

**О.В. Суранов, В.О. Стефанов, +О.О. Суранов**

**ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ,  
ДОРОЖНІХ І ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ  
МАШИН**

**Частина I**

**Вимірювальні перетворювачі**

***НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК***

**Харків 2011**



**УКРАЇНЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**О.В. Суранов, В.О. Стефанов, О.О. Суранов**

**ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ,  
ДОРОЖНИХ І ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ  
МАШИН**

**Частина I**

**Вимірювальні перетворювачі**

***НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК***

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів вищих  
навчальних закладів*

**Харків 2011**

Суранов О.В., Стефанов В.О., Суранов О.О. Основи автоматизації будівельних, дорожніх і вантажно-розвантажувальних машин. Ч.1. Вимірювальні перетворювачі: Навчальний посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 146 с.

У навчальному посібнику розглянуто основи теорії, технічні засоби, схеми, конструкції систем автоматичного контролю, захисту, керування й регулювання пристроїв, устаткування, машин і промислових процесів підйомно-транспортних будівельних, дорожніх, меліоративних машин.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 7.090214 “Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і устаткування” всіх форм і строків навчання.

Іл. 78. табл. 12, бібліогр.: 28 назв.

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів вищих  
навчальних закладів  
(№ 1/11-11239 від 09.12.10 р.).*

Рецензенти:

В.П. Авраменко, доктор технічних наук, професор  
(Харківський національний університет  
радіоелектроніки ),

П.М. Гладкий, завідувач кафедри «Гідропневмоавтоматика  
і гідропривод», професор (Національний технічний  
університет «ХПІ»)

**ISBN 978-966-2033-44-1**

© Українська державна академія  
залізничного транспорту,  
2011.

О.В. Суранов, В.О. Стефанов, О.О. Суранов

**ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ,  
ДОРОЖНІХ І ВАНТАЖНО-РОЗВАНТАЖУВАЛЬНИХ  
МАШИН**

Частина I  
Вимірювальні перетворювачі

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

Відповідальний за випуск Суранов О.В.

Редактор Решетилова В.В.

---

Підписано до друку 04.12.09 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 5,5. Обл.-вид.арк. 5,75.

Замовлення № Тираж 300. Ціна

---

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.  
Друкарня УкрДАЗТу,  
61050, Харків - 50, майдан Фейєрбаха, 7

**Міністерство транспорту та зв'язку України  
Українська державна академія залізничного  
транспорту**

**Кафедра "Будівельні, колійні та вантажно-  
розвантажувальні машини"**

О.В. Суранов, А.О. Бабенко, В.О. Стефанов, О.О.  
Суранов

**«Основи автоматизації будівельних, дорожніх і  
вантажно-розвантажувальних машин»  
Частина I Вимірювальні перетворювачі  
НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

для студентів спеціальності 7.090214  
“Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні  
машини і устаткування”  
всіх форм і строків навчання

Харків 2010

Суранов О.В., А.О. Бабенко, Стефанов В.О., Суранов О.О. Основи автоматизації будівельних, дорожніх і вантажно-розвантажувальних машин. Вимірювальні перетворювачі:

Навчальний посібник.- Харків: УкрДАЗТ,2010.- Ч.1-139с.

У навчальному посібнику розглянуто основи теорії, технічні засоби, схеми, конструкції систем автоматичного контролю, захисту, керування й регулювання пристроїв, устаткування, машин і промислових процесів підйомно-транспортних будівельних, дорожніх, меліоративних машин.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 7.090214 “Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і устаткування” всіх форм і строків навчання.

Іл. 78. табл. 12, бібліогр.: 27 назв.

Рецензенти:

д.т.н., професор кафедри ИУС Харківського національного університету радіоелектроніки  
В.П. Авраменко,

завідувач кафедри «Гідропневмоавтоматика і гідропривод»

Національного технічного університету «ХПІ»,  
професор П.М. Гладкий

Українська державна  
академія залізничного  
транспорту, 2010

## ЗМІСТ

Вступ .....	5
1. Роль автоматизації в будівництві й дорожньому господарстві .....	7
1.1. Основні поняття й положення .....	7
1.2. Короткий історичний огляд розвитку автоматики .....	10
1.3. Автоматизація та роботизація – основні фактори підвищення продуктивності праці .....	22
1.4. Соціальна сутність НТР .....	23
2. Структура й елементний склад систем автоматичного регулювання, керування та контролю машин .....	24
2.1. Загальна структурна модель систем автоматичного керування будівельних та дорожніх машин .....	28
2.1.1. Зворотний зв'язок в системах автоматики ...	30
2.1.2. Коефіцієнт перетворення при з'єднанні із зворотним зв'язком .....	31
2.2. Вимірювальні перетворювачі .....	33
2.2.1. Характеристики вимірювальних перетворювачів .....	34
2.2.2. Основні методи вимірювань та вимірювальні схеми .....	43
2.2.3. Потенціометричні вимірювальні перетворювачі .....	48
2.2.4. Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі .....	59
2.2.5. Пружинні вимірювальні перетворювачі тиску .....	86
2.2.6. Ємнісні вимірювальні перетворювачі .....	92
2.2.7. Електромагнітні вимірювальні перетворювачі .....	101

2.2.8. П'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі .....	125
2.2.9. Вимірювальні перетворювачі температури	131
Бібліографічний список .....	143
Додаток .....	145



## ВСТУП

Серед систем автоматизації будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин (БКВРМ) останнім часом найбільшого розповсюдження набули такі комплекти приладів:

- засоби автоматизації висотної та кутової стабілізації робочих органів будівельних та дорожніх машин (БШМ): "Профіль-10", "Профіль-20", "Профіль-30", СМІ (США), РАНСО (ФРН), LASERPLANE (США) [1];

- засоби автоматизації скреперів: "Копір-Стабілоплан-10", "Стабілослой-10";

- засоби автоматизації бульдозерів: "Копір-Автоплан-10", "Комбіплан-10";

- засоби автоматизації машин для швидкісного будівництва шляхів ТДС-110 типу "Профіломат 1-7";

- комплекси лазерної апаратури: "СКП-1", "САУЛ-1", "УКЛ 1-4", "Дорога";

- засоби автоматизації будівельних кранів: обмежувачі навантаження кранів типу ОГБ-2, ОГК, ОНК-М, ОГМ, ОГБ-3, ОГМТ, ОНК-11, АЗК-1 та ін.

Метою створення даного посібника є вивчення основ автоматизації БШМ.

У структурно-логічній схемі послідовності вивчення дисциплін з метою формування якісного фахівця за спеціальністю 7.090214 "Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини й устаткування" і за спеціалізаціями: "Керування експлуатацією й ремонтом будівельних, дорожніх і перевантажувальних машин для залізниць"; "Протипожежна й відновлювальна техніка залізниць" дисципліні "Основи автоматизації будівельних,

дорожніх і вантажно-розвантажувальних машин" передують цикл фундаментальних і загально-інженерних дисциплін, а також цикл професійно-орієнтованих дисциплін: "Обчислювальна техніка й програмування", "Електротехніка, електроніка і електроприводи машин", "Теоретичні основи створення машин", "Автомобілі й трактори", "Основи менеджменту й маркетингу", "Гідравліка, гідроприводи й гідравлічні машини" та ін.

Курс базується на знаннях, отриманих при вивченні фізики, хімії, вищої математики, інженерної графіки, матеріалознавства, опору матеріалів, будівельної механіки, електротехніки, обчислювальної техніки й програмування, математичного моделювання, загального курсу залізниць.

Ряд розділів і питань курсу виноситься на самостійне вивчення під керівництвом і контролем викладача.

Курс завершується виробничо-технологічною практикою, метою якої є набуття навичок роботи у виробничих колективах і практичне закріплення знань, отриманих під час вивчення курсу.

Метою викладання навчальної дисципліни є підготовка фахівців, які володіють професійними знаннями й навичками проектування, впровадження й експлуатації систем автоматичного керування будівельних, дорожніх і вантажно-розвантажувальних машин та устаткування на основі вивчення теорії автоматичного керування, принципу дії, конструктивних особливостей і галузі застосування пристроїв автоматики, методів їхнього будівництва, експлуатації й ремонту.

# 1. РОЛЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ В БУДІВНИЦТВІ Й ДОРОЖНЬОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Сучасні масштаби виробництва й параметри технологічних процесів можуть бути реалізовані тільки за допомогою систем автоматичного керування (САК) будівельних, колійних і вантажно-розвантажувальних машин (БКВРМ), а також автоматичних пристроїв та ЕОМ. Для реалізації схем автоматичного керування використовують різні пристрої.

## 1.1. Основні поняття й положення

Пристрій, агрегат, машина або будь-яка система називаються автоматичними, якщо вони виконують свої основні функції без особистої участі людини. У зв'язку з розвитком автоматичних систем виникла нова галузь науки – автоматика.

*Автоматика* – це прикладна галузь науки, що вивчає принципи побудови, технічні засоби і методи розрахунків автоматичних систем контролю та керування виробничими процесами.

Будь-який виробничий процес спрямований на створення засобів виробництва та предметів споживання. Він являє собою координований вплив енергії на різноманітні речовини для одержання заданої продукції.

*Механізація* – це заміна ручної роботи людини машинами і механізмами. При комплексній механізації замінюється ручна робота при виконанні як основних операцій (часткова механізація), так і допоміжних операцій (мала механізація).

*Автоматизація* – це заміна роботи людини приладами для оперативного керування виробничими процесами або механізмами. При комплексній автоматизації виконуються автоматично не тільки окремі ланки технологічних ліній (часткова автоматизація), але й технологічні процеси в цілому, тобто від одержання сировини до виходу готової продукції.

У залежності від функцій, які виконуються, системи автоматики розподіляють на такі види: автоматичний контроль, захист, керування та регулювання.

*Автоматичний контроль* – перевірка одного або іншого робочого процесу (включаючи процеси керування) і оцінка його якісних та кількісних показників. Автоматичний контроль здійснюється з метою виміру, сигналізації і обліку.

*Автоматичний захист* – це процес автоматичного попередження аварійних відхилень у технологічному процесі та забезпечення збереження устаткування і безпечних умов роботи.

*Автоматичне керування* – це процес автоматичної зміни стану елементів об'єкта за заданою програмою в залежності від часу.

*Автоматичне регулювання* – це процес автоматичної підтримки якого-небудь параметра на заданому рівні. При цьому задане значення може змінюватися за яким-небудь законом або бути постійним.

*Телемеханіка* – це галузь науки й техніки, що вивчає і створює пристрої для контролю та керування на відстані по різних дротових або бездротових каналах зв'язку.

*Кібернетика* – це наука, що вивчає закономірності процесів керування в природі, суспільстві та техніці на основі одержання, перероблення і використання інформації.

*Інформація* – це будь-яка сукупність відомостей про події, об'єкти або явища. З позицій автоматики інформація являє собою сукупність необхідних відомостей, які використовуються для активного впливу на систему керування. Дані про об'єкт стають інформацією тоді, коли набувають змісту і форми придатних для використання в процесі керування.

*Система керування* – це сукупність об'єкта і елементів керування.

*Контур керування* – це замкнутий потік інформації.

*Алгоритм керування* – це сукупність математичних операцій, які виконуються для досягнення мети керування. При цьому кожній елементарній операції відповідає частка системи, що її реалізує – елементарна ланка.

*Автоматичне керування* – це процес, у якому всі операції керування виконуються без участі людини, а сама система називається автоматичною.

*Напівавтоматичне керування* – це процес, у якому для виконання деяких операцій у системі керування необхідна участь людини, а сама система називається автоматизованою.

У схемах, які далі будуть розглянуті, використовуються графічні та буквено-цифрові позначення, які відображають вид пристроїв, їхнє підключення, напрямок і вид струму та інші дані. Найпоширеніші коди елементів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Коди елементів

№ п/п	Перша буква коду	Назва групи елементів
1	2	3
1	A	Пристрій
2	B	Перетворювачі неелектричних величин в електричні
3	C	Конденсатори
4	D	Інтегральні схеми, мікросхеми
5	E	Елементи різні
6	F	Розрядники, запобіжники, пристрої захисту
7	G	Генератори, джерела живлення
8	H	Пристрої індикації та сигнальні
9	K	Реле, контактори, пускачі
10	L	Котушки індуктивності, дроселі
11	M	Двигуни
12	P	Прилади, вимірювальне обладнання
13	Q	Вимикачі і роз'єднувачі в силових колах
14	R	Резистори
15	S	Прилади комутаційні в колах управління, сигналізації та вимірювання

Продовження табл. 1.1

1	2	3
16	T	Трансформатори, автотрансформатори
17	U	Перетворювачі електричних величин в електричні
18	V	Прилади електровакуумні та напівпровідникові
19	W	Лінії та елементи надвисоких частот, антени
20	X	З'єднання контактні
21	Y	Пристрої механічні з електромагнітним приводом
22	Z	Пристрої кінцеві, фільтри, обмежувачі

Перша буква характеризує групи елементів, друга та третя букви відображають вид елементів у даній групі.

Наприклад, буквою К позначаються реле, контактори, пускачі; двобуквене позначення: КА – реле струмове, КН – реле вказівне; трибуквене позначення: КСС – реле команди вмикання, КТС – реле команди вимкнення.

## 1.2. Короткий історичний огляд розвитку автоматики

Ідея створення автоматичних пристроїв виникла дуже давно. Поява перших автоматичних пристроїв переслідувала розважальну мету тому, що вони не могли конкурувати з дешевою працею рабів та кріпосних.

Перші автомати з'явилися у зв'язку з винаходом парових машин.

Один з перших в історії техніки автоматичних регуляторів був винайдений І.І. Ползуновим у 1765 р. Це був автоматичний регулятор рівня води в котлі парової машини (рис. 1.1). Тут повністю реалізований загальний принцип дії будь-якого автоматичного регулятора прямої дії [1, 8].

Вимірювальний пристрій 1 (поплавець), що вимірює регульовану величину  $H$  (висоту рівня води в казані), безпосередньо переміщає регульовальний орган 3 (клапан живлення бака водою). Бак 2 є регульованим об'єктом.

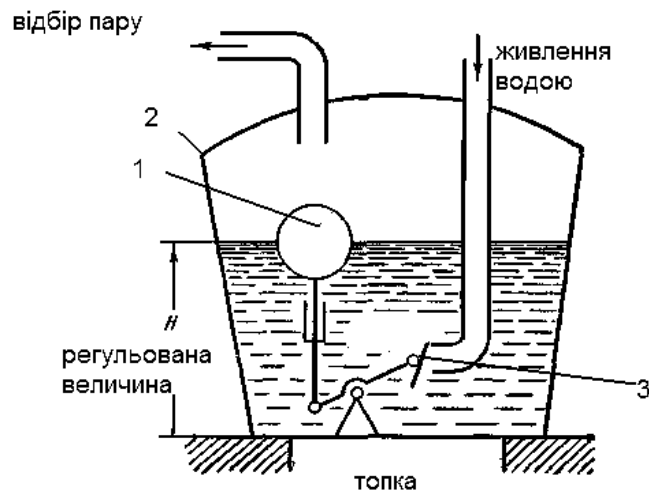


Рис. 1.1. Регулятор І.І. Ползунова

Зміна величини відбору пари бака в парову машину є основним впливом на регульований об'єкт, який відхиляє його від заданого положення. Якщо відбір пари збільшиться, випар води прискориться, рівень води  $H$  (регульована величина) почне зменшуватися. Тоді поплавець, опускаючись, буде ширше відкривати регулювальний клапан 3, підсилиться подача живильної води і її рівень буде автоматично відновлюватися. Крім зміни відбору пари, вплив на об'єкт буде проявлятися також у зміні умов теплового режиму роботи казана (інтенсивність топлення, температура живильної води та навколишнього простору). Регулятор у всіх випадках буде однаково діяти на знищення небажаного відхилення рівня води, з яких би причин воно не виникало.

