляра, м; μ — динамічна в'язкість повітря, Па·с; T_k — середня температура повітря всередині капіляра 2, К; T_1 і T — температура повітря в корпусі і поза літаком, К.

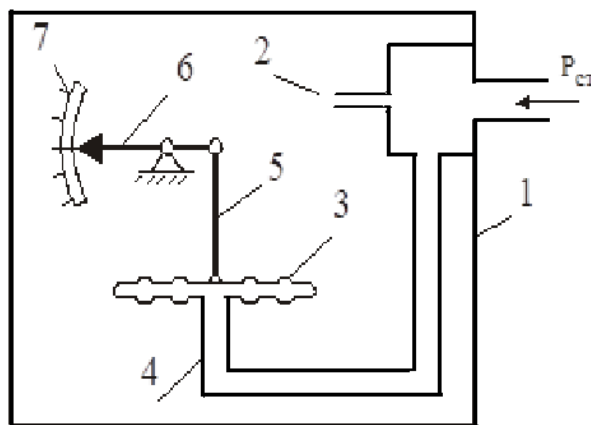


Рис. 7.5. Варіометр

Важіль 5 відхиляє стрілку 6 пропорційно різниці тисків: $p_1 - p_{ст}$. Повітря з системи статичного тиску потрапляє в манометричну коробку 3

по трубопроводу 4, а також в герметичний корпус 1 через капіляр 2. Динамічні характеристики приладу визначаються сталою часу. На малих висотах середній тиск в капілярі близьким до тиску на рівні землі, зі збільшенням висоти стала часу змінюється обернено пропорційно щільності повітря.

8. ДАТЧИКИ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ І КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

8.1. Тахометричні датчики

У промисловості вимірювання швидкості зводиться до вимірювання швидкостей обертання крутих деталей і вузлів, коли за ними доводиться спостерігати з метою безпеки або для створення умов їх роботи в необхідному режимі. У разі прямолінійного руху вимірювання швидкості часто також може бути зведено до вимірювання швидкості обертання. Тому *тахометричні датчики* є у своїй більшості датчиками кутової швидкості.

Електродинамічні тахометри

Промислові датчики такого типу базуються на законі Фарадея

$$e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Bvl = Br\omega,$$

де B – магнітна індукція; l – довжина провідника, який переміщується у магнітному полі; r – радіус обертання; v – лінійна або ω – кутова швидкості.

Імпульсні тахометри

При періодичному русі досліджуваного тіла, наприклад обертанні, визначення його швидкості може бути замінено вимірюванням частоти. Так, для вимірювання кутової швидкості обертового вала можна використовувати насаджений на нього диск, забезпечений попереминими прозорими і непрозорими частинами, які при обертанні будуть переривати потік променів, що реєструється за допомогою оптичного детектора (оптопари — джерела світла і фотодіода). Таким чином буде формуватися послідовність електричних імпульсів з частотою, пропорційною швидкості.

Гірометри

Гірометри — це прилади, що установлюються на рухомих об'єктах для визначення їх кутової швидкості. Залежно від використовуваного фізичного явища розрізняють:

- а) механічні гірометри, основані на властивостях гіроскопа;
- б) оптичні гірометри на лазерах або волоконній оптиці.

У разі дуже повільного обертання, наприклад менше одного градуса на годину, вимірювання швидкості здійснюється лазерним гірометром. Принцип його дії оснований на існуванні різниці ходу двох його хвиль, які

випромінюються одним лазером і поширюються у протилежних напрямках в одному і тому ж обертовому середовищі. Ця різниця ходу, пропорційна кутовій швидкості, виявляється за допомогою інтерферометра.

Похідна за часом сигналу аналогового датчика положення визначає величину швидкості. Однак цей метод пов'язаний з появою перешкод (наприклад, через дискретність дротяного потенціометра) і збільшенням високочастотного шуму.

Інтегрування сигналу датчика прискорення відбувається іншим методом визначення швидкості, який використовується в навігації, він потребує складного обладнання (інерціальна платформа).

8.1.1. Електромагнітні тахометри кутової швидкості

Тахогенератор постійного струму

У загальному випадку індукована ЕРС

$$E = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} \Phi_0 \omega,$$

де p — кількість пар полюсів, N — кількість витків в обмотці, a — кількість паралельних гілок в обмотці.

