

## Лекція 3.

# ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВИДУ ЕНЕРГІЇ СИГНАЛУ

### 3.1. Резистивні перетворювачі

Найбільш простий вид перетворювачів — резистивні. До них відносяться реостатні, тензо-, термо-, фото-, магніторезисторні і деякі інші.

*Реостатний перетворювач* є реостатом, повзун якого переміщається відповідно до зміни вимірюваної неелектричної величини. Таким чином, вхідною величиною стає переміщення повзуна (лінійне або кутове), а вихідний - активний опір, розподілений по шляху повзуна лінійно або відповідно до якого-небудь іншого закону.

Конструктивно реостатні перетворювачі виконують у вигляді обмоток, намотаних на каркас, або реохорда. Застосовують константанові та манганінові дроти, а для роботи в умовах високих температур - фехралеві. У особливо відповідальних випадках намотують дріт із сплавів платини з іридієм, паладієм або рутенієм.

Каркас перетворювача виготовляють з текстоліту, склотекстоліту, застосовують також каркаси з алюмінієвих сплавів, покритих ізоляційним лаком або оксидною плівкою. Останні більш термостійкі і дозволяють за рахунок кращої теплопровідності підвищувати щільність струму в обмотці і тим самим чутливість перетворювача. Форми каркасів вельми різноманітні: у вигляді плоскої або циліндрової пластини, плоского або циліндрового кільця, плоского сегменту і так далі

Індуктивні і ємкісні опори реостатних перетворювачів вельми малі, у зв'язку з чим реактивний опір перетворювача можна не брати до уваги до частот близько декількох кілогерц.

Розглянемо декілька прикладів конструктивного пристрою і найбільш поширені схеми включення реостатних перетворювачів (рис. 3.1).

Реостатний перетворювач (рис. 3.1, а) складається з каркаса 1 на який намотаний ізолюваний дріт 2. По верхній грані каркаса, частина бічної поверхні якого показана на рис. 3.1, б, ковзає щітка 3 двигуна реостату. Ізоляція дроту для забезпечення електричного контакту зачищена. Напругу живлення перетворювач подає до двох крайніх затисків, вихідну величину знімають між одним з крайніх затисків і середнім затиском, поєднаним з струмозмінним кільцем 4, по якому ковзає щітка 5. Приводний валік 6 електрично ізолюваний від решти елементів двигуна. Електрична схема перетворювача показана на рис. 3.1, в.

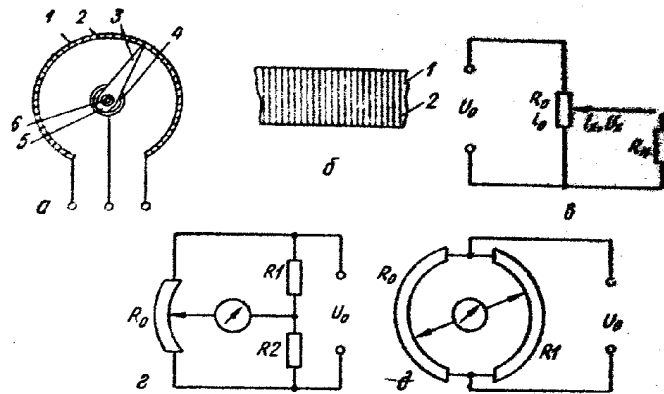


Рис. 3.1 Пристрій (а, б) і схеми включення (в - д) реостатних перетворювачів

Функція перетворення реостатного перетворювача визначається співвідношенням:

$$U_x = \frac{U_0 l_x / l_0}{1 + (R_0 / R_H) (l_x / l_0) [1 - (l_x / l_0)]}, \quad (3.1)$$

де  $U_x$  - вихідна напруга;  $l_x$  - вхідне переміщення;  $l_0$  - загальна довжина обмотки перетворювача;  $R_0$  - загальний опір перетворювача;  $R_H$  - опір навантаження;  $U_0$  - напруга живлення.

Для випадку кутового переміщення  $l_x = r\phi_x$  де  $r$  - радіус каркаса перетворювача;  $\phi_x$  - вхідне кутове переміщення.

Недолік розглянутої схеми - нелінійна залежність струму від переміщення повзуна. Величина нелінійності залежить від співвідношення

внутрішнього опору гальванометра  $R_2$  додаткового опору  $R_0$  і опору перетворювача  $R_0$ . Нелінійність мостових схем (рис. 3.1, з, д) зазвичай невелика. Оскільки вони і чутливіші, то і ширше застосовуються.

*Тензорезисторний вимірювальний перетворювач* є пристроєм у вигляді відрізка або спіралі з металу або напівпровідникового матеріалу, закріплених тим або іншим способом на досліджуваному об'єкті, що зазнає пружної деформації під дією прикладених до нього сил.

В даний час практично застосовуються три різновиди тензорезисторів — дротяні, фольгові і напівпровідникові. Фізичні процеси, що протікають в тензорезисторах перших двох типів, абсолютно однакові, і зміна їх опору при деформації визначається тільки зміною геометричних параметрів. Стискування або розтягування деталі, на якій встановлений тензорезистор, викликає пропорційне стискування або розтягування дроту тензорезистор а, внаслідок чого змінюються її довжина  $l$  поперечний перетин  $s$ , питомий електричний опір  $\rho$  і, отже, електроопір:

$$R = \rho l / s. \quad (3.2)$$

Відносна зміна опору тензорезистора визначається співвідношенням:

$$\Delta R / R = \Delta l (1 + 2\mu) / l + \Delta \rho / \rho, \quad (3.3)$$

де  $\Delta l$  - зміна довжини дроту;  $\Delta \rho$  - зміна питомого електроопору;  $\mu$  - коефіцієнт Пуасона.

Частка від ділення відносної зміни опору на відносну зміну довжини дроту в межах пружної деформації характеризується постійною величиною:

$$(\Delta R / R) / (\Delta l / l) = \varepsilon_R / \varepsilon_l = S \quad (3.4)$$

$S$  - називають *коефіцієнтом тензочутливості*. Він залежить від властивостей матеріалу, з якого виконаний тензорезистор, і технології його виготовлення.

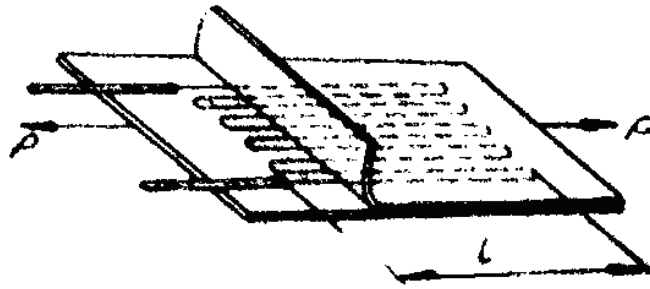


Рис 3.2 Пристрій дротяного наклеюваного тензорезистора

Дротяні тензорезистори бувають наклеювані і ненаклеювані. Останні застосовують рідше. Наклеюваний тензорезистор (рис. 3.2) є решітка у вигляді петель з тонкого високоомного дроту діаметром 20 - 30 мкм, закріпленого за допомогою спеціального клею на ізоляційній підкладці. Як підкладку використовують тонкий щільний папір, спеціальні сорти тканин і плівок. Найбільшого поширення набули тензорезистори із спеціального константа нового мікродроту. До кінців дроту грат приварюють або припаюють мідну дотину більшого діаметру завдовжки 20 - 70 мм, за допомогою яких тензорезистор підключають до вимірювальної схеми. Тензорезисторний перетворювач наклеюють на досліджувану деталь або елемент датчика. Підкладка тензорезистора спільно з тонким шаром клею служить ізоляцією між дротом тензорезистора і поверхнею досліджуваного елемента. Деформація цієї поверхні передається до тензорезистору через шар клею. Вважається, що зміна опору тензорезистора точно відповідає деформації зразка. Ретельність наклейки тензорезистора - основний чинник, що визначає точність вимірювань. Дані про параметри універсальних прогорілчаних тензорезисторів і технології їх наклейки є в спеціальній літературі.

До дротяних тензорезисторів відносяться також перетворювачі у вигляді гумових і пластикових капілярів з внутрішнім діаметром 0,1 - 0,5 мм, заповнених ртуттю. Такі тензорезистори дозволяють визначати деформацію матеріалів зі ступенем 40 - 50%, тобто далеко за межами пружності. Серійно перетворювачі цього класу поки не випускають.