Такий пристрій існує і в наш час, але у декілька зміненому вигляді.

На рис. 1.2, а - д показані розрахункова схема та конструкції поплавкових механізмів бензинових ДВЗ. У більшій частині карбюраторів застосовується поплавковий механізм із верхнім підведенням палива (рис. 1.2, б). Подібні поплавкові механізми в експлуатації надійніші, ніж конструкції з нижнім підведенням палива (рис. 1.2, в), у яких поплавкова камера часто переповняється при скупчуванні бруду в нижній її частині під запірною голкою. У поплавкових

камерах з горизонтальним розташуванням запірною клапана (рис. 1.2, а) останній також забруднюється й голка втрачає рухливість. У сучасних карбюраторах горизонтальне розташування запірною клапана застосовується рідко. Для зменшення впливу вібрацій і різких коливань двигуна на рівень палива передачу сили від важеля поплавця до голки іноді здійснюють через пружину (рис. 1.2, б). У мотоциклетних двигунах, де паливо в карбюратор подається самопливом і тиск його в паливопроводі невеликий, звичайно застосовують поплавець, який безпосередньо (без важеля) впливає на клапан (рис. 1.2, в). У мотоциклетних двигунах, де паливо в карбюратор подається самопливом і тиск його в паливопроводі невеликий, звичайно застосовують поплавець, який безпосередньо (без важеля) впливає на клапан (рис. 1.2, д).

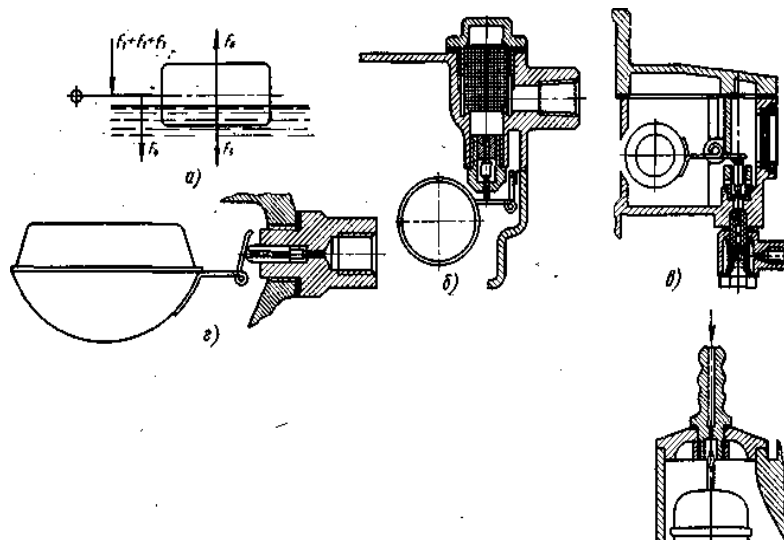


Рис. 1.2. Поплавкові регулятори рівня палива ДВЗ:  
 а – розрахункова схема; б – камера з верхнім підведенням палива; в – камера з нижнім підведенням палива; г – камера з горизонтальним підведенням палива; д – камера мотоциклетного карбюратора

Винахід Ползунова І.І. використовується на всіх без виключення сучасних машинах БКМ з бензиновими чотиритактними двигунами для регулювання рівня бензину у поплавковій камері карбюратора незалежно від умов навантаження на двигун.



Наступним в історії техніки автоматичним регулятором, що набув поширення, був відцентровий регулятор (ВТР) швидкості обертання вала парової машини, винайдений Джеймсом Уаттом у 1784 р. (рис. 1.3). Тут інша конструкція регулятора та інша природа величини (кутова швидкість  $\omega$ ), яка регулюється, але такий же загальний принцип дії – регулятор прямої дії. Вимірювальний пристрій регулятора (відцентровий механізм) реагує на зміну регульованої величини  $\omega$ . Так, якщо кутова швидкість вала  $\omega$  збільшується, то кульки відцентрового механізму розходяться, муфта піднімається і переміщає безпосередньо регулюючий орган (наприклад, заслінку в трубі живлення машини паром). Це змінює подачу енергії в машину, чим автоматично знищується небажане відхилення кутової швидкості. Основним зовнішнім впливом, що відхиляє регульований об'єкт від заданого стану, є зміна навантаження на валу парової машини. Якби не було регулятора, то при збільшенні навантаження кутова швидкість би зменшилася. Регулятор автоматично ліквідує це зменшення шляхом відповідного посилення подачі енергії в машину.

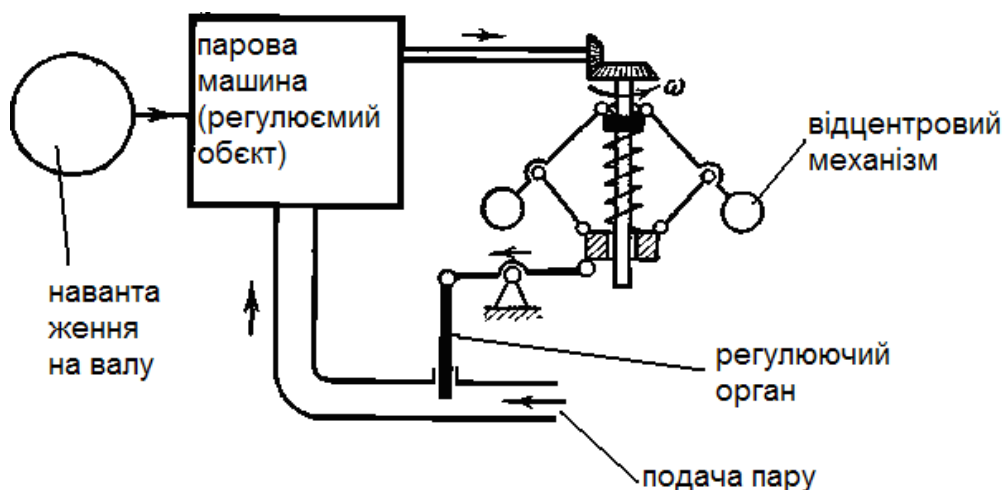


Рис. 1.3. Відцентровий регулятор Дж. Уатта

Такий пристрій існує і в наш час, але у декілька зміненому вигляді [7, 8]. Відцентрові регулятори зараз використовуються на всіх без винятку мобільних та деяких

стаціонарних машинах БКВРМ. Так, на машинах, які обладнані бензиновими двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ), відцентрові регулятори використовують в системах випередження запалювання.

Зі зміною умов і режиму роботи двигуна кут випередження запалювання повинен відповідно змінюватися. Це досягається переміщенням у той або інший бік переривника щодо кулачкової шайби або шайби щодо приводного валика, це викликає зміну моменту розмикання контактів переривника стосовно положення колінчастого вала у ВМТ.

Для здійснення регулювання випередження запалювання розподільники забезпечуються спеціальними пристосуваннями, які діють вручну або автоматично.

Для *ручного регулювання* випередження переривник разом з розподільником повертається звичайно за допомогою ручної тяги або важеля з місця водія. Для збільшення випередження запалювання корпус розподільника повертають у напрямку, протилежному напрямку обертання кулачка, для зменшення випередження запалювання – у зворотному напрямку.

*Автоматичне регулювання* випередження запалювання залежно від числа обертів двигуна регулюється *відцентровим регулятором*, а залежно від навантаження двигуна – *вакуумним регулятором*.

Обидва регулятори діють незалежно один від одного, і кут випередження, установлений у цей момент, залежить від сумісної дії відцентрового й вакуумного регуляторів.

**Відцентровий регулятор випередження запалювання** показаний на рис. 1.4, а, б, в. Із приводним валиком розподільника жорстко з'єднана пластина (підставка) регулятора, на якій установлені два тягарці. Тягарці вільно сидять на осях, закріплених у пластині. Дві пружини кріпляться одними кінцями до виступів тягарців, а іншими – до гачків пластини. За допомогою пружин тягарці притягаються до приводного валика розподільника.

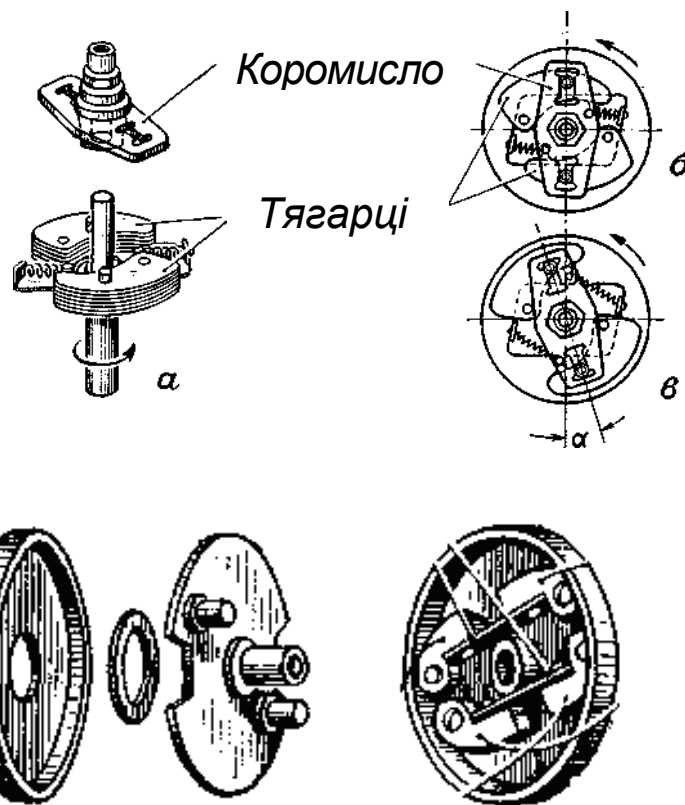


Рис. 1.4. Відцентрові регулятори випередження запалювання бензинових ДВЗ:

а, б, в – регулятори батарейного запалювання; г – відцентрова муфта випередження запалювання в приводі магнето

На верхній кінець валика надівається втулка з кулачковою шайбою і коромислом, що має два прорізи. У ці прорізи коромисла входять шпильки, укріплені на тягарцях. Обертання валика розподільника через підставку регулятора, тягарці та коромисло передається кулачковій шайбі. У міру збільшення числа обертів зростаюча відцентрова сила тягарців, переборюючи натяг пружин, розсовує тягарці. При цьому тягарці своїми шпильками повертають на деякий кут (у бік обертання валика) коромисло і разом з ним кулачкову шайбу. У силу цього виступи кулачкової шайби розмикають контакти переривника раніше, і в такий спосіб випередження запалювання встановлюється відповідно до числа обертів

двигуна. Зі зменшенням обертів пружини повертають тягарці до центра й випередження запалювання зменшується.

На рис. 1.5 показаний вакуумний автомат –коректор випередження запалювання бензинових ДВЗ. Він має металевий корпус, що складається із двох частин, між якими затиснута діафрагма. Під тиском пружини діафрагма вигинається у бік переривника. Верхня герметична порожнина корпусу над діафрагмою з'єднується трубкою з усмоктувальним трубопроводом двигуна. Нижня порожнина під діафрагмою сполучається з атмосферою. Діафрагма тягою з'єднується з рухомим диском переривника. Зі збільшенням навантаження, а отже, з відкриттям дросельної заслінки розрідження в усмоктувальному трубопроводі, що передається в порожнину над діафрагмою, зменшується, і під дією пружини діафрагма прогинається. Діафрагма, прогинаючись, повертає за допомогою тяги диск переривника у бік обертання кулачкової шайби, що зменшує випередження запалювання. У міру зменшення навантаження, тобто із прикриттям дросельної заслінки, розрідження над діафрагмою буде зростати й діафрагма, стискаючи пружину, буде повертати диск переривника у бік збільшення випередження запалювання.

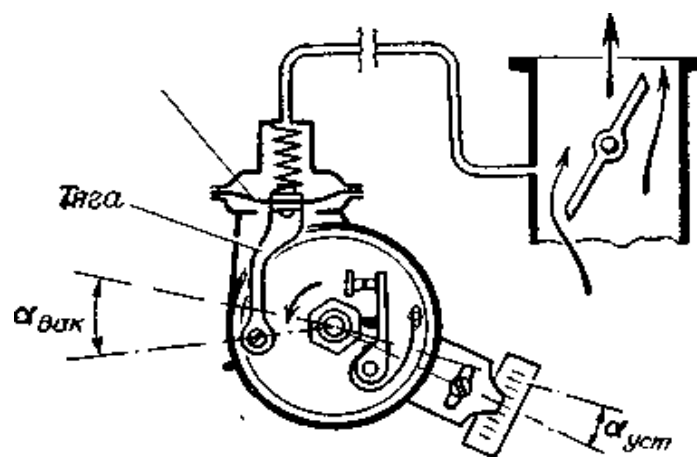


Рис. 1.5. Вакуумний автомат - коректор випередження запалювання бензинових ДВЗ

Результуючий кут випередження запалювання при наявності обох регуляторів складається не тільки із суми кутів випередження, установлюваних кожним регулятором, але залежить також від так названого встановлювального кута випередження запалювання, тобто від кута випередження, що відповідає установленню на двигуні самого корпуса розподільника, який фіксується стопорним гвинтом.

Відвернувши стопорний гвинт і змінюючи встановлювальний кут випередження в певних межах, можна збільшити або зменшити сумарний кут випередження й тим самим урахувати октанове число застосовуваного сорту бензину. Встановлювальний кут доводиться змінювати при переході з одного сорту пального на інше.

На машинах, які обладнані дизельними ДВЗ, відцентрові регулятори прямої дії використовують у системах подачі пального всережимних регуляторів паливних насосів високого тиску. Вони призначені для автоматичної зміни потужності дизеля залежно від навантаження, забезпечення стійкої та економічної роботи ДВЗ на заданому режимі. Регулятор також обмежує максимальну та підтримує мінімальну частоту обертання колінчастого вала двигуна.

**Регулятор максимальних обертів.** Схема відцентрового регулятора максимальних обертів дизельного ДВЗ подана на рис. 1.6.