Саме на цій пропорційності ЕРС і кутовій швидкості ґрунтується використання генераторів постійного струму в тахометрії, і одне з їх переваг порівняно з іншими тахометричними датчиками полягає в тому, що одержуваний сигнал змінює знак одночасно зі зміненням напрямку обертання.

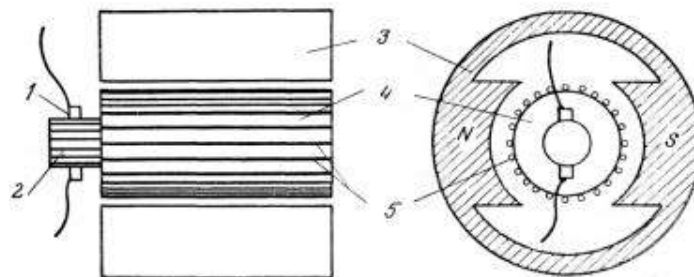


Рис. 8.1. Тахогенератор постійного струму

Елементами пристрою генератора (рис. 8.1) є: 3 — статор (індуктор), що являє собою феромагнітний каркас, який несе 2 полюси, що спрямовують поле магнітної індукції, утворене струмом через котушки (електромагніти) або постійними магнітами; 4 — ротор (якір), який являє собою багатощаровий циліндр з листового заліза, що обертається між полюсами статора; 2 — колектор — циліндр з тією ж віссю, що й у ротора, але значно меншого діаметра, що несе ізольовані між собою мідні пластинки, кожна з яких зв'язана з активним провідником; 1 — дві щітки,

зв'язані з клемми генератора і притискаються до колектора, які закріплюються на дводіаметрально протилежних пластинках; щітки розташовані уздовж середньої лінії перпендикулярно до напрямку індукції так, щоб знімати максимальну ЕРС.

Тахогенератор змінного струму

Такий тип генераторів є цікавим через відсутність колектора і щіток, що сприяє помітному збільшенню терміну служби. Однак схеми підключення таких генераторів (рис. 8.2) зазвичай більш складні, оскільки вимірювання амплітуди потребує випрямлення і фільтрації вихідної напруги.

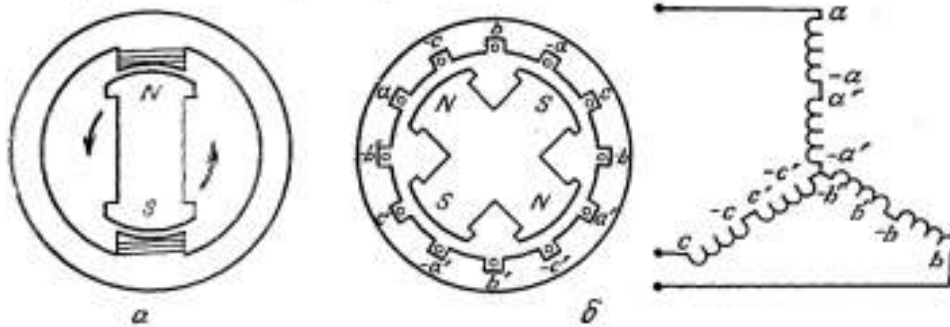


Рис. 8.2. Синхронний тахогенератор змінного струму

У такому генераторі статор несе якірну обмотку (одно- або багатофазну), в якій виникає синусоїдальна ЕРС; її амплітуда і частота пропорційні швидкості обертання ротора

$$E = c_M \omega \sin k_M \omega t.$$

Таким чином, величина кутової швидкості може бути визначена за амплітудою ЕРС або за її частотою. Тут c_M , k_M – конструктивні коефіцієнти генератора.

Напруга у загальному випадку не є лінійною функцією ω , вона випрямляється і фільтрується для отримання постійної пропорційної напруги; вона не залежить від напрямку обертання.

Електромагнітні тахометри лінійної швидкості

У разі малих переміщень датчик швидкості виготовляється з магніту і котушки (рис. 8.3), оскільки один з цих елементів фіксований, а інший — зв'язаний з рухомою деталлю, їх відносне переміщення наводить у котушці ЕРС, пропорційну швидкості.