Фольгові тензорезистори є подальшим розвитком дротяних і на відміну від останніх мають решітки не з круглого дроту, а з тонких смужок фольги прямокутного перетину товщиною 4 - 12 мкм, які наносять на лакову основу. Завдяки більшій площі контакту смужок з об'єктом вимірювана тепловіддача у фольгового тензорезистора значно вища, ніж у дротяного, що дозволяє збільшувати силу струму, який протікає через тензорезистор, до 0,5 А і тим самим підвищувати чутливість тензоперетворювача.

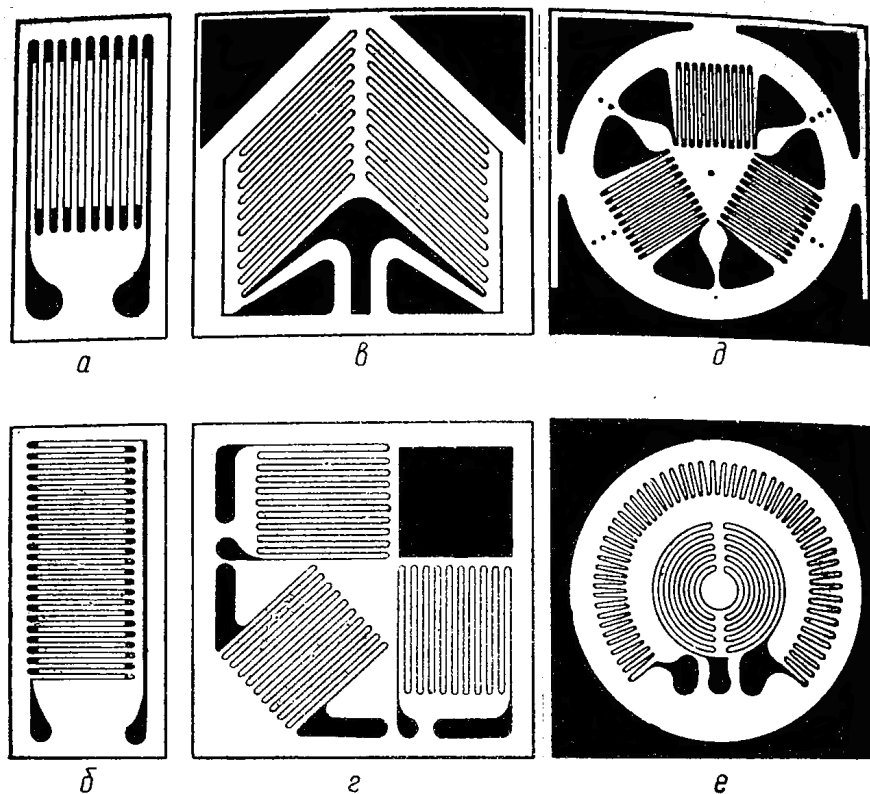


Рис. 3.3 Конфігурація ґрат фольгових фольга тензорезисторів:  
*a, б* – прямокутні, *в – д* – розеткові; *е* – мембранна

Перевага фольгових тензорезисторів і в тому, що, використовуючи фотомеханічний спосіб виробництва, їх можна виготовити з такою конфігурацією решіток, яка якнайповніше відповідає умовам вимірювань. Так, прямокутні решітки (рис. 3.3, *a, б*) застосовують для вимірювань лінійних деформацій, розеткові (рис. 3.3, *в - д*) - для вимірювання крутячих моментів і дослідження напружено-деформованого стану, а мембранні (рис. 3.3, *е*) - для наклейки на мембрани.

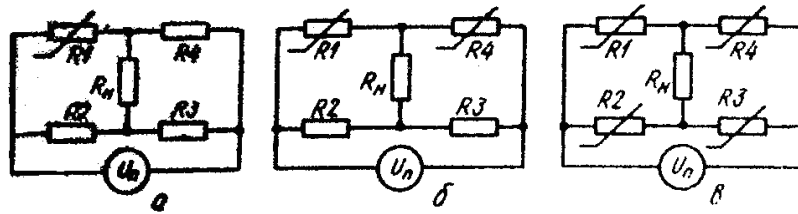


Рис. 3.4. Способи включення тензорезисторів в мостову схему:

Напівпровідникові тензорезистори в порівнянні з розглянутими мають істотні переваги: чутливість їх в 50 - 60 разів вище за чутливість дротяних, розміри істотно менші, а високий рівень вихідного сигналу вимірювальних схем у багатьох випадках виключає застосування складних і дорогих підсилювачів.

Від дротяних і фольгових тензорезисторів напівпровідникові відрізняються великою (до 50%) зміною опору тензоперетворювача при деформації. Проте вони володіють значною нелінійністю статичної характеристики і іншими недоліками - високою чутливістю до дії зовнішніх умов (температури, освітлення і т. п.) і істотним розкидом характеристик від зразка до зразка.

Способи включення тензорезисторів в мостову схему різні (рис. 3.4). Схема дозволяє включати один, два або чотири активних (схильних до деформації) тензорезисторів. Один активний тензорезистор (рис. 3.4, а) можна включити в будь-яке плече схеми моста. Два, як правило, включають в суміжні плечі моста по схемі рис. 3.4, б. Схему можна змінити так, що активними стануть тензорезистори  $R1$  і  $R2$  або  $R1$  і  $R3$ . Проте в цьому випадку не буде забезпечена термокомпенсація, у зв'язку з чим такі варіанти включення застосовують рідко.

В процесі навантаження елемента кожен з тензорезисторів, наклеєних на його поверхню (рис. 3.5), залежно від знаку деформації міняє свій опір на

$$\pm \Delta R \text{ так що } R = R_0(1 \pm \Delta R/R_0) = R_0(1 \pm \epsilon_R) . \text{ Отже, щоб отримати максимальну}$$

вихідну напругу  $U_{\text{вих}}$ , потрібно враховувати, з яким знаком деформації тензорезистор включається в те або інше плече схеми (за винятком схеми

рис. 3.4, а). Так, для схеми рис. 3.4, б за умови  $\varepsilon_1 = \varepsilon_4$  вихідна напруга за рахунок зміни опорів  $R1$  і  $R4$  тензорезисторів не зміниться; при виконанні ж рівності  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_4$  (схема наклейки рис. 3.5, з) вихідна напруга мостової схеми подвоїться в порівнянні з випадком, коли активним вибраний лише один тензорезистор (рис. 3.5, а).

Вимірюючи обертовий момент, який прикладений до валу, тензорезистори слід наклеювати уздовж ліній, складаючих з віссю вала кут  $45^\circ$  (рис. 3.5, в).

Максимальна вихідна напруга мостової схеми досягається при чотирьох активних тензорезисторах (рис. 3.4, в). Якщо  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_4$  і  $\varepsilon_2 = -\varepsilon_3$  вихідна напруга буде в 4 рази вище, ніж при одному активному тензорезисторі (рис. 3.4, а). При цьому забезпечується термокомпенсація. Реалізація цієї схеми показана на рис. 3.5, д.

Деформацію різного знаку можна отримати не тільки при згині або крученні, але і при осьовому вантаженні елементу (рис. 3.5, б), якщо один з тензорезисторів (активний) наклеїти уздовж напрямку дії навантаження, а інший (пасивний) - уперек. При цьому пасивний терморезистор володіє так званою бічною чутливістю. Його деформація  $\varepsilon_4 = -\mu\varepsilon_1$  значно менше деформації  $\varepsilon_1$  активного тензорезистора ( $\mu$  - коефіцієнт Пуасона).

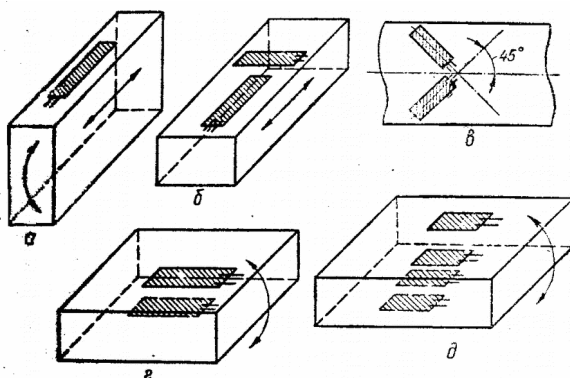


Рис. 3.5. Схеми наклейки тензорезисторів для зміни деформації:  
а, б – при осьовому вантаженні; в – при обертанні; з, д – при вигині

Терморезисторні перетворювачі використовують залежність опору  $R_t$  провідників і напівпровідників від температури. Для провідників:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(t_x^0 - t_0^0)], \quad (3.5)$$

де  $R_0$  - опір провідника при деякій початковій  $t_0^0$  ;  
 $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору (ТКО).