Разом з валиком 1, зв'язаним передачею з колінчастим валом двигуна, обертаються тягарці 2 регулятора, укріплені шарнірно так, що відстань їхнього центра ваги від осі вала може змінюватися. Під дією відцентрової сили інерції тягарці намагаються зайняти найбільш віддалене від осі валика положення. При цьому своїми лапками вони пересувають муфту 3, яка зв'язана перевідним важелем 4 з рейкою 5 паливного насоса. Розбіжності тягарців перешкоджає стисла пружина 6, яка спирається лівим кінцем на нерухому тарілку 7, а правим — на муфту 3 і прагне пересунути муфту вправо і звести тягарці до осі валика. Пружина має попереднє зтягування, тому

відцентрова сила тягарців до деякого значення обертів валика регулятора буде недостатня для подолання сили пружини. Тягарці будуть залишатися в найближчому до осі валика положенні. Зі збільшенням обертів буде підвищуватися й відцентрова сила інерції тягарців.

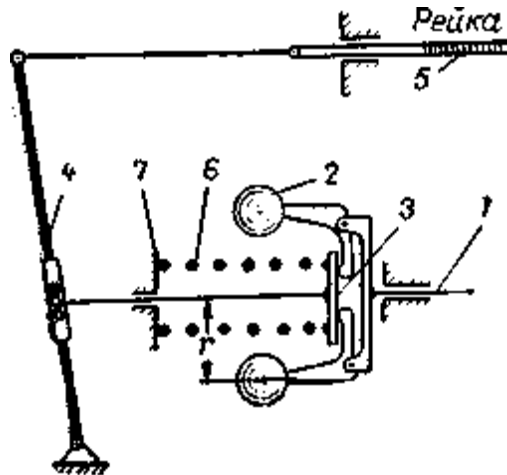


Рис. 1.6. Схема відцентрового регулятора максимальних обертів дизельного ДВЗ:

1 – валик регулятора; 2 – тягарці; 3 – муфта; 4 – перевідний важіль; 5 – рейка насоса; 6 – пружина; 7 – нерухома тарілка пружини

Робота такого регулятора полягає у такому. Коли оберти колінчатого вала досягнуть такої величини, що сила інерції тягарців збільшиться настільки, тоді тиск лапок тягарців на муфту стане рівним зусиллю пружини. При подальшому збільшенні обертів зусилля, що діє на муфту з боку лапок тягарців, перевищить зусилля пружини, тягарці почнуть розходитися, при цьому муфта буде зрушуватися вліво, а пружина додатково стискуватися. Муфта через переводний важіль почне переміщати також уліво рейку. подача палива зменшиться, і подальше збільшення числа обертів припиниться. При зменшенні обертів зусилля на муфту з боку стислої пружини стане більше, муфта стане переміщатися вправо, змушуючи тягарці сходитися до осі вала; при цьому пружина буде трохи розтискатися, подача палива збільшиться.

**Дворежимний регулятор.** Дворежимний регулятор не тільки обмежує максимальні оберти колінчастого вала дизельного двигуна, але й забезпечує усталену роботу двигуна на мінімальних обертах холостого ходу.

Схема дворежимного регулятора дизельного ДВЗ подана на рис. 1.7. Регулятор має дві пружини різної жорсткості. Слабка пружина 8 опирається лівим кінцем на нерухому тарілку 7, а правим на муфту 3. Сильна пружина 6 лівим кінцем опирається на ту ж нерухому тарілку 7, а правим – на бортик стакана 9. Стакан має спеціальний упор, що обмежує просування його вправо. При непрацюючому регуляторі між муфтою 3 і стаканом 9 повинна бути деяка відстань. На малих обертах тягарці розходяться та переборюють зусилля тільки слабкої пружини 8; якщо збільшити оберти, муфта дійде до стакана, що навантажений сильною пружиною 6, яка має попереднє затягування; подальшої розбіжності тягарців не буде, поки оберти не досягнуть величини обмеження. При обертах, що перевищують обмеження, тягарці, продовжуючи розходитися, стискають обидві пружини.

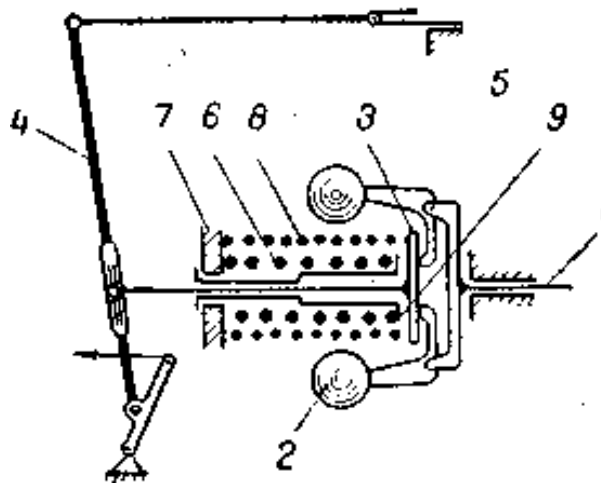


Рис. 1.7. Схема дворежимного відцентрового регулятора дизельного ДВЗ:

- 1 – вал регулятора; 2 – тягарці; 3 – муфта; 4 – переводний важіль;  
 5 – рейка насоса; 6 – сильна пружина; 7 – нерухома тарілка;  
 8 – слабка пружина; 9 – рухомий стакан сильної пружини

**Всережимний регулятор.** Всережимний регулятор, схема якого подана на рис. 1.8, відрізняється від однорежимного (рис. 1.6) тим, що тарілка 7 зроблена рухомою, завдяки чому затягування пружини можна змінювати, задаючи цим потрібний швидкісний режим. Натискаючи на педаль, водій переміщає важіль 8, а разом з ним і тарілку 7 вправо. При цьому пружина 5 стискується. В іншому всережимний регулятор працює так само, як однорежимний.

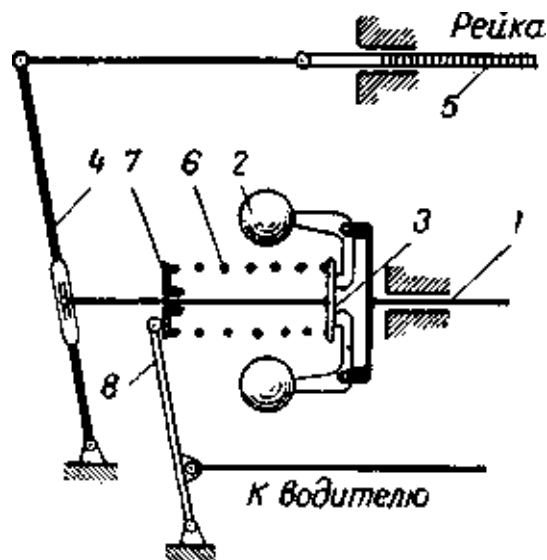


Рис. 1.8. Схема всережимного відцентрового регулятора обертів дизельного ДВЗ:

- 1 – вал регулятора; 2 – тягарці; 3 – муфта; 4 – переводний важіль;  
 5 – рейка насоса; 6 – пружина; 7 – рухома тарілка пружини;  
 8 – важіль натягу пружини

З підвищенням потужності та зростанням частоти обертання валів парових машин виникли випадки нестійкої роботи відцентрових регуляторів. Це потребувало теоретичного осмислення роботи регуляторів прямої дії. Максвел Д.К. у 1868 р. вирішив задачу стійкості замкненої системи «парова машина – відцентровий регулятор». Він довів, що система стійка, якщо усі дійсні частини коренів характеристичного рівняння  $n$ -го ступеня будуть негативні. А механік Раусс Є. у 1877 р. вивів необхідні та достатні



умови стійкості системи. Строгі математичні основи лінійної теорії автоматичного регулювання, питання стійкості та якості замкненої системи автоматичного регулювання «машина-регулятор» вивів І.В. Вишеградський (професор Петербурзького технологічного інституту) у 1877 р. Результати опублікував в роботі «Про регулятори прямої дії».

Тобто від винаходу першого регулятора рівня води у паровому котлі до теоретичного осмислення його роботи людству знадобилося 112 років !

У 1895 р. Стодола А. задачу стійкості САК звів до дослідження збіжності рішення диференційного рівняння та звернувся до Гурвіца А. з пропозицією знайти необхідні та достатні умови збіжності. Гурвіц це зробив у детермінантній формі.

У 1909 р. Жуковський М.Є. запропонував форму запису рівнянь динаміки роботи САК, основу на введенні відносних змінних.

У 1939 р. Михайлов А.В. запропонував використання частотних методів у теорії автоматичного регулювання. Вивів критерії стійкості лінійних систем. Запропонував графічне подання функції комплексної змінної.

У 1940 р. Гольдфарб Л.С. створив метод гармонічного балансу та запропонував його використання для розв'язання нелінійних задач.

У даний час теорія автоматичного керування завдяки широкому використанню ПЕОМ отримала бурний розвиток, у тому числі і ТАР транспортних машин. Під керівництвом Несторенко Н.М. розроблені конструкції всережимних регуляторів для дизельних ДВЗ. Під керівництвом Крутова В.І. розроблена теорія регулювання ДВЗ. Під керівництвом акад. Чудакова Е.А. та проф. Айзермана М.А. розроблені основи теорії створення систем автоматичного регулювання трансмісіями транспортних машин.

### **1.3. Автоматизація та роботизація – основні фактори підвищення продуктивності праці**

Розвиток автоматики здійснюється на базі наукових та технічних розробок. Якісні зміни відбуваються у періоди наукових та технічних революцій (НТР).

Сучасна науково-технічна революція характеризується глибокими якісними перетворюваннями науки та техніки:

- відбуваються глибокі якісні зміни;
- провідна роль переходить до науки шляхом перетворення виробництва в наукове виробництво;
- наука перетворюється у виробничу силу.

НТР змінює систему робочих машин:

- перехід на нову технологію;
- зміна структури й функцій.

У період поступового розвитку промисловості структура виробництва була триланкова: машина-двигун, передавальний механізм, робоча машина. У період НТР структура виробництва стала чотириланкова, додалася керуюча машина.

Генеральні напрямки НТР – автоматизація: перехід від окремих машин до автоматичної системи машин.

Автоматизація забезпечує:

- створення маневрених, швидкопереналагоджуваних автоматичних машин, верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК);
- перетворення науки в безпосередню продуктивну силу;
- інтенсифікацію режимів роботи, підвищення продуктивності праці, зменшення браку та втрат часу;
- використання нових джерел енергії, мікротехнології;
- вибір оптимального рішення на базі обробки величезних масивів;
- зміну місця людини у виробництві, характер і зміст її праці це становить соціальну сутність НТР.

## 1.4. Соціальна сутність НТР

Людина виключена з виробничого процесу: функції перетворення предмета праці та керування цим процесом передані самій машині. Людина виконує функцію контролера та регулювальника. Дослідження показали:

- активне спостереження за технічним процесом займає 55% робочого часу;
- налагодження устаткування – 22%;
- завантаження заготівель – 5%.

Сутність автоматизації – виключення людини із самого виробничого процесу та збереження за нею творчих функцій. Техніко-економічні показники впровадження автоматизації на залізничному транспорті наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Техніко-економічні показники впровадження автоматизації

Види автоматизації	Довжина, км	Економія, млн грн	Економія, люд.год
Автоблокування	35000	250-350	-
Диспетчерська централізація	50000	400-500	12000
Автоматика й телекерування тягових підстанцій	45000	150-174	10000- 12000

## **2. СТРУКТУРА І ЕЛЕМЕНТНИЙ СКЛАД СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ, КЕРУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ МАШИН**

Вивчення історії створення САК БКВРМ дозволяє виділити основні три етапи розвитку.

I етап (50-ті роки) – дослідні зразки систем програмного керування: порталних, козлових кранів, конвеєрів, електроталей, автоматичне адресування вантажів.

Основна елементна база, з якої склалися автоматичні системи управління на I етапі розвитку автоматики БДМ:

- контактні реле;
- крокові шукачі;
- кінцеві вимикачі;
- електронні лампи.

До недоліків систем автоматичного управління I етапу слід віднести високу вартість, недостатню надійність роботи, низький економічний ефект.

II етап (60-ті роки) — перехід до промислового використання систем автоматичного керування. Основні розробки, характерні для цього періоду:

- системи дистанційного управління козовими та мостовими кранами;
- пристрої автоматичної адресації в конвеєрних системах;
- використання магнітного запису й інфрачервоних променів;
- системи автоматичного управління мостовими кранами-штабелерами;
- роботи I покоління (пакування, штабелювання вантажів).

Основна елементна база, з якої склалися автоматичні системи II етапу розвитку автоматики БДМ:

- безконтактні елементи;
- стандартні модулі «Логіка – Т»;
- ЦЕОМ, міні-ЕОМ;
- лазери, ультрафіолетові промені.

До переваг систем автоматичного управління II етапу розвитку автоматики слід віднести високий економічний ефект, високу надійність, низьку вартість.

III етап (середина 70-х років) — подальший розвиток робототехніки, автоматизація управління БКВРМ. Основні розробки, характерні для цього періоду:

- роботи II покоління;
- адаптивні, саморегульовані оптимальні системи автоматичного управління;
- інтелектуальні роботи.

Основна елементна база, з якої склалися автоматичні системи III етапу розвитку автоматики БДМ:

- міні-ЕОМ;
- мікропроцесори.

Можливі два напрямки автоматизації режимів роботи машин: підтримка в певних межах заданого режиму або передача машині функцій устанавлення оптимального режиму, тобто настроювання, програми дії й удосконалювання структури. Останнє можливо при застосуванні технічної кібернетики, що дає найкраще, а часом і єдине рішення завдання автоматичного регулювання, що дозволяє об'єднати в єдину систему ряд автоматизованих ділянок.

Автоматичні системи включають регулювання, керування й захист, контроль і сигналізацію.

Системою автоматичного регулювання називається така замкнута динамічна система, що забезпечує стабілізацію деякого технологічного параметра (*стабілізуюче* регулювання), або зміна цього параметра у функції часу за певною програмою (*програмне* регулювання), або ж зміна регульованої величини за будь-яким законом, як правило, заздалегідь невідомим (*спостерігаюче* регулювання).

Прикладом стабілізуючого регулювання є підтримка постійного співвідношення й кількості складових компонентів, що надходять у бетонозмішувальну машину безперервної дії.

Прикладом програмного регулювання є здійснення режимів роботи роторного екскаватора (швидкостей пересування, товщини й глибини різання ґрунту, співвідношення подачі й товщини стружки й т.п.) за заздалегідь заданою програмою.

Прикладом спостерігаючого регулювання є підйом й опускання робочого органа автогрейдера залежно від ступеня пробуксовки ведучих коліс.

Системи автоматичного регулювання можуть бути подані у вигляді функціональних схем, складених з ланок (елементів), що виконують певні функції в ланцюзі регулювання.

Система автоматичного регулювання (рис. 2.1, а) являє собою замкнуте коло впливів (об'єкт – вимірювальний орган або датчик – керуючий орган – виконавчий орган – об'єкт). Замкнуте коло системи складається із двох основних ланцюгів. Перше коло (об'єкт – датчик – керуючий орган) здійснює контроль, а друге (керуючий орган – виконавчий орган – об'єкт) – керування регульованою величиною.