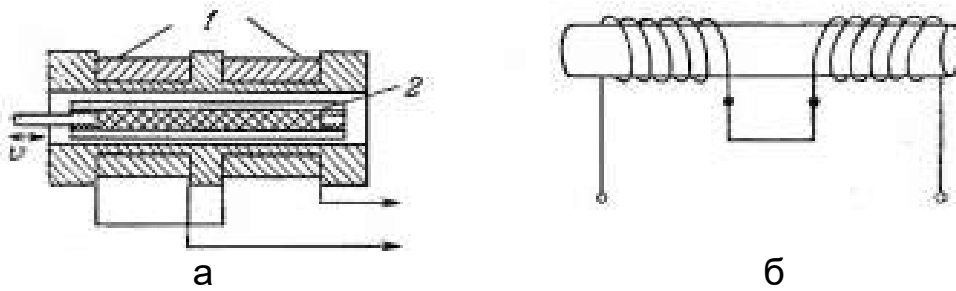


Рис. 8.3. Електромагнітний тахометр лінійної швидкості

Використовують магніт, укріплений на рухомій деталі, який переміщується уздовж осі тандему з двох котушок. ЕРС, наведена в котушці переміщенням магніту, пропорційна його швидкості; ЕРС котушок має протилежний знак, оскільки в них переміщуються протилежні полюси, тому обидві котушки з'єднані послідовно і зустрічно за знаком, отже, у цьому випадку виходить ненульова сумарна ЕРС.

Датчики зі змінним магнітним опором
Конструкцію датчика подано на рис. 8.4.

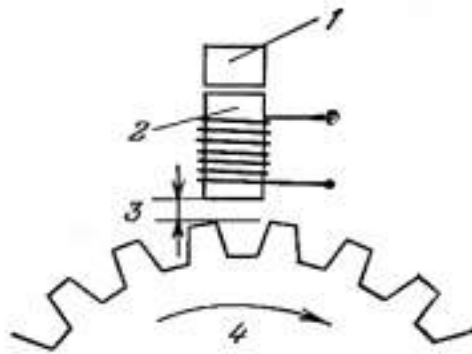


Рис. 8.4. Датчик зі змінним магнітним опором:
1 – постійний магніт; 2 – полюс; 3 – зазор; 4 – шестірня

Вимірювальна котушка забезпечується магнітним осердям, на який впливає потік індукції постійного магніту; котушка поміщена перед диском (полюсне колесо) або перед обертовим феромагнітним тілом.

Послідовність стрибків магнітних властивостей (зубці, щілини, отвори) диска або обертового тіла спричиняють періодичне змінення магнітного опору в магнітному ланцюзі котушки, яке наводить в ній ЕРС з частотою, пропорційною швидкості обертання. Амплітуда цієї ЕРС залежить:

а) від відстані між котушкою і обертовим тілом; вона швидко зменшується зі збільшенням цієї відстані (яка зазвичай не може перевищувати декількох міліметрів);

б) від швидкості обертання (в принципі амплітуда ЕРС пропорційна цій швидкості); при малих швидкостях амплітуда може бути недостатньою для виявлення, внаслідок чого з'являється зона нечутливості, в якій

неможливі ніякі вимірювання. Ця зона тим протяжніше, чим більше відстань між котушкою і обертовим тілом. Збільшення втрат з підвищенням швидкості призводить до обмеження амплітуди.

Мінімальна вимірювана швидкість тим менша, чим більша кількість пар полюсів. Типові діапазони вимірювання становлять від 50 до 500 об/хв для колеса з 60 зубцями і від 500 до 10000 об/хв для колеса з 15 зубцями.

Датчик такого типу дозволяє визначити швидкість диска, що обертається всередині кожуха, за умови, що стінка кожуха немагнітна і відстань між котушкою і диском залишається невеликою.

8.1.2. Оптичні тахометри

Оптичний тахометр складається з джерела світла і оптичного приймача — фотодіода або фототранзистора (рис. 8.5). На обертовому тілі розміщують відбивні мітки, розташовані рівномірно по колу, на які направляється світловий пучок, або з'єднують обертове тіло з диском, що має поперемінно прозорі й непрозорі сектори, який розташовують між джерелом і приймачем світла. Фотоприймач видає електричний сигнал з частотою, пропорційною швидкості обертання, і з амплітудою, що не залежить від цієї швидкості.