Для напівпровідників ця залежність характеризується показовою функцією:

$$R_t = R_{20} \exp[B/T - B/T_0], \quad (3.6)$$

де  $R_{20}$  - опір напівпровідника при температурі  $t_0^0 = 20^\circ\text{C}$ ;  $B$  - константа, визначувана типом напівпровідника і деякими, конструктивними параметрами;  $T$  - абсолютна температура, К.

Величину ТКО для напівпровідникових терморезисторів (термісторів) визначають залежністю:

$$\beta_t = -B/T^2. \quad (3.7)$$

Основні вимоги, що пред'являються до матеріалів для виготовлення металевих терморезисторів, наступні: можливе більше та не змінне в часі значення ТКО, неокислюваність при підвищених температурах і великий питомий опір. Зазвичай для терморезисторів з позитивним ТКО застосовують тонкий дріт діаметром 0,02 - 0,1 мм або плівку з платини, міді, нікелю і інших чистих металів. Платинові перетворювачі застосовують для високих температур (до  $800^\circ\text{C}$ ), а мідні - для порівняно низьких (від  $-50$  до  $+200^\circ\text{C}$ ). У платиновому терморезисторі (рис. 3.6, а) неізолюваний платиновий дріт 2 діаметром 0,07 мм намотаний біфілярно на каркас 1 - слюдяну пластину із зубчатою насічкою по краях. До кінців обмотки приварені виводи з товстого (близько 1 мм) срібного дроту (або стрічки). Каркас з обмоткою затиснутий між двома ширшими пластинами 3, призначеними для ізоляції дроту. Пакет із слюдяних пластин скріплено срібною стрічкою 4 і вставлено в алюмінієвий циліндровий чохол 5, що захищає обмотку перетворювача від механічних



пошкоджень. Для зменшення теплової інерції перетворювача між пакетом і чохлам поміщені суцільні металеві вкладиші 6. У малоінерційних перетворювачів замість суцільних вкладишів застосовують порожнисті дюралюмінієві вкладиші - пелюстки, які забезпечують достатньо добру передачу теплоти і мають малу теплоємність, що зменшує теплову інерцію перетворювача. Для захисту терморезистора від дії зовнішнього середовища (вологості, тиску, агресивних газів і т.п.) чохол разом з обмоткою поміщають в захисну арматуру (рис. 3.6, б).

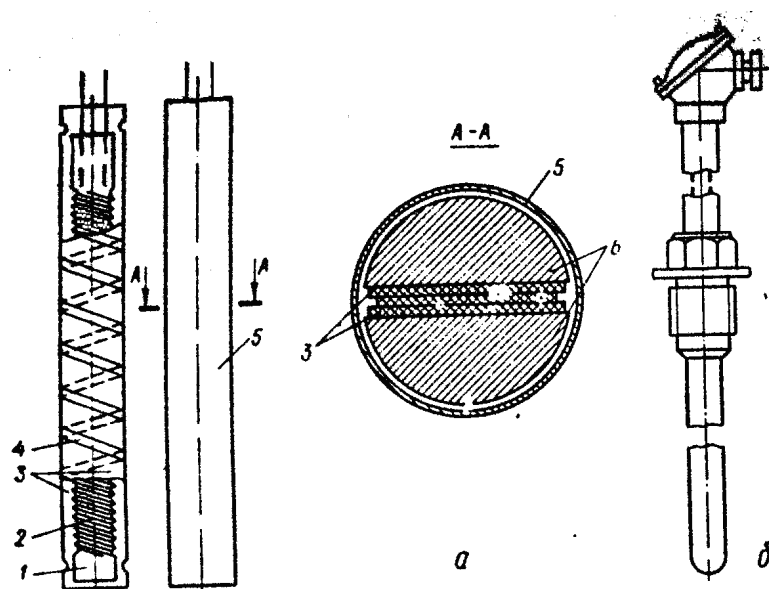


Рис. 3.6 Пристрій (а) і зовнішній вигляд арматури (б) платиного терморезистора

Початкові опори (при  $0^{\circ}\text{C}$ ) платинових стандартних терморезисторів дорівнюють 1, 5, 10, 46, 50, 100 і 500 Ом; а мідних - 10, 50, 53 і 100 Ом. Допустиме значення струму, що протікає по терморезистору при включенні його у вимірювальну схему, має бути таким, щоб зміна опору терморезистора за рахунок нагріву не перевищувала 0,1 % початкового опору. Для стандартних терморезисторів є градуювальні таблиці (ГОСТ 6651-78). Допустимі відхилення градуювальної характеристики цих перетворювачів також стандартизовані.

Для виготовлення терморезисторів з негативним ТКО (термісторів) застосовують суміші з різних оксидів металів, наприклад  $\text{CuO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$  і ін.

Виконують термістори у вигляді стрижнів, дисків або намистинок з напівпровідникового матеріалу, в які впресовані металеві виводи. (рис. 3.7).

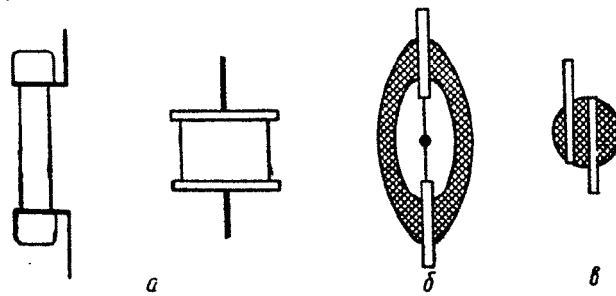


Рис. 3.7 Термістори: *a* – стрижньовий типу ММТ-1, КМТ-1; *б* – дисковий типу ТОС; *в* – бусинковий типу Т8С, ТУ

Простими і найбільш поширеними схемами включення терморезисторів, що часто зустрічаються, є мостові з живленням постійним або (частіше) змінним струмом. До найбільш досконалих схем включення терморезисторних перетворювачів можна віднести схеми автобалансних мостів з живленням змінним струмом підвищеної частоти і частотні автобалансні мости.

Вимірювальні перетворювачі з фотоопором (фоторезистори) є пристроями, електричний опір яких міняється залежно від освітленості. Як фоторезистори можуть бути використані фотоелементи із зовнішнім і внутрішнім фотоефектом (рис. 3.8).

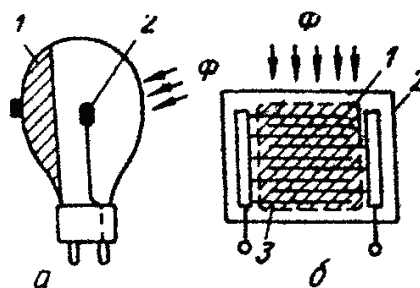


Рис. 3.8 Схеми фотоелементів із зовнішнім (а) і внутрішнім (б) фотоефектом

Фотоелемент із зовнішнім фотоэффектом (рис. 3.8, а) - це двоелектродний вакуумний або газонаповнений прилад. Катод 1 є шаром спеціального металу (цезію, рубідія і ін.), розпорошеного на внутрішній поверхні скляного балона. Анод 2, виконаний у вигляді металевого кільця або круглої пластини, розташований в середині балона. Якщо між анодом і катодом прикласти деяку різницю потенціалів і освітити катод, то в результаті випускання електронів фотокатодом 1 через прилад піде струм. Сила струму за інших рівних умов залежить від інтенсивності опромінювання катода.

Фотоелемент з внутрішнім фотоэффектом (рис. 3.8, б) має тонкий шар напівпровідника 1, нанесеного на скляну пластину 2, на якій заздалегідь наклеєні решітки з тонких провідників 3. Як напівпровідники використовують селен, сплав сульфїду талїя з оксидом талїя, сїрчаний свинець і ін. При освітленні такого приладу пов'язані з атомами електрони звільнюються і переходять у вільний стан, що і викликає зміну електроопу провідника.

Перетворювачі з фотоопором, широко використовуються як для виявлення джерела випромінювання і оцінки його інтенсивності, так і для непрямого контролю.