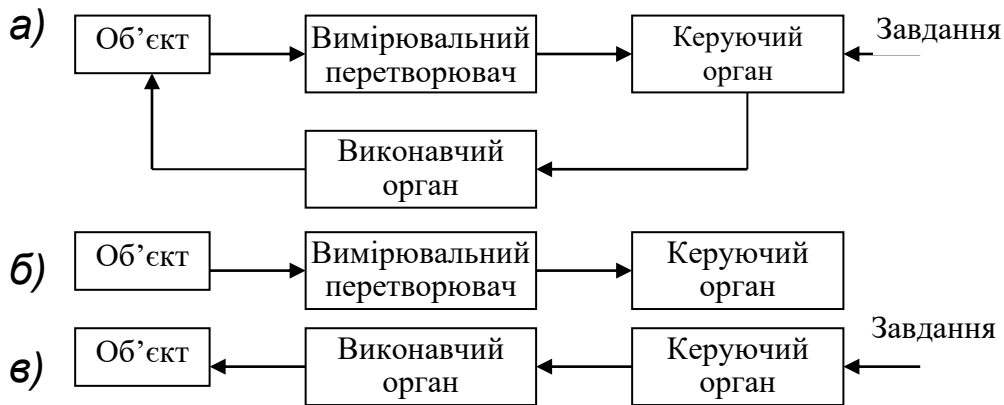


Рис. 2.1. Системи автоматичного регулювання, керування й контролю (закінчення)

Кожне з цих кіл може функціонувати й самостійно. У цьому випадку система автоматичного регулювання перетвориться в системи автоматичного керування (рис. 2.1, б) і автоматичного контролю (рис. 2.1, в).

У системах автоматичного керування вплив на керуючий орган (пуск, зупинка, реверс, зміни навантаження й режимів роботи) здійснюється відповідними командними імпульсами, які подаються автоматичним пристроєм, автоматичною системою іншого процесу або оператором. Прикладом може служити автоматичне керування електроприводами екскаваторів, баштових і мостових кранів та ін.

Різновидом автоматичного керування є системи автоматичного захисту та блокування, які призначені для припинення робочого процесу у випадку виникнення неприпустимих перевантажень або аварійного режиму.

При керуванні робочими процесами з віддаленого пункту застосовуються *дистанційне* керування та *телекерування*.

Дистанційне керування застосовується як самостійний пристрій або як пристрій, що дублює місцеве автоматичне керування. При дистанційному керуванні кожен керований об'єкт одержує командні імпульси по окремому каналу зв'язку. Кожна команда контролюється системою автоматичного контролю робочих процесів шляхом передачі значень вимірюваних величин на відтворюючий орган (автоматичний облік продуктивності вантажно-розвантажувальних машин, маркування, відбраковування та сортування вантажів, контроль рівня сипучих матеріалів у бункерах та ін.). Крім того, система автоматичного контролю здійснює функції сигналізації при порушеннях нормального режиму.

Телемеханічні системи застосовуються при значному віддаленні розпорядницького пристрою системи керування від виконавчої будови машини, коли необхідні спеціальні засоби зв'язку (передавач, канал зв'язку, приймач). У цьому випадку командні імпульси можуть передаватися великій кількості керованих об'єктів по одному або декількох каналах зв'язку (по проводах, радіо, за допомогою інфрачервоних променів та ін.).

Системи телемеханіки підрозділяються на три види.

Телерегулювання, що являє собою замкнутий процес автоматичної передачі впливу від об'єкта до розподільного пункту (телеконтроль) і назад до об'єкта (телекерування).

Телеконтроль (телевимірювання), призначений для виміру й контролю регульованих величин технологічного процесу з їхньою реєстрацією на розпорядницькому пункті.

Телекерування (напівавтоматичне й програмне), що служить для керування об'єктом з розпорядницького пункту.

## 2.1. Загальна структурна модель систем автоматичного керування будівельних та дорожніх машин

Серед розмаїття систем автоматичного керування будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин можливо виділити загальні риси, блоки та складові частини, які характерні для всіх систем. Для того, щоб зрозуміти, як працює та чи інша система, треба подати її у вигляді структурної моделі.

На рис. 2.2 подана загальна структурна модель САК БШМ, яка включає до себе такі основні блоки:

- 1 – підсилювально-перетворювальний пристрій;
- 2 – виконавчий орган;
- 3 – об'єкт регулювання;
- 4 – вимірювальний пристрій.

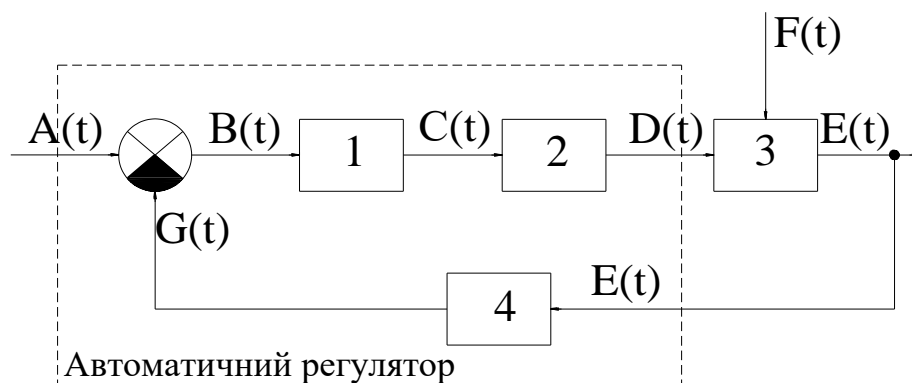


Рис. 2.2. Загальна структурна модель САК БШМ



Буквами позначені такі величини:

$A(t)$  – вплив, що задається (найчастіше – це вплив людини, яка керує);

$B(t)$  – сигнал неузгодження (сигнал похибки);


$C(t)$  – керуюча функція;

$D(t)$  – регулюючий вплив;

$E(t)$  – регульована величина;

$F(t)$  – вплив зовнішнього збурюючого впливу;

$G(t)$  – вимірюване значення регульованої величини.

Відхилення регульованої величини  $E(t)$  сприймається або вимірюється вимірювальним пристроєм 4. Через пристрій порівняння –  цей слабкий сигнал подається на підсилювально-перетворювальний пристрій 1, а відтіля передається на виконавчий орган 2, який впливає на об'єкт регулювання 3, що змінює регульовану величину  $E(t)$ . Цей вплив називається регулюючим впливом.

Процес регулювання характеризується передачею впливу від одної ланки до іншої по замкненому контуру. Неможливо визначити роботу окремої ланки, не знаючи стану решти ланок у даний час.

**Основна задача автоматичного регулювання** полягає у забезпеченні рівняння  $G(t)=A(t)$  у всі моменти часу роботи системи із заданим ступенем точності (для систем регулювання: за навантаженням, за збудженням, за початковими умовами). Чим точніше виконується рівняння, тим система регулювання краще.

**Якість роботи системи** характеризується різницею між необхідним законом зміни  $A(t)$  та дійсним законом її змінення  $G(t)$ :

$$B(t) = A(t) - G(t) \quad (2.1)$$

Функція  $B(t)$  визначає похибку системи. При ідеальній роботі системи автоматичного регулювання для усіх моментів часу  $B(t) = 0$ .

### 2.1.1. Зворотний зв'язок в системах автоматики

У системах автоматики розрізняють послідовне і паралельне з'єднання елементів, а також з'єднання із зворотним зв'язком. При послідовному з'єднанні вихідний сигнал одного елемента є входним сигналом для подальшого елемента. При паралельному з'єднанні один і той же сигнал є входним для двох елементів, а їх вихідні сигнали підсумовуються.

Загальний коефіцієнт перетворення двох послідовно сполучених елементів ланцюга рівний добутку коефіцієнтів перетворення цих елементів:  $K_{заг} = K_1 K_2$ . Загальний коефіцієнт перетворення двох паралельно сполучених елементів рівний сумі коефіцієнтів перетворення кожного з цих елементів:  $K_{заг} = K_1 + K_2$ .

При з'єднанні із зворотним зв'язком вихідний сигнал одного елемента подається на його вхід через елемент зворотного зв'язку. На рис. 2.3 показано з'єднання із зворотним зв'язком. Кружком, розділеним на чотири сектори, показано пристрій, в якому відбувається підсумовування сигналів. Якщо сектор зачорнений, то сигнал, який надходить, береться зі знаком «мінус».

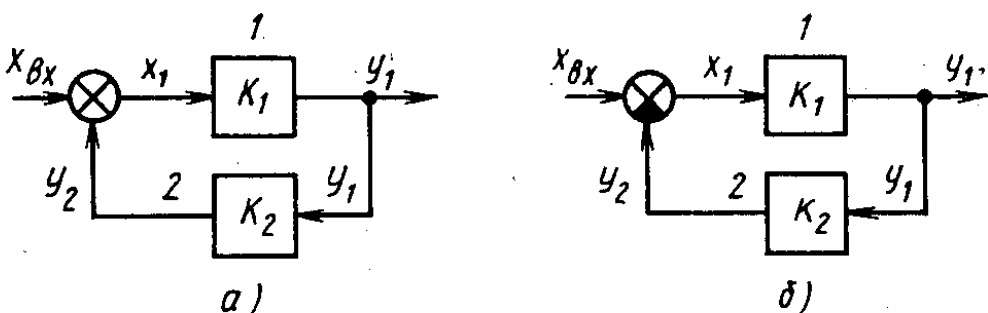


Рис. 2.3. З'єднання елементів із зворотним зв'язком

Залежно від знаку сигналу зворотного зв'язку розрізняють позитивний і негативний зворотний зв'язок. На рис. 2.3, а показано з'єднання з позитивним зворотним зв'язком, на рис. 2.3, б – з негативним зворотним зв'язком.

Елемент 1 включений в прямий ланцюг, елемент 2 – в зворотний ланцюг. Можна сказати, що елемент 1 охоплений зворотним зв'язком.

### **2.1.2. Коефіцієнт перетворення при з'єднанні із зворотним зв'язком**

На вхід елемента 1 надходить вхідний сигнал  $x_1 = x_{ex} \pm y_2$ , де знак «плюс» відповідає позитивному зворотному зв'язку, а знак «мінус» – негативному. Вихідний сигнал елемента 1 рівний добутку його вхідного сигналу на коефіцієнт перетворення:

$$y_1 = K_1 x_1 = K_1 x_{ex} \pm K_1 y_2. \quad (2.2)$$

Цей сигнал надходить на вхід елемента 2, включеного в ланцюг зворотного зв'язку. Отже, вихідний сигнал елемента 2 можна одержати, помноживши сигнал  $y_1$  на коефіцієнт перетворення елемента 2:  $y_2 = K_2 y_1$ . Підставивши значення  $y_2$  у вираз для  $y_1$ , тобто  $y_1 = K_1 x_{ex} \pm K_1 K_2 y_1$ , і перетворивши його, одержимо

$$y_1 \pm K_1 K_2 y_1 = K_1 x_{ex}, \quad \text{або} \quad y_1 (1 \pm K_1 K_2) = K_1 x_{ex}. \quad (2.3)$$

Загальний коефіцієнт перетворення за визначенням рівний відношенню вихідного сигналу до вхідного. В даному випадку вихідним є сигнал  $y_1$  а вхідним –  $x_{ex}$ . Їх відношення  $y_1/x_{ex} = K_1/(1 \mp K_1 K_2)$ . Тепер в цьому виразі знак «мінус» відповідає позитивному зворотному зв'язку, а знак «плюс» – негативному.

Проаналізуємо вираз для коефіцієнта перетворення при позитивному зворотному зв'язку (пзз):

$$K_{nзз} = \frac{K_1}{1 - K_1 K_2}. \quad (2.4)$$

Хай в ланцюг включений підсилювач з коефіцієнтом посилення 10, тобто  $K_1 = 10$ . Малу частину його вихідного сигналу (наприклад, 5%) знову подамо на вхід, включивши для цього в ланцюг зворотного зв'язку елемент з коефіцієнтом перетворення  $K_2=0,05$ :

$$K_{нзз} = \frac{10}{1 - 10 \cdot 0,05} = \frac{10}{0,5} = 20.$$

Таким чином, завдяки позитивному зворотному зв'язку одержаний вищий коефіцієнт посилення. Позитивний зворотний зв'язок найчастіше використовується в підсилювальних елементах автоматики.

За допомогою позитивного зворотного зв'язку може бути одержана і релейна характеристика. Використання позитивного зворотного зв'язку в магнітних підсилювачах і безконтактних магнітних реле буде розглянуто далі.

На принципі негативного зворотного зв'язку заснована робота систем автоматичного регулювання (САР). Покажемо це на прикладі елемента порівняння (ЕП), в якому відбувається віднімання вихідного сигналу  $G(t)$  з вхідного сигналу  $A(t)$  (див. рис. 2.2). Саме завдяки негативному зворотному зв'язку і забезпечується автоматична підтримка регульованої величини на заданому рівні. Адже завдяки негативному зворотному зв'язку постійно визначається відхилення  $G(t)$  від  $A(t)$  і виробляється відповідна цьому відхиленню регулююча дія. У САР в ланцюг зворотного зв'язку включений датчик. Підсилювальні і виконавчі елементи автоматики включені в прямий ланцюг. Хай коефіцієнти перетворення всіх елементів, включених в прямий ланцюг, можна врахувати, ввівши загальний коефіцієнт перетворення  $K_{np}$ , а датчик має коефіцієнт перетворення  $K_d$ . Тоді в сталому режимі загальний коефіцієнт перетворення САР

$$K_{САР} = K_{np} / (1 + K_{np} K_d). \quad (2.5)$$

При достатньо великому посиленні можна прийняти  $K_{\text{ПР}}K_{\text{Д}} \gg 1$  і

$$K_{\text{САР}} \approx K_{\text{ПР}} / (K_{\text{ПР}}K_{\text{Д}}) = 1/K_{\text{Д}}. \quad (2.6)$$

Як бачимо, коефіцієнт перетворення САР повністю визначається коефіцієнтом перетворення датчика. **Отже, саме від точності датчика залежить точність всієї роботи САР. Тому датчикам в системах автоматики, а також їх метрологічним характеристикам, надійності надається особливе значення.** Наявність же зворотного зв'язку має найважливіше значення не тільки в автоматичці, але і в біологічних, економічних і соціальних системах.

В теорії автоматичного регулювання датчики прийнято називати вимірювальними перетворювачами. Цей термін ми й будемо далі використовувати.

## 2.2. Вимірювальні перетворювачі

Елементи систем автоматики відрізняються за рядом ознак: конструктивним виконанням, принципом дії, природою фізичних явищ та ін. Але будь-який елемент автоматики здійснює кількісне, якісне або інформаційне перетворення вхідної величини  $X$  у вихідну  $Y$ .

Кількісне перетворення – це таке, при якому вхідна  $X$  та вихідна  $Y$  величини мають однакову розмірність (це, як правило, підсилювачі, стабілізатори, деякі види реле).

Якісне перетворення – це таке, при якому вхідна  $X$  та вихідна  $Y$  величини мають різну розмірність (це – вимірювальні перетворювачі, генератори, двигуни).