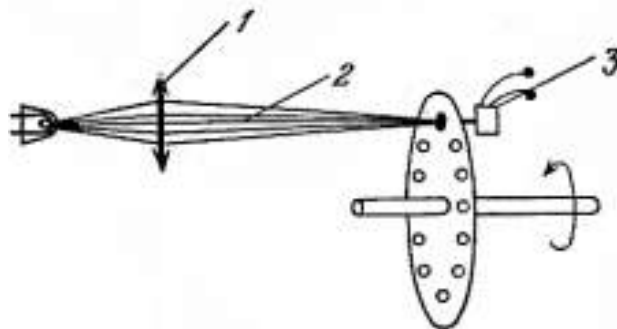


Рис. 8.5. Оптичний тахометр:
1 — лінза; 2 — світловий пучок; 3 — оптичний приймач

Діапазон вимірюваних швидкостей залежить, з одного боку, від оптичних властивостей диска (щілини, прозорі сектори, нанесені на диск або обертове тіло), а з іншого — від смуги пропускання приймача і пов'язаних з ним електричних схем.

Для вимірювання малих швидкостей, наприклад 0,1 об/хв, використовуються диски з великою кількістю щілин (від 500 до декількох тисяч); при вимірюванні великих швидкостей, наприклад 105...106 об/хв, диск має тільки одну щілину, і максимальна вимірювана швидкість визначається верхньою граничною частотою електричного кола.

8.2. Гіроскопічні датчики кутової швидкості

Двоступеневий гіроскоп (рис. 8.6) складається з ротора P та внутрішньої рами BP . Зовнішня рама у такому гіроскопі відсутня. Вісь обертання ротора Z встановлена на підшипниках у внутрішній рамі, цапфи BP за допомогою підшипників укріплені на підставі. Вісь обертання рами (вісь цапф) позначається літерою X . Вісь Y направлена перпендикулярно до осей X і Z .

Головна властивість двоступеневого гіроскопа полягає в тому, що його головна вісь прагне суміститися по найкоротшому шляху з вектором кутової швидкості обертання основи, на якому він встановлений. Ця властивість обумовлена дією гіроскопічного моменту.

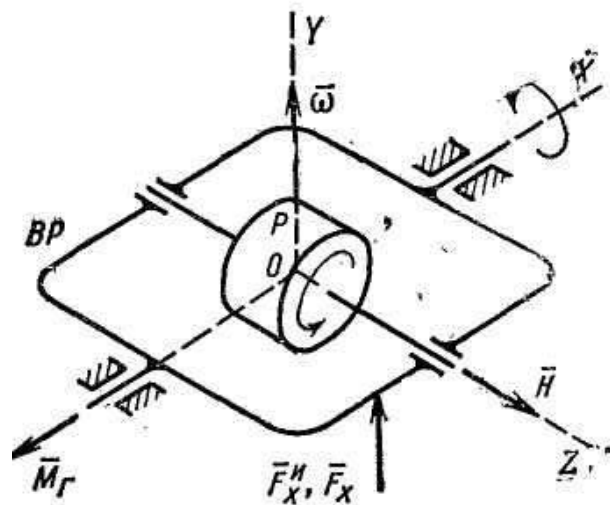


Рис. 8.6. Двоступеневий гіроскоп

У приладах, що розглядаються нижче, використовується принцип зрівноваження гіроскопічного моменту, що виникає внаслідок обертання основи навколо вхідної осі приладу, моментом протидії пружини, що залежить від кута повороту гіроскопа навколо вихідної осі.

Датчик кутової швидкості

Розглянемо ДКШ крену (рис. 8.7), який орієнтовано на ЛА так, що вхідна вісь Y , вихідна вісь X та головна вісь Z приладу відповідно паралельні поздовжній X_1 , поперечній Z_1 та нормальній Y_1 осям ЛА. Прилад має пружину Pr та пневматичний демпфер D .

При віражі ЛА з кутовою швидкістю ω , вектор якої збігається з віссю Y , виникає гіроскопічний момент $M_g = H\omega$, що прагне сумістити вектор кінетичного моменту H з вектором ω найкоротшим шляхом (за правилом Жуковського), внаслідок чого гіромотор почне повертатися навколо осі X . Цьому повороту гіромотора перешкоджає пружина, що розвиває момент:

$$M_{\text{пр}} = K_{\text{пр}}\beta,$$

де $K_{\text{пр}}$ — питомий пружний момент пружини;

β — кут повороту гіромотора навколо осі X.