*Магніторезисторні перетворювачі* (магніторезистори) працюють на ефекті зміни електроопу напівпровідника, поміщеного в магнітне поле. Зміна питомого опору магніторезистора в магнітному полі пояснюється подовженням шляху руху електронів в напівпровіднику в результаті дії сили Лоренца, що скривлює їх траєкторію. Відповідно до прийнятої теорії залежність питомого електричного опору напівпровідника від магнітної індукції  $B$  до 0,3 - 0,5 Тл визначається виразом:

$$\Delta\rho/\rho_0=A(\chi B)^n, \quad (3.8)$$

де  $\Delta\rho$  - зміна питомого електричного опору при індукції  $B$ ;  $\rho_0$  - значення питомого електроопу при індукції  $B = 0$ ;  $A$  - коефіцієнт форми;

$\chi$  - рухливість електронів;  $n = 1$  і  $2$  - показники ступеня, залежний від величини магнітної індукції.

Магніторезистори зручні для вимірювання переміщень. Магніторезистор, переміщуваний в монотонно зростаючому або спадаючому магнітному полі, може служити параметричним датчиком переміщення.

Вимірювальні перетворювачі з іонізаційним опором працюють також на принципі зміни опору. Виконують їх зазвичай у вигляді невеликої камери, заповненої газом (іонізаційної камери). У камері встановлюють два електроди, до яких підводять напругу. За певних умов газовий проміжок між електродами - досить хороший ізолятор. Але досить змінити ці умови (наприклад, знизити тиск газу) і впливати на газ тим або іншим іонізуючим агентом (ультрафіолетовими або рентгенівськими променями, радіоактивним випромінюванням і т. п.), як газ іонізується і набуває значної рухливості.

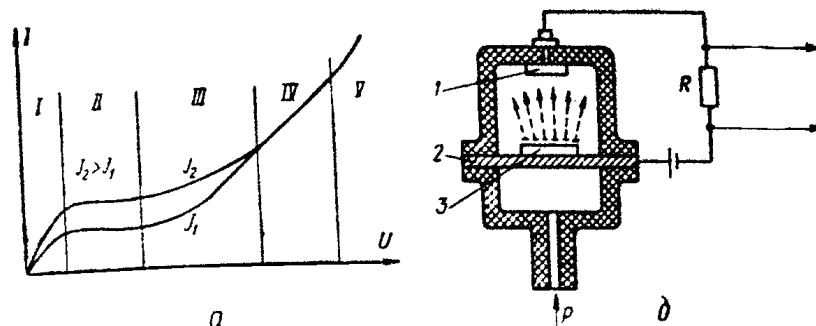


Рис. 3.9 Вольт-амперна характеристика (а), і приклад пристрою (б) іонізаційного перетворювача

Іонізаційний струм залежить від параметрів газового середовища камери, напруги на електродах, властивостей і інтенсивності іонізуючого агента. Залежність струму  $I$  в камері з постійним складом газу від прикладеної напруги  $U$  і інтенсивності випромінювання  $J$  представлена на рис. 3.9, а. На ділянці I характеристики струм збільшується прямо пропорційно напрузі, досягаючи на ділянці II насичення. На ділянці III іонізаційний струм знову росте за рахунок вторинної іонізації. При подальшому збільшенні напруги іонізаційний струм перестає залежати від

первинної іонізація (ділянка *IV*). Потім наступає безперервний розряд (ділянка *V*). На ділянках *I* і *II* працюють іонізаційні камери, а на ділянці *III*, *IV* - іонізаційні лічильники.

Як приклад на рис. 3.9, б показаний пристрій іонізаційного мембранного манометра, де 3 -  $\alpha$  - або  $\beta$  -випромінювач; 2 - мембрана; 1 - нерухомий електрод, ізольований від мембрани. Між електродами 2 і 1 прикладена різниця потенціалів, достатня для насичення. При зміні тиску мембрана прогинається, змінюючи відстань між електродами, а отже, і значення іонізаційного струму.

Поглинання  $\beta$  -частинок у функції товщини шару речовини характеризується виразом:

$$N = N_0 e^{-\mu d}, \quad (3.10)$$

де  $N$  - число  $\beta$  -частинок, що пройшли через шар товщиною  $d$ ;  $N_0$  - число  $\beta$  -частинок у відсутності поглинаючої речовини;  $\mu$  - коефіцієнт ослаблення.

$\gamma$  -промені, проходячи через речовину, ослабляються відповідно до рівняння (для вузького пучка):

$$J = J_0 e^{-\mu d}, \quad (3.11)$$

де  $J$  - інтенсивність променів, що пройшли через тіло;  $J_0$  - інтенсивність тих, що поступають в тіло  $\gamma$  -променів.

Велика проникаюча здатність  $\gamma$  -променів дає можливість вимірювати товщину металевих листів, штаб і т.п. виробів.

### 3.2. Ємкісні перетворювачі

У основу роботи ємкісного перетворювача покладена зміна ємкості електричного конденсатора при дії на нього вимірюваної величини. У дослідженнях процесів ОМТ ємкісні датчики використовують для вимірювання деформацій, переміщень і сил.

Нехтуючи краєвими ефектами, ємність перетворювача з плоскими паралельними пластинами можна охарактеризувати співвідношенням:

$$C=0,088\epsilon s/d \quad , \quad (3.12)$$

де  $s$  - активна площа пластин конденсатора,  $\text{см}^2$ ;  $\epsilon$  - відносна діелектрична проникність,  $\text{пФ/см}$ ;  $d$  - товщина діелектрика,  $\text{см}$ .

Залежно від того, на який параметр впливає вимірювана величина, ємкисний перетворювач може працювати на принципі зміни діючої площі  $s$ , відстані між пластинами  $d$  або діелектричній проникності середовища  $\epsilon$ .

При вимірюванні лінійних і кутових переміщень найбільш прийнятний принцип зміни діючої площі  $s$  (рис. 3.10). Тоді функцію перетворення ємкісного перетворювача можна записати у такому вигляді:

$$\Delta C=C_0-C_1=0,088 \epsilon \Delta s/d, \quad (3.13)$$

де  $C_0, C_1$  - ємкість відповідно на початку процесу і у момент вимірювання.

Коефіцієнт перетворення ємкісного перетворювача із змінною площею  $\Delta C/C=\Delta s/s$ , тим більше, чим більше відносна зміна площі вимірювального конденсатора при одиничній зміні вхідної величини.

Нарівні з плоскими конденсаторами (рис. 3.10, а) для вимірювання переміщень широко застосовують циліндрові конденсатори (рис. 3.10, б), що складаються з коаксіальних циліндрів з діелектричним середовищем між ними, зрушуваних при вимірюванні один щодо одного. Зміна ємкості такого конденсатора при зсуві  $\Delta C$  дорівнює:

$$\Delta C=0,088 \cdot 2\pi\epsilon \Delta l / \ln(D_n/D_v) \quad . \quad (3.14)$$

Для вимірювань, пов'язаних з обертанням або поворотом досліджуваного об'єкту, використовують перетворювачі, що складаються з нерухомо закріпленого статора 1 (рис. 3.10, в) і рухомого ротора 2, пов'язаного з вузлом, кут повороту якого вимірюється. Ємкість такого перетворювача залежить від кута повороту:

$$C=C_0+0,088 \epsilon \phi \psi / d \quad , \quad (3.15)$$

де  $C_0$  - початкова ємкість;  $\psi$  - зміна площі на одиницю кута повороту.

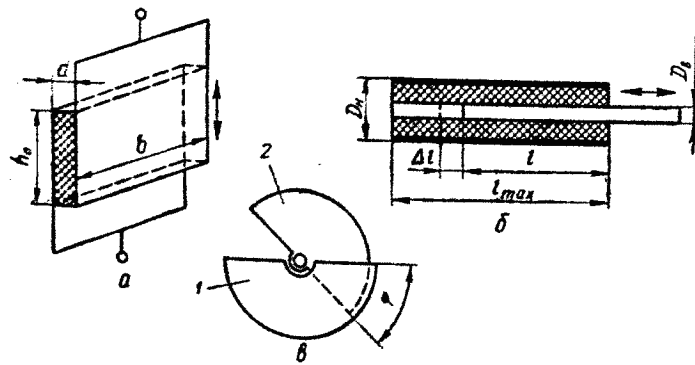


Рис. 3.10 Схеми ємкісних перетворювачів із змінною площею:

*a* – плоского; *б* – циліндрового; *в* – обертового

Виміряти великі зміни ємкості відносно нескладно найрізноманітнішими способами. Для визначення малих змін ємкості використовують методи мостовий, резонансний і биття. Перший з них найбільш простий і застосовується для  $\Delta C/C = 10^{-4}$ .

### 3.3. Електромагнітні параметричні перетворювачі

До електромагнітних відносять наступні типи параметричних перетворювачів; індуктивні, трансформаторні і магнітопружні. Для них характерне використання залежності характеристик магнітного ланцюга (магнітного опору  $R$ , магнітної проникності  $\mu$  і ін.) від механічної дії на елементи цього ланцюга.