Інформаційне перетворення здійснюють логічні елементи, які передають інформацію про стан своїх входів.

Усі елементи автоматичних систем незалежно від принципу дії мають деякі спільні характеристики, які дозволяють порівнювати їх один з одним.

## 2.2.1. Характеристики вимірювальних перетворювачів

### Статичні характеристики

Статична характеристика, одна з основних, відображає функціональну залежність вихідного параметра від вхідного у сталому режимі.

#### Функція перетворення

Функція перетворення описує зв'язок між  $X$  вхідним сигналом та  $Y$  вихідним сигналом. Функція перетворення являє собою залежність вигляду  $Y=f(X)$ .

Приклади статичних характеристик наведені на рис. 2.4 [9]. За видом статичної характеристики розрізняють лінійні та нелінійні елементи.

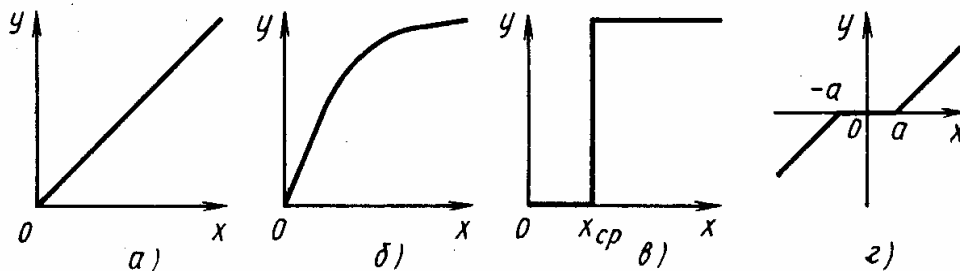


Рис. 2.4. Статичні характеристики

Для лінійних елементів статична характеристика (рис. 2.4, а) описується рівнянням

$$Y = K_{cm} X, \quad (2.7)$$

де  $K_{cm}$  – статичний коефіцієнт перетворення.

Коефіцієнт перетворення може бути визначений експериментально. Для цього встановлюють певне значення вхідного сигналу  $X$  і вимірюють відповідний йому вихідний сигнал  $Y$ . За результатами декількох випробувань

може бути побудована статична характеристика  $Y=f(X)$ , яка являє функціональну залежність вихідної величини від вхідної у статичному режимі. Статичні характеристики бувають лінійними та нелінійними (рис. 2.4). Якщо коефіцієнт перетворення не залежить від вхідного сигналу, то статична характеристика має вигляд прямої лінії (рис. 2.4, а), а елемент, що має таку характеристику, називають лінійним. Коефіцієнт перетворення нелінійних елементів не постійний, а статична характеристика може мати вигляд, який показаний на рис. 2.4, б. У магнітних підсилювачах це зв'язано, наприклад, з явищем насичення магнітного ланцюга. Тому про характеристику типу (рис. 2.4, б) говорять, що вона має зону насичення. Особливо явно нелінійність виражена для елементів типу реле. При збільшенні вхідного сигналу реле від нуля до деякого значення, званого сигналом спрацьовування  $X_{сп}$ , вихідний сигнал рівний нулю. При  $X=X_{сп}$  вихідний сигнал змінюється стрибком і при подальшому збільшенні вхідного сигналу залишається постійним (рис. 2.4, в).

Вихідний сигнал деяких елементів дорівнює нулю при малих значеннях вхідного сигналу, тобто ці елементи нечутливі до слабких сигналів. Статична характеристика елементів показана на рис. 2.4, г. Тільки при  $X \geq a$  починається зміна вихідного сигналу  $Y$ . В цьому випадку значення  $X=a$  називають порогом чутливості. Діапазон зміни вхідного сигналу, при якому вихідний сигнал рівний нулю, називається зоною нечутливості. Для елемента, характеристика якого показана рис. 2.4, г, зона нечутливості дорівнює  $2a$ .

### ***Коефіцієнт перетворення***

Коефіцієнт перетворення – це відношення вихідного сигналу  $Y$  до вхідного сигналу  $X$ , записується у вигляді такої залежності:

$$k(X) = \frac{Y}{X} = \frac{f(X)}{X}. \quad (2.8)$$

## **Чутливість**

Чутливість – це похідна від функції перетворення.

$$S = \frac{dY}{dX} = f'(X)$$

або у кінцевих прирощеннях

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}. \quad (2.9)$$

Розрізняють:

- **середню чутливість** у діапазоні перетворення

$$S_{cp} = \frac{Y_k - Y_n}{X_k - X_n}. \quad (2.10)$$

де індекси  $k$  та  $n$  позначають кінець та початок діапазону перетворення та відповідні значення вихідних та вхідних величин;

- **відносну чутливість** у діапазоні перетворення

$$S_{відн} = \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X / X}. \quad (2.11)$$

## **Поріг чутливості**

Поріг чутливості – це найменше значення вхідної величини, яке може бути впевнено виявлено даним вимірювальним перетворювачем.

## **Похибка вимірювального перетворювача**

Точність роботи датчика характеризується похибкою. Розрізняють *абсолютну, відносну і приведену похибки*. При визначенні похибки порівнюють реальну статичну характеристику датчика з ідеальною лінійною статичною характеристикою. Реальна статична характеристика відрізняється від ідеальної, оскільки вихідний сигнал може



змінюватися за рахунок внутрішніх властивостей елемента (знос, старіння та ін.) або за рахунок зміни зовнішніх чинників (напруга живлення, температура та ін.).

**Абсолютна похибка** – це різниця між реальним  $Y_p$  і розрахунковим (ідеальним)  $Y_i$  вихідними сигналами при одному і тому ж значенні вхідного сигналу  $X$ . Абсолютна похибка має розмірність вихідної величини, її називають ще помилкою:  $\Delta = Y_p - Y_i$ .

**Відносна похибка** – це відношення абсолютної похибки до розрахункового значення вихідної величини і визначається у відносних одиницях ( $\delta_{відн} = \frac{\Delta}{Y_i}$ ) або у відсотках (борт  $\delta_{відн} = (\frac{\Delta}{Y_i}) \cdot 100$ ).

**Приведену похибку** визначають як відношення абсолютної похибки до діапазону можливих значень вихідного сигналу. Приведену похибку обчислюють у відносних одиницях або у відсотках. Про точність датчика судять звичайно за максимальною приведеною похибкою.

### **Динамічні характеристики вимірювальних перетворювачів**

Перехід системи з одного сталого режиму в інший з іншими значеннями вхідного та вихідного сигналів називається **динамічним режимом** або **перехідним процесом**. Динамічні характеристики вимірювальних перетворювачів виявляються лише при перетворюванні змінних у часі величин. В динамічному режимі відношення вихідного сигналу до вхідного може бути нерівним коефіцієнту перетворення. Поведінка вимірювального перетворювача або системи автоматики у перехідному процесі може бути описана за допомогою перехідних характеристик. Перехідною характеристикою називають залежність вихідного сигналу від часу  $Y(t)$  при стрибкоподібній зміні вхідного сигналу.

На рис. 2.5 показано графік зміни вхідного сигналу та відповідні графіки перехідних характеристик найбільш поширених елементів автоматики.

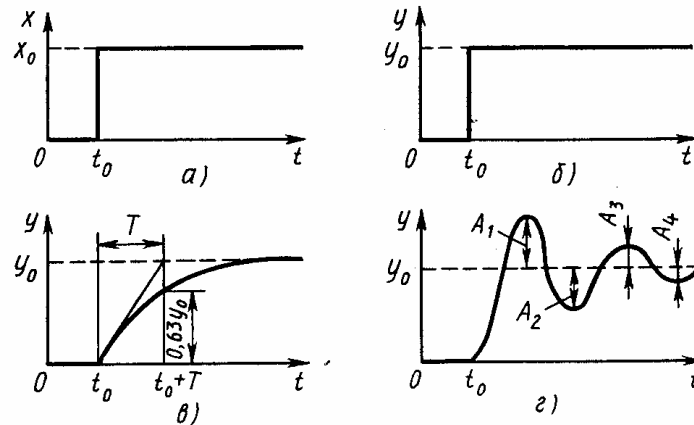


Рис. 2.5. Перехідні характеристики елементів автоматики

В момент часу  $t_0$  вхідний сигнал стрибком змінюється від 0 до  $X_0$  (рис. 2.5, а). Якщо вимірювальний перетворювач безінерційний, то у той же момент часу  $t_0$  вихідний сигнал стрибком змінюється від 0 до  $Y_0 = kX_0$  (рис. 2.5, б). Як правило, електромеханічні вимірювальні перетворювачі мають інерційність, яка тим більше, чим більше маса рухомих частин або індуктивність обмоток. У такому випадку зміна вихідного сигналу запізнюється відповідно до зміни вхідного сигналу (рис. 2.5, в). Перехідна характеристика має вигляд експоненти, кривої, яка змінюється від 0 до значення  $Y_0 = kX_0$  зі швидкістю пропорційною у кожен момент часу різниці між  $Y_0$  поточним значенням вихідного сигналу. Інерційність перехідного процесу характеризується значенням сталої часу  $t$ , яка виражається у секундах. На графіку величину сталої часу можна визначити, якщо провести дотичну до кривої  $Y(t)$  при  $t=t_0$  до перетину з горизонтальною лінією  $Y_0 = kX_0$ . За час, що дорівнює  $t$ , вихідний сигнал досягає 63% свого нового сталого стану.

Рівняння перехідної характеристики такого типу має такий вигляд:

$$Y = Y_0(1 - e^{-t/T}), \quad (2.12)$$

де  $e$  – основа натурального логарифма,  $e=2,718$ .

За час перехідного процесу можуть виникати і коливання вихідного сигналу. В електричних вимірювальних перетворювачах це пов'язано з процесом обміну енергією між елементами коливального контура: ємністю та індуктивністю. У механічних елементах коливання виникають, звичайно, коли одночасно діють і сили інерції, і сили пружності (наприклад, у пружинах). Графік коливального затухаючого процесу показаний на рис. 2.5, г. Як бачимо, зміна вихідного сигналу відбувається відносно значення  $Y_0$ . Амплітуда цих коливань поступово зменшується, затухає. Для кількісної оцінки цього процесу вводять поняття коефіцієнта затухання  $\psi$ , який визначається за формулою

$$\psi = 1 - A_3 / A_1, \quad (2.13)$$

де  $A_1$  та  $A_3$  – сусідні амплітуди коливань вихідного сигналу одного знаку.

Однією з основних характеристик цього режиму роботи є диференціальне рівняння, яке зв'язує вихідні  $Y(t)$  та вхідні  $X(t)$  параметри вимірювальних перетворювачів [11]

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = \\ = b_m \frac{d^m X(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dX(t)}{dt} + b_0 X(t), \end{aligned} \quad (2.14)$$

де  $a_i, b_j$  – постійні дійсні коефіцієнти.

В теорії автоматичного регулювання широко використовують запис диференційного рівняння (2.14) в операторній формі, яка основана на перетвореннях Лапласа [10]. При цьому функція-оригінал  $X(t)$  перетворюється в її зображення  $X(p)$ :

$$X(p) = \int_0^{\infty} X(t)e^{-pt} dt \quad (2.15)$$

Заміна дійсної змінної (часу)  $X(t)$  на комплексну змінну  $X(p)$  дозволяє замінити операції диференціювання та інтегрування відповідними до них алгебраїчними операціями над її зображенням.

Наприклад:

- похідна  $n$ -порядку  $X^{(n)}(t) = p^n X(p)$  :

- операція інтегрування  $\int X(t)dt = \frac{1}{p} \int X(t)e^{-pt} dt = \frac{1}{p} X(p)$ .

У зв'язку з цим диференційне рівняння (2.14) динаміки роботи вимірювальних перетворювачів перепишеться у такому вигляді:

$$\begin{aligned} (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0)Y(p) = \\ = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0)X(p). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Розв'язання рівняння (2.16) відносно зображення вихідної величини має такий вигляд (при нульових початкових умовах):

$$Y(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} X(p). \quad (2.17)$$

Одним з основних понять автоматички є передавальна функція.

**Передавальною функцією**  $W(p)$  вимірювального перетворювача називається відношення зображення  $Y(p)$  вихідної величини до зображення  $X(p)$  вхідної величини при нульових початкових умовах:

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} = W(p). \quad (2.18)$$

Наприклад, в статичному режимі, при  $X(t)=const$ ,  $Y(t)=const$  (або при  $p \rightarrow 0$ ) передавальна функція має такий вигляд:

$$W_{p \rightarrow 0} = \frac{b_0}{a_0} = k_0, \quad (2.19)$$

де  $k_0$  – статичний коефіцієнт перетворення.

Передавальна функція є вичерпною характеристикою динамічних властивостей вимірювальних перетворювачів, але вона малонаочна і її важко визначити експериментально. Тому на практиці використовують інші характеристики: це розв'язання диференційного рівняння (2.14) при типових вхідних сигналах та початкових умовах. Це – одиничний стрибок та короткий імпульс одиничної площини, лінійно зростаюча дія, синусоїдальна дія.

Перехідна функція  $h(t)$  – це реакція на вплив у вигляді одиничного стрибка  $l(t)$  (див. рис. 2.6). Швидкість, з якою перехідна функція наближається до сталого значення (при  $h(\infty) = k_0$ ), є мірою інерційності вимірювального перетворювача. Тому для визначення динамічних характеристик вимірювальних перетворювачів указують час.

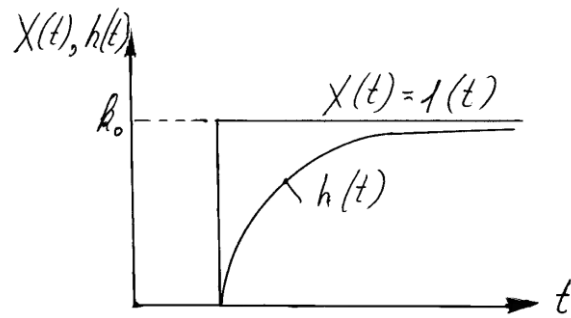


Рис. 2.6. Перехідна функція  $h(t)$

Імпульсна перехідна функція (функція ваги  $g(t)$ ) – це реакція на вплив у вигляді короткого імпульсу одиничної площі. Приклад імпульсної перехідної характеристики показано на рис. 2.7.