Момент $M_{\text{пр}}$ спрямований протилежно моменту $M_{\text{Г}}$, тому поворот гіромотора буде відбуватися до тих пір, поки момент пружини не зрівноважить гіроскопічний момент, тобто поки не виконається умова $K_{\text{пр}}\beta = H\omega$, звідки

$$\beta = \frac{H}{K_{\text{пр}}}\omega. \quad (8.1)$$

Таким чином, кут повороту гіромотора навколо осі X пропорційний кутовій швидкості віражу. За допомогою потенціометричного датчика кута кут β перетворюється на напругу $U = K\dot{\beta}$, що подається споживачам.

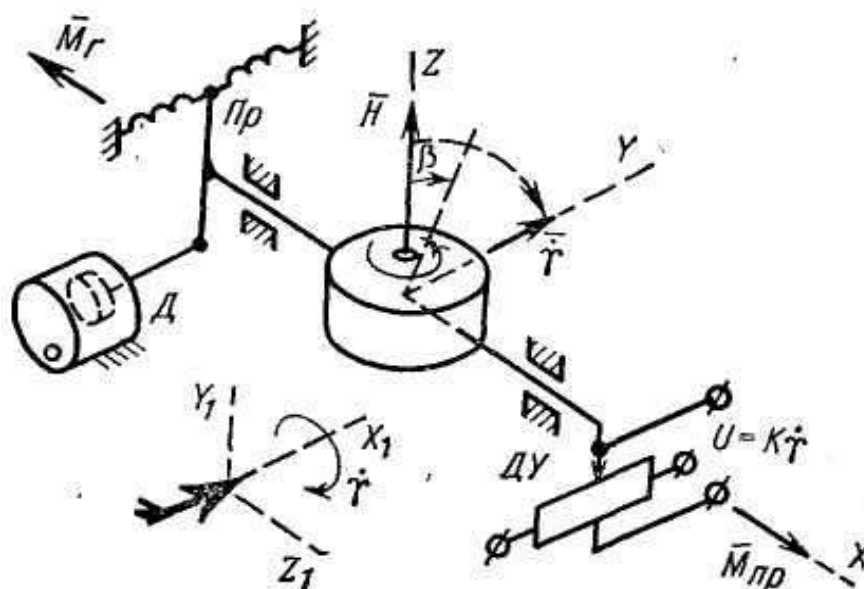


Рис. 8.7. Принцип роботи ДКШ

Такий ДКШ умовно відносять до приладів першого покоління, більш сучасні прилади — поплавкові датчики (друге покоління). Прилади, створені на нових фізичних принципах (третє покоління) — осциляторні, лазерні та інші, нині в основному застосовують поплавкові і «сухі». У цих датчиках для створення протидійного моменту використовують або механічні, або "електричні пружини". Кінематичну схему ДКШ з механічною пружиною показано на рис. 8.7: 1 — демпфівальний пристрій; 2 — вісь підвісу рами гіровузла; 3 — гіровузол; 4 — потенціометричний перетворювач кута повороту гіровузла; 5 — механічна протидійна пружина.

Рівняння динаміки двоступеневого гіроскопа

$$I_x \ddot{\beta} + K_o \dot{\beta} + K_y \beta = H \omega_{y1} \cos \beta - H \omega_{z1} \sin \beta + I \dot{\omega}_{x1} - M_B - (I_z - I_y)(\omega_{y1} \cos \beta - \omega_{z1} \sin \beta)(\omega_{z1} \cos \beta + \omega_{y1} \sin \beta).$$

При $I_z = I_y$

$$I_x \ddot{\beta} + K_o \dot{\beta} + K_y \beta = H \omega_{y1} \cos \beta - H \omega_{z1} \sin \beta + I \dot{\omega}_{x1} - M_B.$$

Оскільки прилад призначено для вимірювання кутової швидкості ω_{y1} , то момент $M_G = H \omega_{y1} \cos \beta$ є корисним, інші моменти створюють тільки похибки приладу.

Рівняння динамічних похибок при діленні на I_x

$$\ddot{\beta} + 2\xi \omega_0 \dot{\beta} + \omega_0^2 \beta = \frac{H}{I_x} \omega_{y1},$$

де $\xi = \frac{k_o}{2I_x \omega_0}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k_y}{I_x}}.$

Передавальна функція ДКШ

$$W_{\text{ДКШ}}(s) = \frac{\beta(s)}{\omega_{y1}(s)} = \frac{k_{\text{ДКШ}}}{T_{\text{ДКШ}}^2 s^2 + 2\xi_{\text{ДКШ}} T_{\text{ДКШ}} s + 1}.$$

Останнім часом розроблені мікросенсори кутових швидкостей інерційного типу. Вони виконані на кремнієвій підкладці за мікромашинною технологією з використанням плівки з полікристалічного кремнію, з якої виготовляється круглий чутливий інерційний елемент.