*Індуктивний перетворювач* є дроселем з повітряним зазором  $\delta$ , що змінюється (рис. 3.11, *a*) або з площею  $s$  поперечного перетину магнітопровода, що змінюється (рис. 3.11, *б*). Як вихідний параметр в ньому виступає зміна індуктивності  $L$  (або повного опору  $Z$ ) обмотки, одягнутої на сердечник.

У разі невеликого зазору  $\delta$  індуктивність дроселя зі змінним зазором (без урахування реактивного опору, обумовленого втратами на вихрові струми і гістерезу) дорівнює:

$$L = \omega^2 / (R_{жс} + R_0) = \omega^2 / (l_{жс} / \mu s + 2\delta / \mu_0 s_0) \quad , \quad (3.16)$$

де  $\omega$  - число витків обмотки;  $R_{ж}$   $R_0$  - магнітний опір сердечника і повітряного зазору відповідно;  $\mu$  ,  $\mu_0$  - магнітна проникність матеріалу сердечника і повітряного зазору;  $\delta$  - повітряний зазор;  $l_{ж}$  - довжина магнітного ланцюга сердечника. Коли магнітний опір повітряного зазору значно більше магнітного опору магнітопровода, тобто  $R_0 > R_{ж}$  вираз (3.16) можна записати у такому вигляді:

$$L = \omega^2 s_0 \mu_0 / 2 \delta \quad (3.17)$$

З цього рівняння видно, що залежність індуктивності  $L$  котушки від зазору  $\delta$  істотно нелінійна. Задовільна лінійність має місце лише за умови, що  $\Delta\delta < \delta$  і  $2\delta / \mu_0 s_0 > l_{ж} / \mu s$ . Повний опір обмотки перетворювача  $Z$ :

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad (3.18)$$

де  $R$  - активна складова опору;  $\omega^2 L^2$  - кругова частота змінного струму.

Відповідно струм в обмотці:

$$I = U / \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}. \quad (3.19)$$

Чутливість індуктивного перетворювача на підставі (3.17) пропорційно квадрату зазорів:

$$S_L = \omega^2 \mu_0 s_0 / 2 \delta^2$$

Тому індуктивні перетворювачі особливо чутливі при малих зазорах і реагують на зміну зазору близько 0,1-0,5 мкм. Діапазон вимірювань переміщень індуктивним перетворювачем із змінним зазором складає 0,01 - 2 мм.

Значно меншою чутливістю, але лінійною залежністю  $L = f(\delta)$  відрізняються перетворювачі із змінним перетином повітряного зазору (рис. 3.11, б). Їх використовують при переміщеннях якоря до 10 - 15 мм.



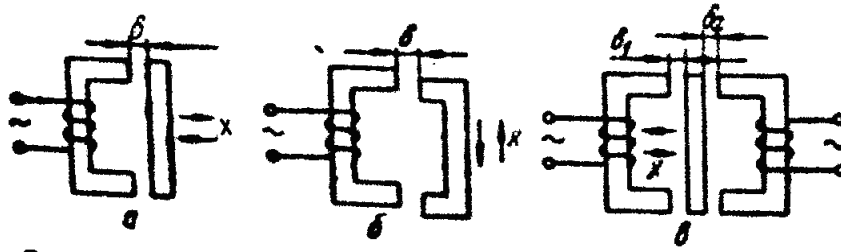


Рис. 3.11 Конструкції і вимірювальні ланцюги індуктивних перетворювачів:  
 а – із змінним зазором; б – із змінною площею; в – диференціального типу

Широко поширені індуктивні диференціальні перетворювачі (рис. 3.11, в), в яких під дією вимірюваної величини одночасно і притому з різними знаками змінюються два зазори двох електромагнітів. У поєднанні з відповідною схемою (зазвичай мостовою) диференціальні перетворювачі мають вищу чутливість, ніж звичайні, дають можливість зменшити нелінійність функції перетворення, менш чутливі до зовнішніх збурень.

Розглянуті індуктивні перетворювачі (рис. 3.11) - низькочастотні: їх робоча частота лежить в межах від десятків до сотень герц. Застосованість їх, не дивлячись на високу чутливість, часто обмежується великими габаритними розмірами і невисокою частотою власних коливань. Зручніші в цьому відношенні високочастотні індуктивні перетворювачі, принцип дії яких заснований на зміні індуктивності і добротності обмотки датчика при взаємодії її з провідними тілами або середовищами.

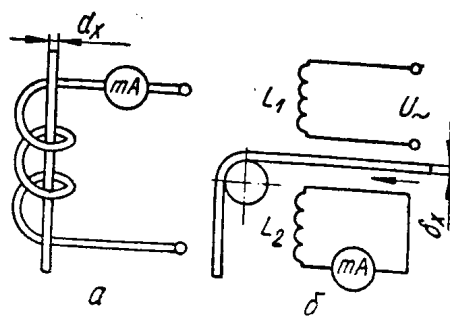


Рис. 3.12 Схеми високочастотних індуктивних перетворювачів:  
 а – для контролю діаметру дроту; б – для вимірювання товщини фольги

Типові випадки застосування високочастотних індуктивних перетворювачів показані на рис. 3.12. При збільшенні діаметру  $d_x$  дроту (рис. 3.12,а) зменшуються індуктивність і добротність обмотки датчика. Визначаючи індуктивність такої обмотки, можна контролювати діаметр дроту. Зі збільшенням товщини  $\delta$  фольги  $\delta_x$  (рис. 3.12, б) росте поле вихрових струмів, направлене проти поля збуджуючої обмотки  $L_1$ . В результаті збільшується екрануюча дія контрольованої фольги і е. р. с, яка індукована в сприймаючій обмотці  $L_2$ . Зміна цієї е. р. с. і служить показником зміни товщини фольги.

У трансформаторних перетворювачах (рис. 3.13) використовують зміну взаємної індуктивності обмоток перетворювача під впливом механічних переміщень феромагнітного сердечника. Як і у разі індуктивних перетворювачів, для компенсації значного початкового струму застосовують диференціальні трансформатори, у яких вторинні обмотки  $\omega_2'$  і  $\omega_2''$  включені зустрічно (рис. 3.13, друга і третя схеми).

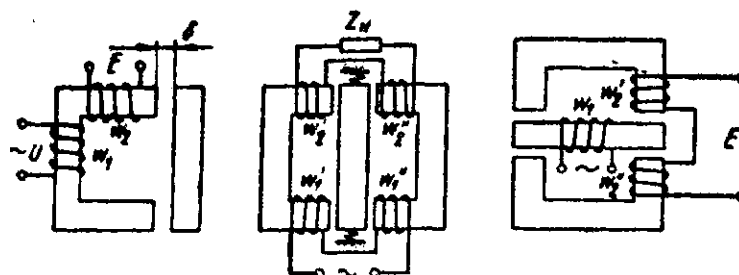


Рис. 3.13 Конструкції і вимірювальні ланцюги трансформаторних перетворювачів

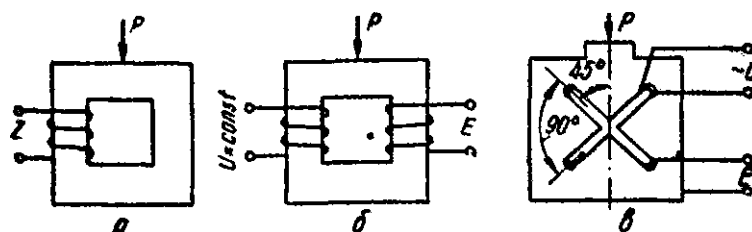


Рис. 3.14 Схеми магнітопружних перетворювачів:  
а - дросельного; б, в - трансформаторного типів

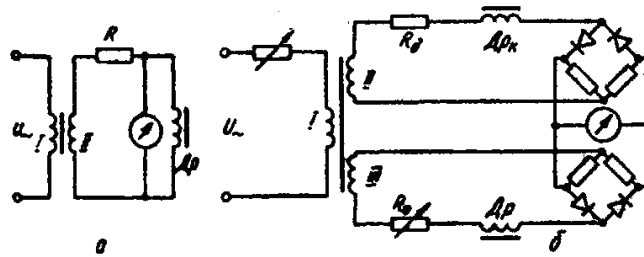


Рис. 3.15 Вимірювальні ланцюги магнітопружних дросельних перетворювачів: а - послідовна; б - компенсаційна

Недолік індуктивних і трансформаторних перетворювачів - важко регулювати і компенсувати початкову напругу на виході перетворювача. Крім того, для зменшення перешкод обидва типи перетворювачів потребують ретельного екранування, що збільшує їх габаритні розміри і масу.