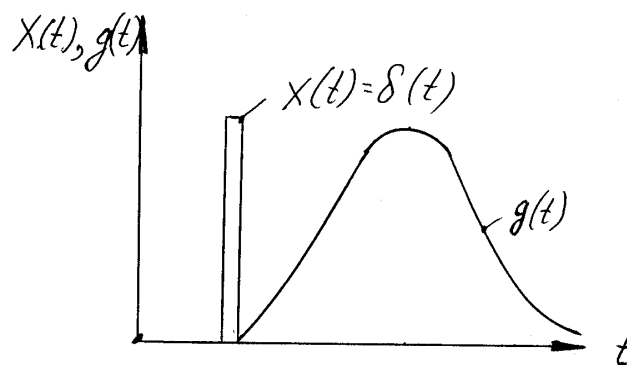


Рис. 2.7. Імпульсна перехідна функція  $g(t)$

Слід відмітити, що між перехідною функцією та функцією ваги є такі залежності:

$$g(t) = \frac{d(h(t))}{dt}, \quad h(t) = \int_0^t g(t) dt. \quad (2.20)$$

### **2.2.2. Основні методи вимірювань та вимірювальні схеми**

В системах автоматики сигнали керування залежать від різних неелектричних та електричних величин, які характеризують промисловий процес. Інформація про ці величини повинна бути отримана від вимірювального перетворювача і сформована у вигляді сигналу. Найбільш поширеними є електричні сигнали. Порівняно з іншими сигналами (наприклад, механічними, пневматичними, звуковими, променевими) електричний сигнал має цілий комплекс переваг: можливість передачі на велику відстань, простота перетворення та підсилення, можливість введення до ПЕОМ. Тому електричні методи вимірювання неелектричних величин набули широкого використання. Вони повинні забезпечити високу точність перетворення неелектричної величини в електричний сигнал і швидко реагувати на її зміну.

За принципом перетворення датчики, в яких неелектричні величини перетворюються в електричні, можна розподілити на параметричні та генераторні. В параметричних вимірювальних перетворювачах при зміні вхідної величини змінюється один з його параметрів, найчастіше активний, індуктивний або ємнісний опір. Для роботи такого датчика необхідне додаткове джерело живлення. В генераторних датчиках на виході виробляється енергія одного виду при дії на вході енергії іншого виду. Для вимірювання електричного сигналу потрібен електровимірювальний прилад. А для узгодження сигналу датчика з електровимірювальним приладом потрібна вимірювальна схема.

**Вимірювальні схеми.** Перетворення отриманої від датчика електричної величини у вигляд, зручний для подальшого використання та вимірювання, здійснюється за допомогою вимірювальних схем. Найбільше поширені послідовна, мостова, диференційна та компенсаційна.

**Послідовна** вимірювальна схема найпростіша (рис. 2.8). Вона являє собою лінійне електричне коло.

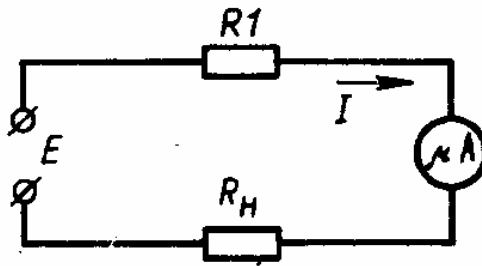


Рис. 2. Послідовна вимірювальна схема

Значення струму у колі може бути визначено за допомогою відомої формули

$$I = E / (R_1 + R_H), \quad (2.21)$$

де  $E$  – ЕРС джерела струму;

$R_1$  – змінний опір вимірювального перетворювача;

$R_H$  – постійний опір навантаження.

Недоліком схеми є недостатня чутливість, тому її використовують при значних змінах активного опору вимірювального перетворювача. Наприклад, при великих лінійних та кутових пересуваннях, які вимірюють потенціометричними датчиками.

**Мостові** вимірювальні схеми прості, дають достатню точність вимірювань та можуть бути використані для підключення багатьох видів параметричних датчиків, які мають на виході зміну активного, індуктивного або ємнісного опору. Найпростіша схема неврівноваженого моста включає до себе три постійних опори  $R_2 - R_4$  (рис. 2.9) та один датчик  $R_1$ , які складають плечі моста.



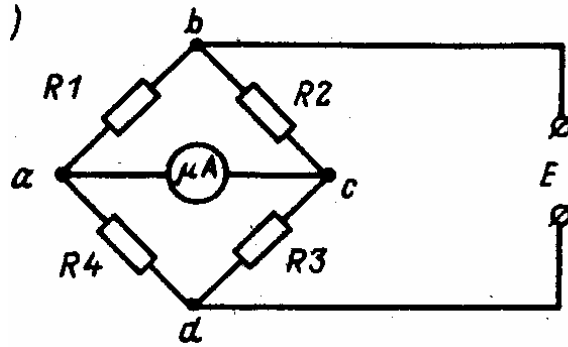


Рис. 2.9. Схема неврівноваженого моста

Джерело струму вмикається у діагональ живлення  $bd$ , а вихідний сигнал ( $I_{вux}$ ) знімається з вимірювальної діагоналі  $ac$ , в яку вмикається вимірювальний прилад (мікроамперметр).

На підставі закону Кірхгофа для замкнених контурів можна записати умову рівноваги мостової схеми, як

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad (2.22)$$

У разі рівноваги моста потенціали точок  $a$  та  $c$  будуть однаковими. Вимірювальний прилад покаже 0 ( $I_{ac}=0$ ).

При зміні опору одного з плеч моста (наприклад, датчика  $R_1$ ) рівновага схеми порушується і у діагоналі  $ac$  з'являється струм, пропорційний зміні опору датчика.

Така мостова схема називається неврівноваженою тому, що неможливо виготовити всі опори однаковими. Найбільшого розповсюдження на практиці набули врівноважені мостові вимірювальні схеми (рис. 2.10).

Для врівноваження (балансування) моста в схему (рис. 2.9) додають опір  $R_x$ . За його допомогою до початку вимірювань балансують (врівноважують) міст так, щоб струм у вимірювальній діагоналі  $ac$  був рівний нулю.

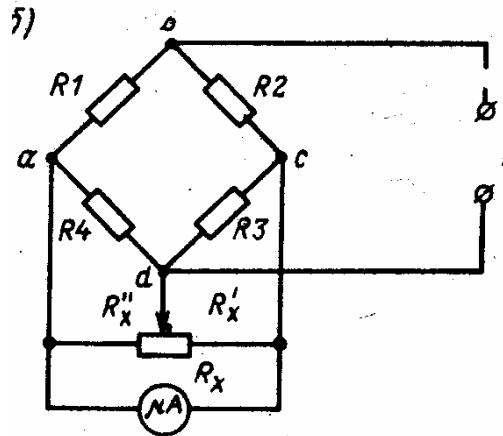


Рис. 2.10. Схема врівноваженого моста

**Диференціальна** вимірювальна схема включення датчиків (рис. 2.11) являє собою електричне коло, яке складається з двох суміжних контурів, у кожному з яких діє окрема електрорушійна сила  $E$ . Вимірювальний прилад реагує на різницю контурних струмів  $\Delta I_{np}$ . Він включається у коло, загальний для обох контурів.

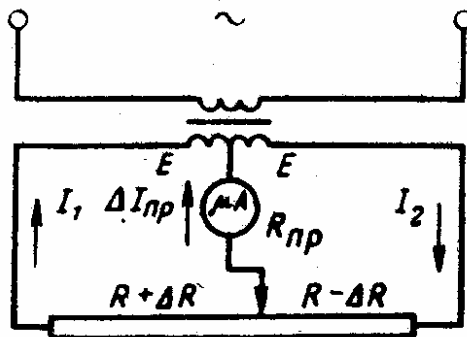


Рис. 2.11. Диференціальна вимірювальна схема

Диференціальні схеми вимірювань набули широкого використання у приладах, які працюють на змінному струмі, вони простіше та чутливіше, ніж мостові. В таких схемах використовують два режими роботи: при незмінних ЕРС змінюють опори (в обох або в одному контурі); при незмінних опорах контурів змінюють ЕРС (в обох або в одному контурі).

Режим роботи схеми залежить від виду датчиків, які застосовують (трансформаторний, датчик опору, простий або диференційний та ін.).

У диференційній схемі вимірювань з змінними опороми в обох контурах, яка подана на рис. 2.11, зміна струму в колі вимірювального приладу записується так [2]:

$$\Delta I_{np} = \frac{E\Delta R}{(R + \Delta R)(R_{np} + R) + R_{np}R}, \quad (2.23)$$

де  $\Delta I_{np}$  - струм через вимірювальний прилад;  
 $E$  - електрорушійна сила;  
 $R_{np}$  - опір вимірювального приладу;  
 $R$  - опір контура;  
 $\Delta R$  – зміна опору.

Компенсаційний метод вимірювань полягає в тому, що ЕРС (або напругу), яку вимірюють, врівноважують рівним та протилежним за знаком падінням напруги, значення якого може бути встановлено та визначено з великою точністю.

**Компенсаційна** вимірювальна схема найчастіше використовується для датчиків генераторного типу. Наприклад, при використанні термопари *ТП* схема включає до себе три контури (рис. 2.12).

В контур *I* включається нормальний елемент  $E_{не}$ , який характеризується постійною ЕРС. Струм в цьому контурі постійний за значенням ( $I_n = E_{не} / R_n$ ).

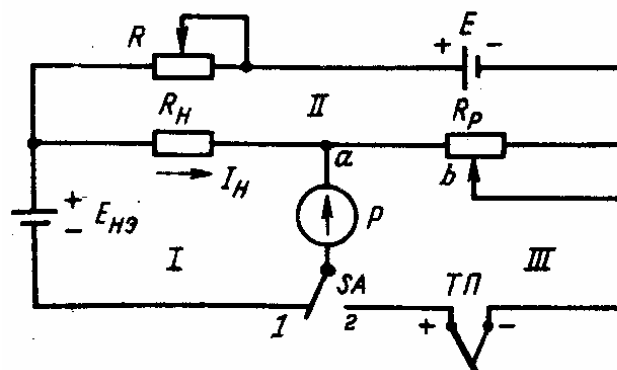


Рис. 2.12. Компенсаційна вимірювальна схема

Порядок проведення вимірювань:

1. Встановити перемикач  $SA$  в положення 1, за допомогою опору  $R$  встановити такий струм в контурі  $II$ , при якому гальванометр  $P$  буде показувати нуль.
2. Встановити перемикач  $SA$  в положення 2, за допомогою змінного опору реохорда  $R_p$  встановити стрілку гальванометра  $P$  на нуль. При цьому ЕРС, яку розвиває термопара  $ТП$ , буде врівноважена напругою, яка знімається з ланки реохорда  $R_p$

$$e_{ТП} = I_n R_{ab} = E_{не} R_{ab} / R_n. \quad (2.24)$$

Таким чином, задача вимірювання ЕРС зводиться до вимірювання довжини реохорда між точками  $a$  та  $b$ . Шкалу реохорда можливо градувати в одиницях напруги для даного типу термопари в градусах Цельсія. Компенсаційні схеми мають дуже високу чутливість і практично не потребують енергії від датчика.

### **2.2.3. Потенціометричні вимірювальні перетворювачі**

Потенціометричні вимірювальні перетворювачі (ВП) призначені для перетворення механічного переміщення (кутового або лінійного) в електричний сигнал. У будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машинах використовуються в автоматичних обмежувачах вантажного моменту кранів, вимірювання ваги вантажу, положення стріли кранів, рівня палива та ін. Основною частиною датчика є реостат, опір якого змінюється при переміщенні движка, що скочає по дроті (схема ввімкнення потенціометричного датчика показана на рис. 2.13, а).

Напруга живлення подається на всю обмотку реостата через нерухомі виводи цієї обмотки. Вихідна напруга, пропорційна переміщенню движка, знімається з одного з нерухомих виводів і з рухомого движка. Така схема включення в електротехніці називається потенціометричною або схемою дільника напруги.

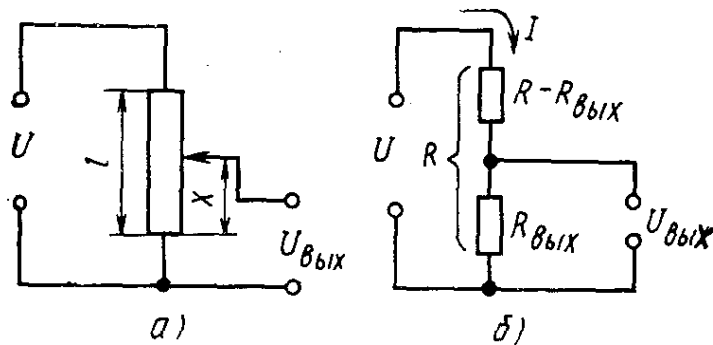


Рис. 2.13. Схема включення потенціометричного вимірювального перетворювача

Якщо опір всієї обмотки датчика позначити через  $R$ , а опір частини цієї обмотки, з якої знімається вихідна напруга, через  $R_{вих}$ , то потенціометрична схема включення датчика може бути подана як послідовне з'єднання резисторів з опором  $R$  і  $(R - R_{вих})$  (рис. 2.13, б). Струм через обмотку датчика  $I = U/R$ , а прикладена напруга розподіляється (ділиться) між послідовно з'єднаними резисторами:

$$U = IR_{вих} + I(R - R_{вих}). \quad (2.25)$$

Якщо опір обмотки рівномірно розподілити по довжині  $l$ , а переміщення движка позначити через  $x$ , то вихідна напруга датчика

$$U_{вих} = IR_{вих} = U \frac{x}{l}. \quad (2.26)$$

Таким чином, вихідний сигнал датчика пропорційний переміщенню движка.

В автоматичних системах движок може бути механічно пов'язаний з яким-небудь пристроєм (клапаном, кермом, антеною, різальним інструментом і т.п.), положення якого треба виміряти й передати у вигляді електричного сигналу. Зусилля, під дією якого переміщується движок, у цьому випадку досить велике. Тому для забезпечення надійного контакту між движком і обмоткою варто мати досить велику силу притиснення движка. В автоматичних приладах для

виміру різних неелектричних величин движок датчика з'єднується із чутливим елементом, що перетворює контрольовану величину в переміщення. Зусилля, яке розвивається чутливими елементами (мембранами, біметалічними пластинами, поплавцями й т.п.), невелике. Тому не можна сильно притискати движок до обмотки.

Наявність ковзного контакту знижує надійність потенціометричного датчика і є його основним недоліком. Для живлення датчика може бути використана як напруга постійного струму, так і напруга змінного струму невисокої частоти. Вхідним сигналом датчика може бути не тільки лінійне, але й кутове переміщення.

Залежно від закону зміни опору обмотки розрізняють лінійні й функціональні потенціометричні вимірювальні перетворювачі.

Конструктивно потенціометричний датчик (рис. 2.14) складається з каркаса 1, на який намотана в один шар обмотка 2 з тонкого дроту. По витках обмотки ковзає движок (щітка) 3, який механічно пов'язаний з об'єктом, переміщення якого треба виміряти. Обмотка виконана з ізолюваного дроту, а доріжка, по якій ковзає движок, попередньо очищена від ізоляції.