Чутливому елементу задаються кутові коливання відносно центральної осі; в результаті взаємодії кутових коливань і вимірюваної кутової швидкості виникають сили, що впливають на чутливий елемент, і збуджують іншу моду коливань, вимірювану додатковим сенсором. Роздільна здатність мікросенсора кутової швидкості, яка визначається точністю реєстрації другої моди коливань, становить близько 0,1 %.

8.3. Датчики кутів на основі триступневих гіроскопів

Основою будь-якого гіроскопічного приладу є гіроскоп (рис. 8.8), що являє собою симетричний ротор Р, який швидко обертається. Гіроскоп встановлено у кардановому підвісі. Підвіс складається з двох рам — внутрішньої ВР і зовнішньої ЗР. Вісь обертання ротора встановлено на підшипниках у внутрішній рамі. Внутрішня рама має дві півосі, які на підшипниках укріплені в зовнішній рамі, яка також за допомогою підшипників монтується на підставі.

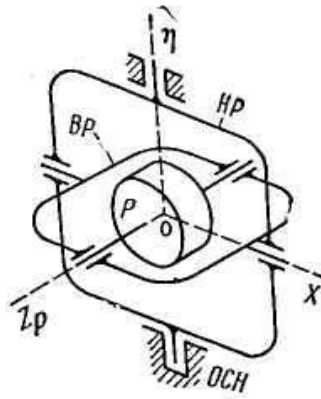


Рис. 8.8. Триступеневий гіроскоп

Карданний підвіс забезпечує три ступені свободи гіроскопа: перша — обертання ротора навколо осі Z_p , яка називається головною віссю; друга — обертання ротора разом з внутрішньої рамою навколо осі X внутрішньої рами; третя — обертання ротора разом з внутрішньої і зовнішньої рамами навколо осі η зовнішньої рами. Такий гіроскоп називається триступеневим.

Якщо центр мас гіроскопа лежить на перетині осей підвісу, то такий гіроскоп називається зрівноваженим або астатичним.

Наведемо тепер ротор в обертання з кутовою швидкістю Ω . При цьому ротор матиме момент кількості руху або кінетичний момент H , що являє собою вектор, який дорівнює добутку полярного моменту інерції I ротора на кутову швидкість його власного обертання: $H = I\Omega$.

Напрямок вектора H кінетичного моменту збігається з напрямком вектора Ω кутової швидкості обертання ротора.

Перша властивість триступеневого гіроскопа — стійкість до короткочасних збурень, поштовхів і ударів. Властивість стійкості характерна тільки для триступеневого гіроскопа. Якщо гіроскоп втрачає одну ступінь свободи, то він втрачає властивість стійкості.

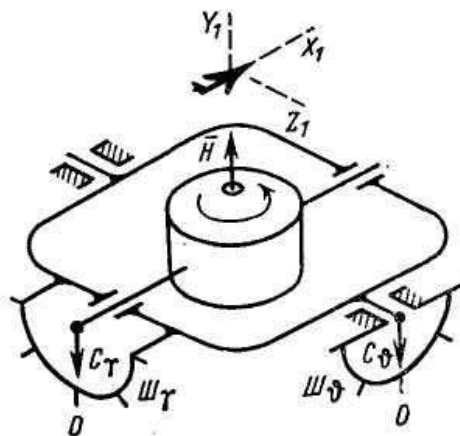


Рис. 8.9. Принцип вимірювання кутів крену і тангажу

Для вимірювання кутів крену і тангажу може бути використаний триступеневий гіроскоп з вертикально розташованою головною віссю (рис. 8.9). Візуально кутове положення ЛА відносно площини горизонту (кути крену і тангажу) можна визначити у такий спосіб. Якщо до осі внутрішньої рами гіроскопа жорстко прикріпити стрілку C_y , а до зовнішньої рами — шкалу $Ш_y$, то при нахилі разом з ЛА і зовнішньої рами буде повертатися шкала $Ш_y$, а стрілка буде залишатися на місці. Переміщення шкали відносно нерухомої стрілки і буде характеризувати кут крену.