Робота *магнітопружних перетворювачів* заснована а зміні магнітних властивостей при дії на них механічних сил. Одночасна зміна магнітної проникності, що відбувається під впливом навантаження, і лінійних розмірів сердечника можна використовувати для вимірювання деформацій. При цьому відносну чутливість магнітопружних перетворювачів до деформації можна охарактеризувати (подібно тензорезисторам) *коефіцієнтом тензочутливості*:

$$S = (\Delta\mu/\mu) / (\Delta l/l) = \varepsilon_\mu / \varepsilon_l. \quad (3.20)$$

При вимірюванні сил і механічної напруги коефіцієнт чутливості:

$$S = \varepsilon_\mu / \sigma \quad (3.21)$$

Магнітопружні перетворювачі можна розділити на дросельні (рис. 3.14, а) і трансформаторні (рис. 3.14, б, в).

У перетворювачах дросельного типу зміна магнітної проникності сердечника приводить до зміни повного електричного опору  $Z$  котушки дроселя. При невеликому поверхневому ефекті відносну зміну опору перетворювача, нехтуючи активним опором котушки, можна прийняти рівною  $\Delta Z/Z = \Delta\mu/\mu$ . Тоді чутливість перетворювача:

$$S_{\sigma} = \Delta Z / Z_{\sigma}. \quad (3.22)$$

Вимірювальний ланцюг перетворювача дросельного типу в простому випадку (рис. 3.15, а) складається з послідовно включених постійного резистора  $R$  і дроселя-перетворювача  $Dp$ , паралельно якому включений індикатор. Недолік цієї схеми - наявність великої початкової напруги  $U_0$  що звужує динамічний діапазон і роздільну здатність вимірника. Тому замість такої схеми зазвичай застосовують диференціальну - з компенсацією початкової напруги (рис. 3.15, б). Перетворювачі дросельного типу прості, мають задовільну лінійність в робочому діапазоні і реальні амплітудні погрішності близько 2 - 5%.

Чутливість трансформаторного перетворювача (у припущенні, що  $\Delta U_2 / U_2 = \Delta \mu / \mu$ ) можна з урахуванням (3.21) виразити співвідношенням:

$$S = \Delta U / U_{\sigma}. \quad (3.23)$$

Датчики з подібними перетворювачами мають чутливість до декількох мілівольт на 1 Н. Основна їх похибка при правильному виборі матеріалу і конструкції магнітопровода не перевищує 0,5%. Проте температурна похибок велика і складає 1,5 - 2% на 10°C. Іншим джерелом похибок є гістерезис. При статичних навантаженнях похибка за рахунок гістерезису сягає 4%, зменшуючись при динамічних навантаженнях до 1 %.

### 3.4. Перетворювачі Хола

Ефект Хола - гальваномагнітне явище, широко використовуване у вимірювальній практиці. Воно полягає в тому, що в точках 2, 2' пластини (рис. 3.16, а), поміщеної в магнітне поле з індукцією  $B$ , виникає різниця потенціалів  $U_H$  якщо через неї протікає струм  $I$ . Е. р. с. Хола  $U_{2,0} B$  між крапками 2,2' у відсутності навантаження:

$$U_{2,0} = k R_x I_1 B / a = \gamma I_1 B, \quad (3.24)$$

де  $I_1$  - струм, що протікає уздовж пластини, А;  $K$  - коефіцієнт, залежний від розмірів пластини і електродів, зокрема від співвідношення  $b/a$  і  $h/l$  ( $h$  - ширина «холовських» електродів);  $a$  - товщина пластини, м;  $R_x$  - постійна Хола є характеристикою напівпровідникового матеріалу, м<sup>3</sup>/А;  $B$  - індукція магнітного поля, Тл;  $\gamma$  - чутливість.

При навантаженні датчика Хола кінцевий опір напруги на електродах зменшується:

$$U_2 = \gamma I_1 B / (1 + R_{\text{вих}}/R), \quad (3.25)$$

де  $R_{\text{вих}}$  - вихідний опір датчика (опір між «холовськими» електродами у відсутності магнітного поля). Вхідним опором  $R_{\text{вх}}$  датчика Хола є опір між струмовими електродами 1,1' перетворювача.

Разом з чутливістю  $\gamma$ , вхідним і вихідним опорами до характеристик перетворювача відносяться номінальне значення керуючого струму і напруга нееквівалентності. За номінальне значення керуючого струму приймають струм, при якому відбувається помітна зміна характеристики  $U_{2,0} = f(I_1)$  при максимальній величині магнітної індукції і відсутності тепловідводу. Поліпшивши тепловідвід, можна істотно збільшити керуючий струм, а з ним і вихідний сигнал, поки не перевищиться допустима для елемента температура.

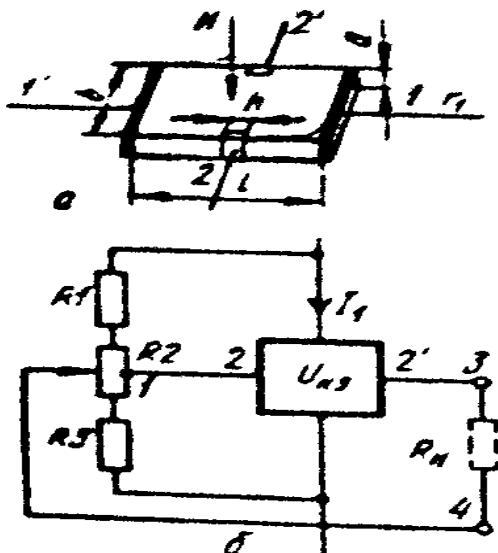


Рис. 3.16 Пристрій (а) і схема компенсації нееквівалентності (б)  
перетворювача Хола

Напруга нееквівалентності (залишкова напруга) – це напруга; яке виникає на "головських" електродах відносно прямої, перпендикулярної до ліній керуючого струму, внаслідок чого електроди не виявляються на еквіпотенціальній лінії. Необхідно відмітити, що напруга нееквівалентності стає перешкодою для основного сигналу і тому має бути зменшена або підбором елементів, або схемним шляхом.

Одна з поширених схем компенсації залишкової напруги приведена на рис. 3.16, б. У схемі опору резисторів  $R1$  і  $R3$  в декілька сотень разів перевершує вхідний опір перетворювача, а опір резистора  $R2$  (з відведенням від середню) - такого ж порядку, що і вихідний опір. Крім того, опір резистора  $R3$  беруть на 20 - 25% більшим, компенсуючи напругу нееквівалентності. Настроюючи схему, між точками 1 і 2 включають чутливий індикатор струму і за допомогою резистора  $R3$  врівноважують їх потенціали. Потім переміщенням повзуна резистора  $R2$  добиваються відсутності залишкової напруги між точками 3 і 4.

Датчики з перетворювачами Хола все частіше застосовують для вимірювання механічних величин, зокрема кутів повороту, лінійних переміщень і коливань. Якщо перетворювач переміщається в неоднорідному магнітному полі, то напруга Хола залежить від величини зсуву. Отже, доцільно застосовувати такі магнітні системи, при яких ця залежність лінійна. На рис. 3.17 представлено три магнітні системи, в яких перетворювач Холу переміщається у напрямі  $x$ : у першій схемі він висувається із зазору магніта (рис. 3.17, а), в другій - переміщається в зазорі між феритовими магнітами, оберненими однойменними полюсами один до одного (рис. 3.17, б), в третій - висувається з-під полюса S до полюса N магнітної системи або навпаки (рис. 3.17, в).

Окрім безпосереднього вимірювання механічних величин, перетворювачі Хола широко застосовуються для цілеспрямованої переробки електричних сигналів, отриманих від інших датчиків. Так, за допомогою перетворювачів Хола можна проводити складання і віднімання, множення і ділення, піднесення до ступеня і витягання кореня і ряд інших математичних операцій з електричними величинами.