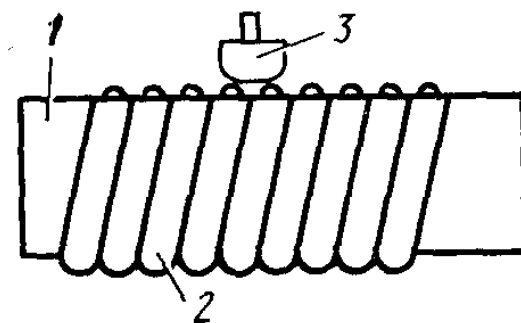


Рис. 2.14. Конструктивна схема потенціометричного вимірювального перетворювача

Каркас виконується звичайно плоским або у вигляді циліндра. Матеріалом каркаса може бути ізолятор (текстоліт, гетинакс, пластмаса, кераміка) або метал, покритий шаром

ізоляції. Металічні каркаси завдяки кращій теплопровідності дозволяють одержати більшу потужність електричного сигналу на виході датчика. Як матеріал для такого каркаса може бути нанесений шар окисованого алюмінію товщиною близько 10 мкм. При розгляданні в лупу із двадцятиразовим збільшенням шар не повинен мати тріщин або нерівностей. Напруга пробою такого шару не менш 500 V.

Для обмотки потенціометричного датчика найчастіше застосовують дріт з манганіну, константану й інших провідникових матеріалів, що мають малий температурний коефіцієнт опору. При великих зусиллях притиснення движка використовується дріт діаметром 0,1 – 0,3 мм, при малих зусиллях притиснення використовують дріт зі сплавів, до складу яких входять платина, срібло, іридій, рубідій, осмій і ін. Діаметр дроту  $d$  таких точних датчиків вибирається в межах 0,03 – 0,01 мм. Характеристики деяких провідникових матеріалів, які використовують для потенціометричних датчиків, наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Матеріали дротів для потенціометричних вимірювальних перетворювачів

Матеріал дроту	Питомий опір при $t=20^{\circ}\text{C}$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	Температурний коефіцієнт опору $\alpha$ , $1/^{\circ}\text{C}$	Допустима температура нагріву, $^{\circ}\text{C}$
Константан	0,49	$(3...4) \cdot 10^{-6}$	500
Манганін	0,42	$6 \cdot 10^{-6}$	960
Ніхром	1,08	$(15...20) \cdot 10^{-6}$	110
Вольфрам	0,056	$464 \cdot 10^{-6}$	3400
Платіноіридієвий сплав	0,23	$-111 \cdot 10^{-6}$	1780

Провід намотується на каркас із деяким натягом. При цьому необхідно, по-перше, щоб при зниженні температури провід не розпускався через різні температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалів дроту й каркаса; по-друге, щоб при нагріванні корпуса провід при розтяганні не досягав межі пружності. Товщину каркаса не

рекомендується брати менш  $4d$ , а радіус закруглення на кутах каркаса – менш  $2d$ . Після намотування проводу на каркас для зміцнення витків і запобігання їхньому зсуву всю поверхню покривають тонким рівномірним шаром безкислотного лаку. Полірування контактної поверхні обмотки (доріжки руху) робиться уздовж витків наждаковим або полірувальним папером, шліфувальним диском з алмазним пилом, а проводів з емалевою ізоляцією – фетровим диском. Ширина доріжки становить звичайно  $(2 - 3)d$ .

При  $d = 0,1 - 0,3$  мм движок потенціометричного датчика виконується у вигляді пластинчастих щіток зі срібла, срібла з паладієм або (рідше) фосфористої бронзи. Контактне зусилля при цьому приймається рівним  $0,05 - 0,1$  Н, що забезпечує силу тертя не більше  $3 \cdot 10^{-2}$  Н. Для точних датчиків при  $d < 0,1$  мм движок робиться зі сплавів платини з іридієм, берилієм або сріблом у вигляді двох-п'яти тонких паралельних дротів. Контактне зусилля при цьому приймається рівним  $10^{-3} - 10^{-2}$  Н, тобто іноді воно досягає  $2 - 10^{-4}$  Н (20 мг) на окремий контакт. Настільки малі контактні зусилля необхідні для високоточних потенціометричних датчиків, які використовують, наприклад, у відповідальних космічних об'єктах.

На рис. 2.15 наведена конструкція потенціометричного вимірювального перетворювача для виміру кутових переміщень. Так само, як і датчик лінійних переміщень, він складається з каркаса 1 з обмоткою 2, по якій ковзає движок 3.

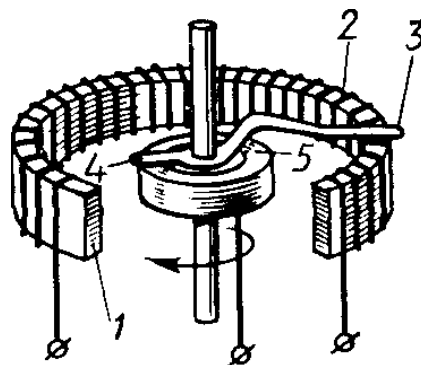


Рис. 2.15. Потенціометричний вимірювальний перетворювач кутових переміщень



Для знімання сигналу із движка, що переміщається, служить додаткова щітка 4, яка ковзає по струмознімальному кільцю 5. Вихідна напруга датчика кутових переміщень пропорційна куту повороту рухомої частини первинного перетворювача, з'єднаного з віссю движка. У БШМ такий датчик використовується для вимірювання кутового положення стріли крана у приладі, який називається обмежувач вантажного моменту.

В деяких автоматичних приладах як потенціометричний вимірювальний перетворювач використовують так званий реохорд (рис. 2.16). Він являє собою натягнутий дріт, по якому ковзає повзунк. Опір реохорда пропорційний переміщенню повзунка.

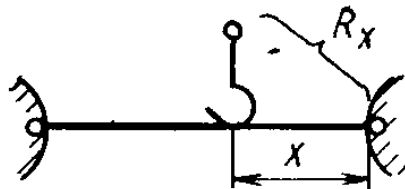


Рис. 2.16. Конструкція реохорда

Часто реохорд використовують не в потенціометричній схемі, а включають у плече мостової схеми. У цьому випадку переміщення движка перетвориться в зміну опору  $R_x$ .

### **Характеристики лінійного потенціометричного вимірювального перетворювача**

Основною характеристикою потенціометричного датчика є залежність вихідної напруги  $U_{\text{вих}}$  від переміщення  $x$ . При рівномірному намотуванні ця залежність лінійна тільки на холостому ході, тобто при відсутності опору навантаження, підключеному до вихідних клем датчика. У реальних умовах до цих клем підключаються електричні прилади, вхідний опір яких є опором навантаження для датчика (рис. 2.17).

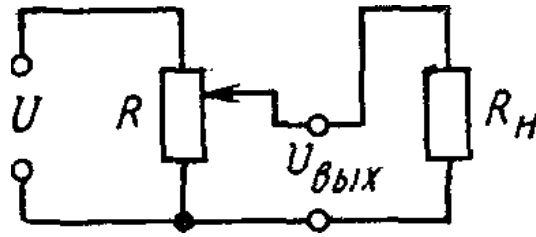


Рис. 2.17. Підключення навантаження до потенціометричного вимірювального перетворювача

Під навантаженням звичайно розуміється струм навантаження. Коли говорять, що «навантаження відсутнє», то мають на увазі, що саме струм навантаження дорівнює нулю. Опір же навантаження при цьому, природно, дорівнює нескінченності. Отже, у режимі холостого ходу (тобто при відсутності навантаження) опір навантаження нескінченно великий.

Для аналізу впливу опору навантаження  $R_n$  на основну характеристику датчика, повний опір обмотки якого  $R$ , введемо поняття коефіцієнта навантаження  $\beta = R_n / R$  та відносного переміщення  $\alpha = x/l$ . Вихідна напруга датчика

$$U_{\text{вых}} = \frac{U\alpha}{1 + \alpha(1 - \alpha)/\beta}, \quad (2.27)$$

За цим рівнянням побудуємо залежність  $U_{\text{вих}}/U = f(\alpha)$ , де  $U$  – напруга живлення датчика, для різних значень  $\beta$  (рис. 2.18). Зі зменшенням опору навантаження характеристика датчика стає нелінійною й зростає помилка перетворення. Відносна похибка для навантаженого датчика може бути знайдена зіставленням виразів (2.26) і (2.27):

$$\delta = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вых}\beta \rightarrow \infty}}{U} = \frac{\alpha^2(1 - \alpha)}{\beta + \alpha(1 - \alpha)}, \quad (2.28)$$

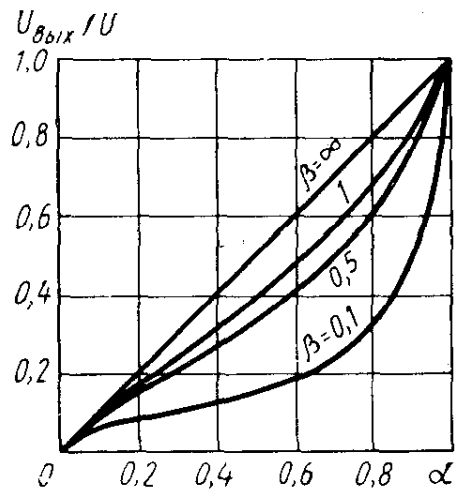


Рис. 2.18. Статична характеристика потенціометричного вимірювального перетворювача

Відношення переміщення движка  $x$  до довжини намотування  $l$  позначаємо через  $\alpha = x/l$ . Якщо датчик не навантажений, тобто опір навантаження  $R_n = \infty$  і  $\beta = \infty$ , то вихідна напруга лінійно зростає при зміні  $\alpha$  від 0 до 1;  $U_{вих} = \alpha U$ . Графічно ця залежність зображується прямою лінією. При наявності опору навантаження  $R_n$ , який порівнянний з опором обмотки  $R$ , ця залежність відрізняється від лінійної, оскільки частина струму, що проходить через датчик, відходить у навантаження. Струм, що надходить від джерела живлення, може бути підрахований за формулою

$$I = U \left[ (R - \alpha R) + \frac{\alpha R R_n}{\alpha R + R_n} \right], \quad (2.29)$$

або, підставляючи  $R_n = \beta R$ , отримаємо

$$\begin{aligned} I &= U \left/ \left[ R(1 - \alpha) + \frac{\alpha \beta R^2}{R(\alpha + \beta)} \right] \right. = U \left/ \left[ R \frac{(1 - \alpha)(\alpha + \beta) + \alpha \beta}{\alpha + \beta} \right] \right. = \\ &= \frac{U}{R} \left/ \frac{\alpha + \beta - \alpha^2 - \alpha \beta + \alpha \beta}{\alpha + \beta} \right. = \frac{U}{R} \left/ \frac{\alpha + \beta - \alpha^2}{\alpha + \beta} \right. \end{aligned} \quad (2.30)$$

На рис. 2.19 побудовані криві 1, 2, що характеризують відносну похибку датчика при  $\beta = 1$ ; та 0,5 відповідно. При більших  $\beta$  абсолютна величина максимальної похибки  $\delta_{\max} = (4/27)\beta$  при  $\alpha=2/3$ .

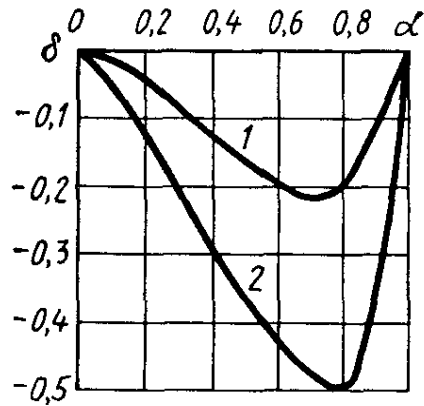


Рис. 2.19. Графіки відносної похибки потенціометричного вимірювального перетворювача

Важливою характеристикою якості потенціометричного датчика є плавність зміни вихідної напруги. При переміщенні движка по обмотці потенціометра відбувається стрибкоподібна зміна опору, оскільки движок мовби перескакує з одного витка на інший. Це приводить до того, що залежність вихідної напруги від переміщення має східчастий вигляд (рис. 2.20). Число сходин пропорційне, а їхня висота обернено пропорційна числу витків обмотки.

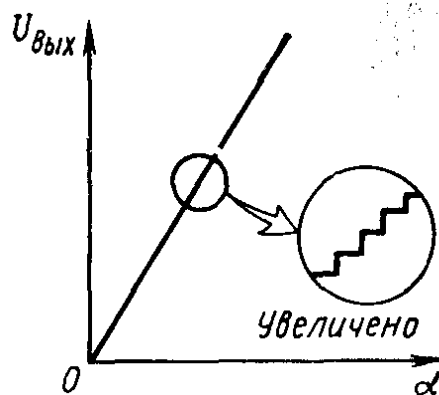


Рис. 2.20. Східчаста статична характеристика потенціометричного вимірювального перетворювача

Реальна вихідна характеристика має відхилення від ідеальної (плавної, безступінчастої) як нагору, так і вниз. Отже, похибка, викликана ступінчастістю, може бути як позитивною, так і негативною й становить половину напруги  $U_\omega$ , що доводиться на один виток намотування. Якщо позначити через  $\omega$  загальну кількість витків потенціометра, то  $U_\omega = U / \omega$  і похибка ступінчастості  $\Delta \leq U / (2\omega)$ . Для кількісної оцінки похибки, обумовленої ступінчастістю, вводять поняття електричної роздільної здатності потенціометра  $\delta_\omega$ . Роздільна здатність визначає максимально можливу точність роботи потенціометричного датчика. Поліпшити її можна, збільшуючи кількість витків  $\omega$ . Для цього можна або подовжити намотану частину потенціометра  $l$  (при заданому діаметрі дроту), або зменшити перетин дроту. Зменшення діаметра дроту приводить до технологічних труднощів виготовлення обмотки, і, що важливіше, знижує надійність потенціометра, оскільки погіршується механічна міцність обмотки й вона швидше стирається.

Збільшення довжини обмотки, природно, приводить до збільшення розмірів усього потенціометра. Для усунення цього недоліку були розроблені багатообертові потенціометри.

Для поліпшення роздільної здатності можна також застосовувати движки з декількома струмознімальними контактами. На рис. 2.21 показаний движок із двома контактами 1 і 2, які торкаються обмотки 3 у двох діаметрально протилежних точках. Наявність двох паралельних контактів підвищує й надійність потенціометра.

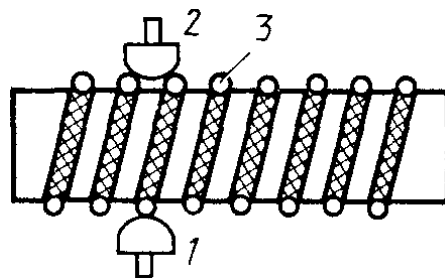


Рис. 2.21. Потенціометричний датчик з двома струмознімальними контактами

Принципово відсутня похибка, обумовлена ступінчастістю, в датчиків типу реохорда, де движок ковзає уздовж натягнутого дроту. Ці датчики мають малий опір і вихідну напругу, тобто низьку чутливість, тому в потенціометричних схемах вони не знайшли практичного застосування. Чутливість датчика може бути визначена як перша похідна вихідної напруги по переміщенню движка. Для ненавантаженого потенціометра чутливість пропорційна напрузі живлення датчика й обернено пропорційна довжині намотування.

Потенціометричні ВП мають також і технологічні похибки, пов'язані з похибкою кроку намотки і похибкою виготовлення обмоткового дроту. Для ВП високого класу точності ці похибки складають не більш 0,01%, а для середнього класу – 0,25-0,5 %.