Унаслідок відходу гіроскопа через обертання Землі, переміщення ЛА і дії шкідливих моментів по осях внутрішньої і зовнішньої рами його головна вісь буде відхилятися від вертикалі, що призведе до помилок у вимірі кутів крену і тангажу. Отже, вертикальне положення головної осі гіроскопа треба коригувати, що здійснюється за допомогою маятникової системи вертикальної корекції.

Гіроскопічний прилад, призначений для визначення кутів крену і тангажу, поєднує властивість вільного триступеневого гіроскопа зберігати незмінним положення своєї головної осі в інерціальній просторі і властивість фізичного маятника встановлюватися (при русі підстави без прискорення) у напрямку місцевої вертикалі, яка називається гіровертикаллю.

Гіровертикалі, за допомогою яких кути крену і тангажу визначаються візуально, називаються авіагоризонтом.

Рівняння руху *триступеневого гіроскопа*, встановленого на нерухомій основі:

$$\begin{aligned} I_x \ddot{\beta} + I_z (\dot{\phi} - \dot{\alpha} \sin \beta) \dot{\alpha} \cos \beta - I_y \dot{\alpha} \cos \beta (-\dot{\alpha} \sin \beta) &= M_x; \\ I_y \ddot{\alpha} \cos \beta - I_y \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \beta + I_x \dot{\beta} (-\dot{\alpha} \sin \beta) - I_z \dot{\beta} (\dot{\phi} - \dot{\alpha} \sin \beta) &= M_y; \\ I_z \ddot{\phi} - I_z \dot{\alpha} \dot{\beta} \cos \beta - I_z \ddot{\alpha} \sin \beta + I_y \dot{\alpha} \dot{\beta} \cos \beta - I_x \dot{\alpha} \dot{\beta} \cos \beta &= M_z. \end{aligned}$$

Спрощення моделі:

- припустимо, що кути α і β є малими;
- для симетричного ротора $I_x = I_y = I_z$;
- момент M_z відносно осі OZ дорівнює $M_z = M_{\partial\sigma} - M_{on} = 0$;
- момент M_{on} момент опору в опорах;
- вважаємо $\dot{\phi} = const$.

Математична модель *триступеневого астатичного гіроскопа*:

$$\begin{cases} I_e \ddot{\beta} + H \dot{\alpha} \cos \beta = M_x; \\ I_e \ddot{\alpha} \cos \beta - H \dot{\beta} = M_y, \end{cases}$$

де I_e — момент інерції гіродвигуна; $H = I_p \dot{\phi}$ — кінетичний момент гіроскопа.

Якщо моменти збурення M_x і M_y відсутні, вихідна математична модель буде описувати рух так званого *вільного гіроскопа*:

$$\begin{cases} I_e \ddot{\beta} + H \dot{\alpha} = 0; \\ I_e \ddot{\alpha} - H \dot{\beta} = 0 \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} \ddot{\beta} + \left(\frac{I_p}{I_e} \Omega \right)^2 \dot{\beta} = 0; \\ \ddot{\alpha} + \left(\frac{I_p}{I_e} \Omega \right)^2 \dot{\alpha} = 0, \end{cases}$$

вісь власного обертання ротора Z гіроскопа при вільному його русі здійснює гармонійні коливання відносно осі підвісу зовнішньої і внутрішньої рам з частотою

$$\nu = \frac{I_p}{I_e} \Omega.$$

8.4. Найпростіший датчик кута

Вилучивши пружний елемент в кінематичній схемі ДКШ (див. рис. 8.7), отримаємо інтегровальний двоступеневий гіроскоп для вимірювання кутового параметра, передаточна функція якого має вигляд

$$W_{\text{ДВ}}(s) = \frac{\beta(s)}{\omega_{y1}(s)} = \frac{k_{\text{ДВ}}}{s(T_{\text{ДВ}}s + 1)},$$