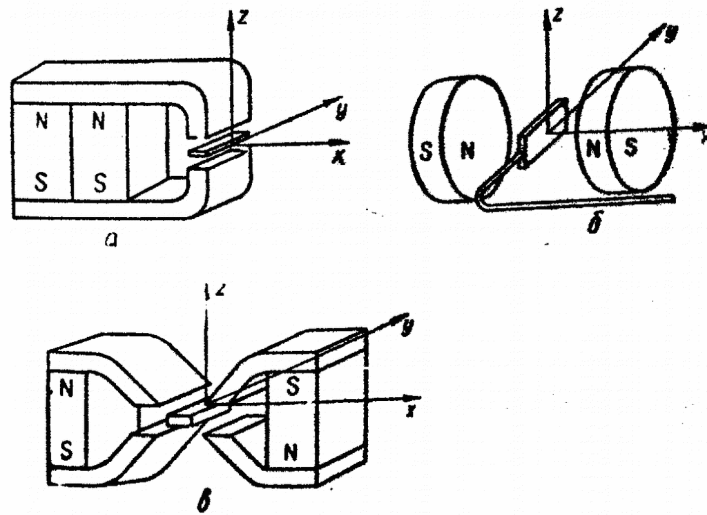


Рис. 3.17 Схеми (а, б, в) перетворювачів механічних переміщень і коливань, що працюють на ефекті Холу

### 3.5. Індукційні перетворювачі

Переходячи до розгляду генераторних перетворювачів, нагадаємо, що до перетворювачів генераторного типу відносяться пристрої, що забезпечують безпосереднє перетворення вимірюваної неелектричної величини в пропорційні значення струму або напруги без застосування зовнішніх джерел живлення. Це індукційні, п'єзоелектричні, термоелектричні (термопари) і деякі фотоелектричні перетворювачі.

Для перетворення механічних переміщень в електричний сигнал в індукційних перетворювачах використовується явище електромагнітної індукції - наведення  $\mathcal{E}$  в електричному контурі, що викликається зміною магнітного потоку:

$$\mathcal{E} = -\omega d\Phi/dt, \quad (3.26)$$

де  $e$  - миттєве значення е. р. с;  $\omega$  - число витків котушки;  $\Phi$  - магнітний потік.

Із співвідношення видно, що е. р. с., яка наводиться залежить не від абсолютного значення магнітного потоку, а від швидкості його зміни. У зв'язку з цим індукційні перетворювачі безпосередньо можна застосовувати тільки для вимірювання швидкості переміщення. Для визначення переміщень і прискорень в контур вводять відповідно інтегруючий або диференціюючий ланцюг.

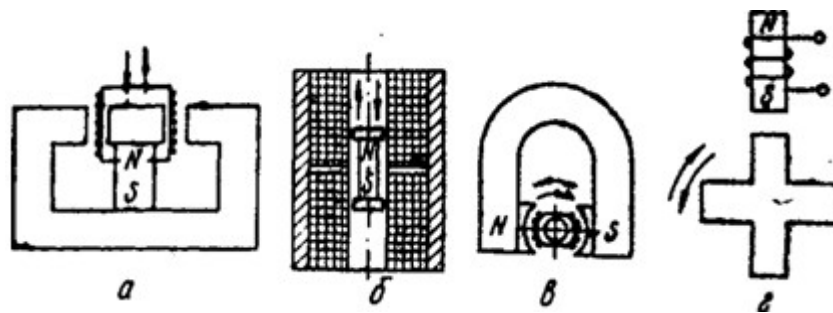


Рис. 3.18 Схеми пристрою індукційних перетворювачів для вимірювання швидкості: *a, б* – поступального переміщення; *в, з* – обертання

Першу достатньо поширену групу індукційних перетворювачів складають перетворювачі, в яких зміна магнітного потоку, що зчіплюється з витками котушки, здійснюється або переміщенням її в магнітному полі постійного магніта, або переміщенням постійного магніта щодо нерухомої котушки. Ця група перетворювачів є, по суті справи, генераторами, е. р. с. яких пропорційна швидкості лінійних (рис. 3.18, *a*) або кутових (рис. 3.18, *в*) переміщень котушки в постійному магнітному полі або швидкості переміщення магнітного поля щодо витків котушки (рис. 3.18, *б*).

Другу групу утворюють перетворювачі, в яких зміна магнітного потоку створюється зміною магнітного опору. Такий перетворювач можна отримати, наприклад, подаючи на обмотку збудження трансформаторного перетворювача постійний струм (обмотка підмагнічування). Тоді е. р. с, що наводиться у вторинній обмотці, буде пропорційна швидкості зміни



магнітного опору. У тих випадках, коли величина е. р. с., що наводиться не є параметром, що несе інформацію, можна використовувати повністю розімкнені магнітні ланцюги. Прикладом може служити перетворювач (рис. 3.18, з), вихідним параметром якого є частота е. р. с, що наводиться.

Е. р. с. перетворювачів з рухомою котушкою залежить від індукції  $B$  в повітряному зазорі, довжини  $l$  витка, числа  $\omega$  витків і швидкості  $V$  переміщення:

$$e = Bl\omega V, \quad (3.27)$$

а е. р. с. перетворювачів із змінним магнітним опором:

$$e = \omega F V_G, \quad (3.28)$$

де  $V_G$  - швидкість зміни магнітній провідності;  $F$ - м. р. с. (магніторушійна сила).

З виразів (3.27) і (3.28) видно, що чутливість, перетворювачів залежить від величин  $B$  і  $F$ , які визначаються параметрами постійного магніта. Зазвичай прагнуть спроектувати магніт так, щоб енергія  $B_M H_M$  що доводиться на одиницю об'єму, була максимальною.

### 3.6. П'єзоелектричні перетворювачі

Робота п'єзоелектричних перетворювачів заснована на використанні п'єзоелектричного ефекту. Він проявляється в здатності деяких матеріалів утворювати при механічному навантаженні електричні заряди. Кількісно п'єзоефект оцінюється пьезомодулем  $d$ , що встановлює пропорційність між виникаючим зарядом  $Q$  і прикладеною силою  $P$ :

$$Q = dP. \quad (3.29)$$

Найважливіші природні матеріали, що володіють п'єзоелектричними властивостями, - кварц і турмалін; з штучних сегнетоелектриків застосовують титанат барія, сегнетову сіль, дегідрофосфат амонія і ін.

Найчастіше для вимірювальних цілей використовують кварц, кристал якого є шестигранною призмою, увінчаною з обох кінців шестигранними

пірамідами. Вісь, що проходить через вершини пірамід, називають оптичною віссю  $z$ , вісь  $x$ , що проходить через ребра призми перпендикулярно до оптичної осі, називають електричної, а вісь  $y$ , нормальну до граней призми, - механічною.

Якщо вирізувати з кристала пластинку в плоскості  $ux$ , то при дії сили  $P_x$  по напрямку електричній осі на її гранях виникнуть електричні заряди:

$$Q = d_{11} P_x, \quad (3.30)$$

де  $d_{11}$  - пьезомодуль, рівний для кварцу  $2,3 \cdot 10^{-12}$  Кл/н. Якщо ж пластину піддати стискуванню у напрямі осі  $y$ , то на тих же гранях виникнуть заряди, але вже протилежного знаку:

$$Q = -d_{11} P_y b/a. \quad (3.31)$$

При цьому значення заряду залежить від співвідношення розмірів пластинки  $b/a$ .

Для збільшення заряду перетворювач набирають з декількох ( $n$ ) пластин, які механічно сполучають послідовно, а електрично - паралельно (рис. 3.19). В цьому випадку сумарний заряд:

$$Q_n = nQ. \quad (3.12)$$

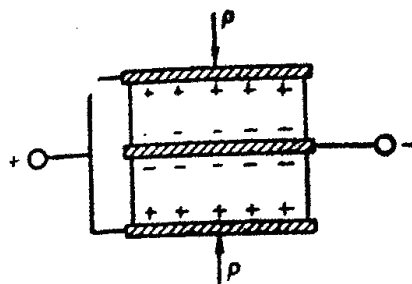


Рис. 3.19 Схема п'єзоелектричного перетворювача, що працює на стискуванні

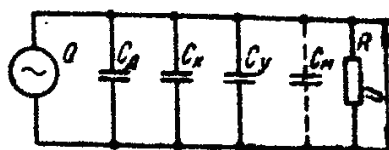


Рис. 3.20 Еквівалентна схема включення п'єзоелектричного перетворювача

Разом з перетворювачами, що працюють на стискування (рис. 3.19), поширені конструкції, у яких п'єзоелемент працює на вигин і на зрушення.

При механічній дії на п'єзокристал на його електродах повинна виникати напруга:

$$U=Q/C_{\partial}, \quad (3.32)$$

де  $C_{\partial}$  - ємкість конденсатора, що утворюється гранями пластини.

У реальних умовах п'єзоелектричний перетворювач завжди виявляється зашунтованим деякою ємкістю  $C_0$  і опором  $R$ . Ємкість:

$$C_0=C_{\partial}+C_k+C_y+C_m, \quad (3.33)$$

де  $C_{\partial}$ ,  $C_k$ ,  $C_y$ ,  $C_m$  - ємкість самого перетворювача, сполучного кабелю, вхідна підсилювача і масштабна, або підстроювальна, відповідно.

Тому еквівалентна електрична схема включення з урахуванням опору витоку матиме вигляд, показаний на рис. 3.20.

Через шунтуючу дію  $R$  напруга на перетворювачі навіть при  $P_x = const$  змінюється згідно із законом:

$$U=dP_x[1-\exp(-t/RC_0)]/C_0, \quad (3.34)$$

де  $t$  - час.

У зв'язку з цим п'єзоелектричні перетворювачі не можна застосовувати для вимірювання сил і тиску, що мають постійну складову, оскільки неминучий витік зарядів з п'єзопластин приводять до того, що напруга не визначається тільки змінною складової силового параметра, що вимірюється. Неточно відтворюються і низькочастотні складові вимірюваної величини.

### 3.7. Термоелектричні генераторні перетворювачі

Термоелектричні перетворювачі (термопари) побудовані на основі виникнення е. р. с. в замкнутому ланцюзі двох різних за матеріалом провідників при нагріванні однієї з точок їх з'єднання. Отримувана термо-е.

р. с. є функцією різниці температур  $t_1^0$  і  $t_2^0$  точок з'єднання провідників  $A$  і  $B$  (рис. 3.21, *a*). Про значення термо-е. р. с. можна судити за показами індикаторного приладу (ІП), включеного в розрив провідника  $B$  (рис. 3.21, *a*) або в спай ланцюга (рис. 3.21, *б*), що не нагрівається. Спай, що не нагрівається, прийнято називати *холодним* на відміну від *гарячого*, такого, що безпосередньо знаходиться під дією вимірюваної температури. Подібний термоелектричний ланцюг з двох різних провідників називається *термопарою*.

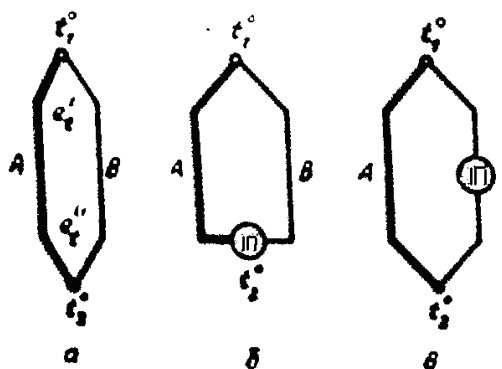


Рис. 3.21 Термоелектричний ланцюг (*a*) і схеми включення індикаторного приладу (*б*, *в*)

Висока точність вимірювання температури  $t_1^0$  за допомогою термопари можлива лише при достатньо точній фіксації температури холодного спаю. Для цього холодні спаї температур поміщають в судину Д'юара з танучим льодом або в якій-небудь інший термостат.

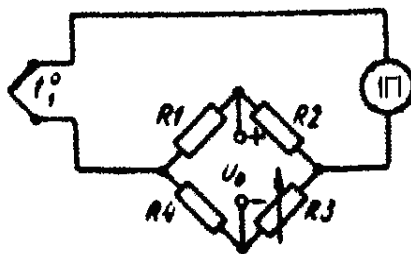


Рис. 3.22 Схема автоматичної корекції впливу нестабільності температури холодного спаю термопари

Вплив нестабільності температур холодного спаю можна усунути, застосувавши схему з автоматичною корекцією (рис. 3.22). Термопара та ІП включені у вимірювальну діагональ омичного моста, що живиться постійною

напругою  $U_0$ . Резистори  $R1$ ,  $R2$  і  $R3$  моста виготовлені з манганіну, а  $R4$  - з міді або нікелю. Схема моста розміщена в безпосередній близькості від холодного спаю. При початковій температурі  $t_2^0$  міст балансируется за допомогою змінного резистора  $R3$ . Якщо в процесі вимірювання температура  $t_2^0$  холодного спаю підвищиться, то зростає і значення  $R4$ , а виникаюча на вимірювальній діагоналі напруга компенсуватиме зменшення е. р. с. термопари.

Дані про значення термо-е. р. с, що розвиваються термопарами з різних металів і сплавів, є в літературі.

### 3.8. Фотоелектричні генераторні перетворювачі

Фотоелектричні перетворювачі успішно використовуються при вимірюванні світлового потоку, інтенсивність якого визначається значенням тієї або іншої фізичної величини (кольору, прозорості і т. п.). Для цього застосовують фотоелементи із зовнішнім і внутрішнім фоторезисторним фотоефектом, а також вентильні фотоелементи. Останні є перетворювачами генераторного типу, тобто вимірника струму підключають безпосередньо до затисків такого фотоелемента.

Розглянемо чотири основні групи використання фотоелементів у вимірювальній техніці. У першій (рис. 3.23, а) світловий потік  $\Phi_x$  сприймаємий і перетворюваний фотоелементом  $\Phi E$ , створюється самим випромінюючим об'єктом  $O$ .

Приклад подібного використання фотоелемента - фотоелектричний пірометр, вживаний для вимірювання температури нагріву металу.

У другій групі (рис. 3.23, б) початковий світловий потік  $\Phi_0 = const$  створюється зовнішнім освітлювачем  $L$ , але на його шляху поміщають діафрагму або непрозору деталь  $D$ , розмір якої контролюється або вимірюється. Таким чином, потік, що поступає у фотоелемент  $\Phi_x$

утворюється за рахунок модуляції потоку  $\Phi_0$  зміною положення діафрагми або розміру контрольованої деталі.

У третій групі (рис. 3.23, в) також застосовують зовнішній освітлювач  $L$ , що створює світловий потік  $\Phi_0$  але він направлений на поверхню  $\Pi$  об'єкту. На фотоелемент потрапляє тільки відбитий потік  $\Phi_x \neq \Phi_0$ . В цьому випадку світловий потік  $\Phi_x$  може бути функцією стану поверхні - її шорсткості, кольору, прозорості (рис. 3.23, з).

Особливість пристроїв четвертої групи (рис. 3.23, д) полягає в тому, що носієм корисної інформації в них виступає не інтенсивність світлового потоку, а частота його зміни. На такому принципі працюють, наприклад, фототахометри, призначені для вимірювання числа оборотів валу  $B$ , на торці якого розташовано дзеркало  $3$ .

Очевидно, що в цьому останньому випадку вимоги до стабільності характеристик фотоелемента можуть бути знижені.

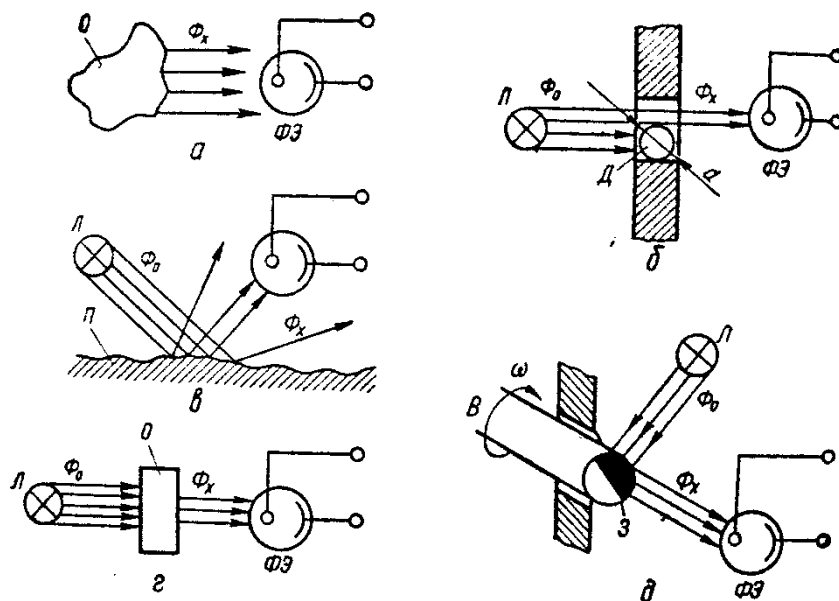


Рис. 3.23 Схеми використання фотоелементів для вимірювання неелектричних величин: *а* - випромінює об'єкт; *б* - модуляцією потоку; *в*, *г* - вимірювання відбитого (ослабленого) потоку; *д* - вимірювання частоти зміни потоку