де

$$\ddot{\beta} + \omega_0 \dot{\beta} = \frac{H}{I_x} \omega_{y1}.$$

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / за ред. Я. І. Проця. — Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пуля, 2011. — 344 с.
2. Яцков, М. В. Типові технологічні процеси та апарати : навч. посіб. / М. В. Яцков, Н. М. Корчик, О. І. Мисіна. — Рівне : Червінко А. В., 2012. — 278 с.
3. Благодарний, М. П. Елементи і вузли мехатронних комплексів комп'ютерно-інтегрованих виробництв : навч. посіб. / М. П. Благодарний, І. П. Внуков. — Харків : ХАІ, 2010. — 152 с.
4. Основи вимірювань та автоматизації технологічних процесів : підручник / А. К. Бабіченко [та ін.] ; за заг. ред. А. К. Бабіченка. — Харків : Золоті сторінки, 2007. — 515 с.
5. Селевцов, Л. И. Автоматизация технологических процессов / Л. И. Селевцов, А. Л. Селевцов. — М. : Изд. центр «Академия», 2014. — 352 с.
6. Келим, Ю. М. Производство электронных и электрических средств автоматизации : учеб. пособие для средн. проф. учеб. заведений. / Ю. М. Келим. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Высш. шк., 2004. — 352 с.
7. Лебедев, А. А. Системы электронной автоматики, приборное и высотное оборудование летательных аппаратов : учебник / А. А. Лебедев. — М. : Воениздат, 1978. — 310 с.
8. Виглеб, Г. Датчики : пер. с англ. / Г. Виглеб. — М. : Мир, 1989. — 267 с.
9. Балагуров, В. А. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, В. М. Гридин, В. К. Лозенко. — М. : Энергия, 1975. — 128 с.
10. Аш, Ж. Датчики измерительных систем : пер. с фр. В 2 кн. Кн. 1 / Ж. Аш. — М. : Мир, 1992. — 480 с.
11. Аш, Ж. Датчики измерительных систем : пер. с фр. В 2 кн. Кн. 2 / Ж. Аш. — М. : Мир, 1992. — 424 с.
12. Фрайден, Д. Современные датчики : пер. с англ. / Д. Фрайден. — М. : Техносфера, 2005. — 592 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	3
1. ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	4
1.1. Склад систем автоматики.....	4
1.2. Поняття датчика інформації.....	7
1.3. Структура датчика інформації	9
1.4. Класифікація датчиків.....	9
1.5. Технічні характеристики датчиків.....	17
1.6. Аналоги датчиків інформації.....	21
2. ОСНОВНІ МЕТОДИ ТА СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ.....	27
2.1. Електричні вимірювання неелектричних величин.....	27
2.2. Мостова вимірювальна схема постійного струму.....	29
2.3. Мостова схема змінного струму.....	32
2.4. Диференціальні вимірювальні схеми.....	34
2.5. Компенсаційні вимірювальні схеми.....	36
3. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕННЯ ТА ПЕРЕМІЩЕННЯ.....	37
3.1. Потенціометричні вимірювальні перетворювачі.....	37
3.2. Функціональні потенціометричні датчики.....	42
3.3. Індуктивні вимірювальні перетворювачі	44
3.4. Ємнісні вимірювальні перетворювачі.....	52
4. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ І ТИСКУ.....	56
4.1. Методи і особливості вимірювання температури.....	56
4.2. Класифікація термометрів. Механічні термометри.....	57
4.3. Електричні термометри опору.....	58
4.4. Термодинамічні термометри.....	61
4.5. Шкали температур.....	63
4.6. Методи вимірювання тиску.....	63
5. ДАТЧИКИ СИЛИ, ВАГИ, МОМЕНТУ.....	66
5.1. Вимірювання сили і напруження.....	66
5.2. Датчики ваги.....	69
5.3. Вимірювання крутного моменту.....	70
6. ДАТЧИКИ ПРИСКОРЕННЯ ТА ВІБРАЦІЙ	71
6.1. Вимірювання лінійних прискорень.....	71
6.2. Вимірювання вібрацій.....	74
7. ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	75
7.1. Системи живлення аерометричних приладів.....	75
7.2. Прилади для вимірювання повітряної швидкості.....	77
7.3. Варіометри.....	79
8. ДАТЧИКИ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ І КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ.....	80
8.1. Тахометричні датчики.....	80
8.2. Гіроскопічні датчики кутової швидкості.....	85
8.3. Датчики кутів на основі триступневих гіроскопів.....	87
8.4. Найпростіший датчик кута.....	90
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	91

Навчальне видання

**Кочук Сергій Борисович
Кислий Анатолій Григорович**

**ОБЛАДНАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ**

Редактор Н. М. Сікульська

Зв. план, 2021

Підписано до видання 29.12.2021

Ум. друк. арк. 5,2. Обл.-вид. арк. 5,81. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001