Динамічні властивості ВП залежать від характеру навантаження. Якщо навантаження активне, то ВП еквівалентний неінерційній ланці з передатною функцією

$$W(S) = k = \frac{R_H \cdot R_X}{r \cdot (R_X + R \cdot R_H)}, \quad (2.31)$$

де  $r$  – опір потенціометра між движком та точкою  $\kappa$ :  $r = R - R_X$ .

Якщо навантаження реактивне, то ВП еквівалентний аперіодичній або форсуючій ланці. Наприклад, для індуктивного навантаження передатна функція ланки ВП може бути подана у вигляді

$$W(S) = r \cdot \frac{1 + S \cdot \tau}{1 + S \cdot T}, \quad (2.32)$$

$$\text{де } r = \frac{R_H \cdot R_X}{rR_X + rR_H + R_X R_H};$$

$$\tau = \frac{L_H}{R_H};$$

$$T = \frac{L_H \cdot R}{rR_X + rR_H + R_X R_H};$$

$L_H$  – індуктивність навантаження;

$R_H$  – активна складова опору навантаження.

#### **2.2.4. Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі**

Різноманітність автоматичних систем БШМ передбачає використання великої кількості різних типів вимірювальних перетворювачів, серед яких тензорезисторні перетворювачі (ТРП) набули широкого використання. За допомогою вимірювальних перетворювачів тензорезисторного типу вимірюються найрізноманітніші параметри: кутове та лінійне положення робочих органів БШМ, механічні зусилля (обертальні моменти, зусилля згину), гідравлічний та пневматичний тиск рідини та ін.

#### **Загальні відомості про тензорезисторні вимірювальні перетворювачі**

Вимірювальними перетворювачами називаються засоби вимірювання, які виробляють сигнал вимірюваної інформації у формі, що зручна для подальшого використання. Первинними перетворювачами у даному випадку є тензорезистори, які перетворюють вимірювану інформацію у зміну опору тензорезисторів.

Серед великої кількості методів та засобів тензометрії (рентгенівські, поляризаційно-оптичні (методи фотопружності), муарові смуги, крихкі покриття, гальванічні покриття) найбільше поширення у системах автоматики БШМ знайшли тензометри та тензометричні перетворювачі. Методи та засоби тензометрії основані на масштабному перетворюванні деформації поверхні об'єкта дослідження за допомогою тензометрів та тензометричних перетворювачів.

Тензометри та тензометричні перетворювачі розподіляють на такі типи: механічні, оптичні, пневматичні,

гідравлічні, струнні (акустичні), електричні. Серед них найбільше поширення у системах автоматики БШМ знайшли електричні тензометри. Їх дія основана на зміні параметрів електричної ланки тензометра (опору, ємності, індуктивності) або генерації електричних сигналів у відповідності до деформації, яка вимірюється.

Основні типи електричних тензометрів такі: тензометри опору, ємнісні, п'єзоелектричні, індуктивні. Серед перелічених тензометрів найбільше розповсюдження у системах автоматики БШМ знайшли тензометри опору. Серед них слід виділити такі: потенціометричні тензометри [12], електролітичні тензометри [13], механотронні тензометри [14].

Потенціометричні вимірювальні перетворювачі широко використовуються в системах автоматики БШМ I покоління: "Профіль-10", "Копір-автоплан-10", "Комбіплан-10", ОГБ-2, ОГК, ОГМ, "Дорога" та ін.

В системах автоматики БШМ II та III покоління найбільше поширення знайшли наряду з іншими тензорезисторні перетворювачі.

Принцип дії тензорезисторів засновано на зміні опору металів або напівпровідників під дією деформації. Чутливий елемент тензорезистора може бути виконаний у вигляді петлеподібної решітки з тонкого дроту (рис. 2.22, а) або фольги (рис. 2.22, б), або у вигляді монокристалу з напівпровідникового матеріалу, або напилюванням напівпровідникової плівки на основу.

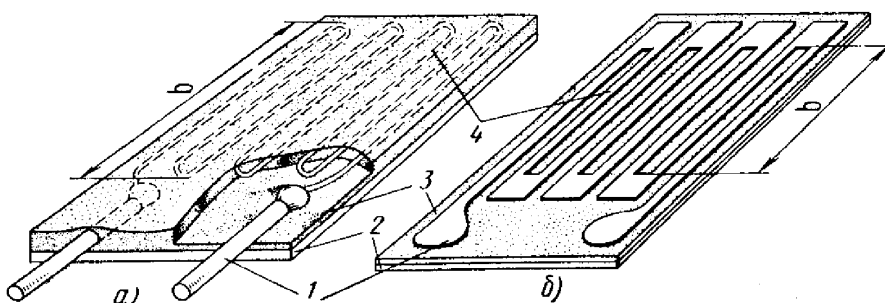


Рис. 2.22. Тензорезистори:  
а – з дротовим чутливим елементом;  
б – з фольговим чутливим елементом: б - база



Чутливий елемент 4 закріплюється на основі 2 з матеріалу, який не проводить електричного струму (папір, лакова плівка, тканина та ін.), за допомогою з'єднувального шару клею 3, який передає деформацію чутливому елементу. Для електричного з'єднання тензорезистора з вимірювальною схемою служать виводи 1.

Особливістю тензорезистора є те, що його чутливий елемент (решітка) має механічний зв'язок з об'єктом дослідження по всій довжині вимірювальної бази.

Широке використання тензорезисторів, як універсального засобу вимірювання деформації, пояснюється такими особливостями та можливостями:

- дистанційне вимірювання великої кількості точок;
- широкий діапазон температур при використанні схем термокомпенсації;
- широкий діапазон вимірювання деформації;
- вимірювання у різних зовнішніх умовах;
- вимірювання багатокomпонентних деформацій;
- невелика маса та габарити;
- широкий частотний діапазон;
- велика надійність і відносно мала вартість.

### **Конструкції та основні типи тензорезисторів**

Серед великої кількості та різноманітності типів тензорезисторів у системах автоматики БШМ набули поширення дротові та фольгові тензорезистори.

Дротові тензорезистори мають тензорешітку, яка виконана з тонкого дроту діаметром 2 – 30 мкм з константану або з легованих хромонікелевих сплавів типу евана і карма. Основні типи дротових тензорезисторів показано на рис. 2.23.

Діапазон деформацій, які можна вимірювати тензорезисторами на паперовій або плівковій основі, складає  $\pm 3 - 10$  тис. ОВД (одиниць відносної деформації). Загальні характеристики дротових тензорезисторів наведено у табл. 2.2.

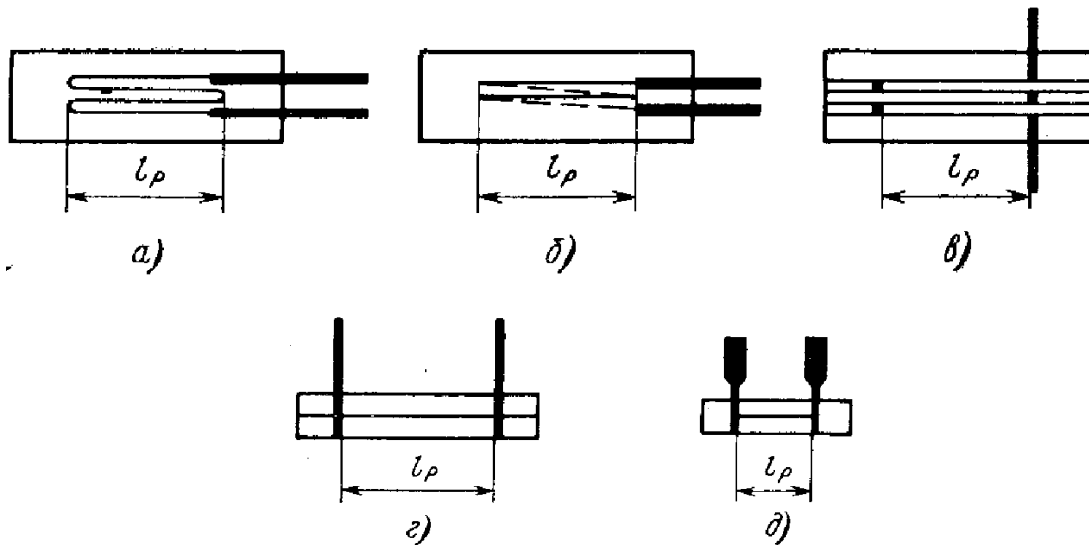


Рис. 2.23. Дротові тензорезистори:  
 а, б – багатовіткова петльова решітка; в – багатовіткова  
 безпетльова решітка, г, д – однодротова решітка

Таблиця 2.2.

Дротові тензорезистори з одноелементною петльовою  
 решіткою на паперовій основі

Марка	Номі- нальний опір $R$ , Ом	Робочій діапазон темпера- тур $T$ , °К	Активна база $l$ , мм	Габаритні розміри	
				Довжина $L$ , мм	Ширина $B$ , мм
ПКБ-3-50	50	235-345	3	15	3
ПКБ-5-50	50	235-345	5	20	3
ПКБ-5-100	100	235-345	5	20	3
ПКБ-10-100	100	235-345	10	25	3
ПКБ-10-200	200	235-345	10	25	4,5
ПКБ-10-400	400	235-345	10	25	7,5
ПКБ-15-100	100	235-345	15	30	2,5
ПКБ-15-200	200	235-345	15	30	3,5
ПКБ-15-400	400	235-345	15	30	6
ПКБ-20-200	200	235-345	20	35	3
ПКБ-20-400	400	235-345	20	35	4,5
ПКБ-30-200	200	235-345	30	45	2,5
ПКБ-30-400	400	235-345	30	45	3,5

Назва тензорезисторів розшифровується так:

ПКБ-3-50 – дротові з константану на паперовій основі з папіросного паперу; база – 3 мм, опір 50 Ом.

ПКБК – дровові з константану на паперовій основі з конденсаторного паперу.

ПКБТ – дровові з константану на паперовій основі [15].

Фольгові тензорезистори виготовляють з тензорешіткою із тонкого металу (фольги) товщиною 5 – 10 мкм. Основою тензорезистора є плівка з синтетичної смоли або паперу. Товщина плівки 30 – 40 мкм, паперу 80 – 100 мкм; виводи тензорезисторів виготовляють з мідного дроту діаметром 0,12 – 0,15 мм.

Порівняно з петльовими дрововими фольгові тензорезистори мають кращі технічні параметри і допускають виготовлення решітки практично будь-якої форми. Завдяки кращій теплопровідності, вони дають можливість підняти допустимий робочий струм і значно підвищити рівень вихідного сигналу. У фольгових тензорезисторів значно менша чутливість до поперечних деформацій.

Технологія виготовлення фольгових тензорезисторів основана на використанні фотохімічних процесів.

Основні типи фольгових тензорезисторів подано на рис. 2.24.

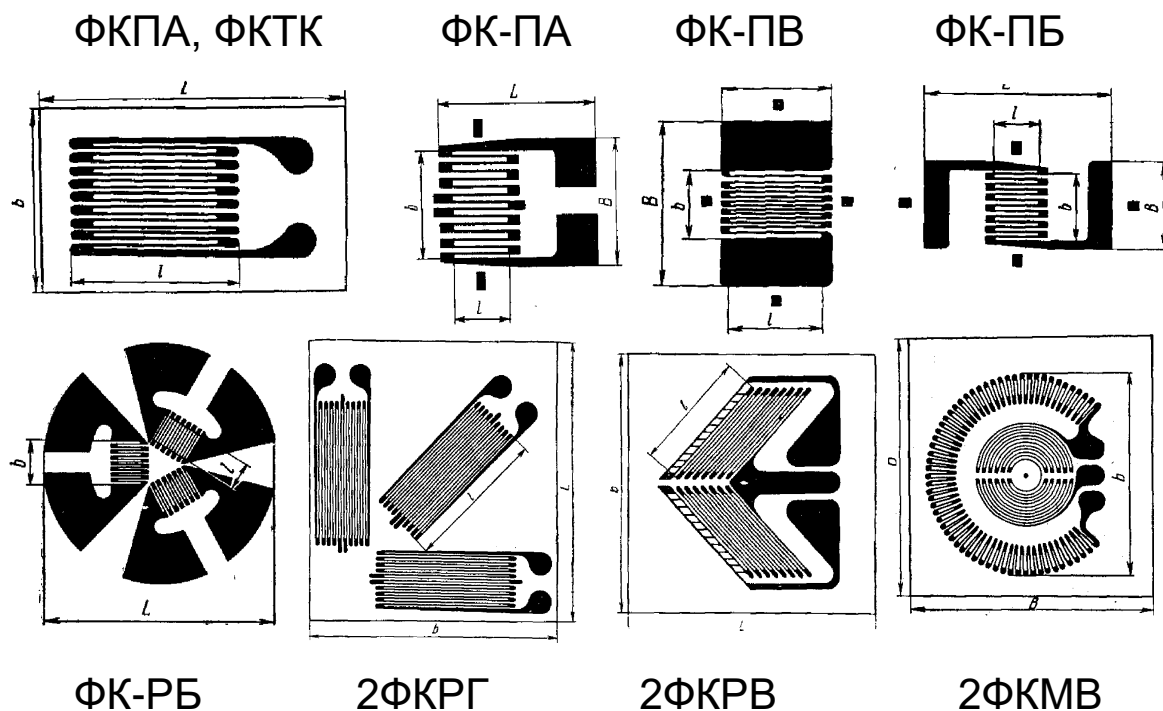


Рис. 2.24. Основні типи фольгових тензорезисторів

Основні технічні параметри деяких типів тензорезисторів наведено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Технічні характеристики фольгових тензорезисторів 2ФКПА

Опір R, Ом	Робочий струм I, мА	Робочий діапазон температур T, °К	Габаритні розміри, мм		
			l	L	b
50	15	235-345	1	7	5
100	15	235-345	3	9	6
50	15	235-345	5	11	8
100	40-50	235-345	5	11	9,5
200	15	235-345	5	11	6
50	15	235-345	10	20	11
100	15	235-345	10	20	13
200	40-50	235-345	10	20	13
100	40-50	235-345	20	30	9
200	40-50	235-345	20	30	15

Розміри та технічні характеристики інших типів тензорезисторів наведено у літературі [15].

### Основи теорії вимірювання тензорезисторними перетворювачами

В основі роботи тензорезисторів лежить властивість деяких матеріалів змінювати свій електричний опір під дією прикладеної сили. Тензорезистори жорстко закріплюються за допомогою клею до пружно деформованої деталі. Стискання або розтягування деталі приводить до пропорційного стискання або розтягування тензорешітки, при цьому змінюється її довжина, поперечний переріз та питомий опір, змінюється електричний опір дроту або фольги, з якої виготовлений тензорезистор. Так, якщо у вихідному стані електричний опір дроту дорівнює

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.33)$$

де  $R$  - електричний опір дроту тензорезистора;  
 $\rho$  - питомий опір матеріалу дроту;  
 $l$  - початкова довжина деформованої ланки дроту;  
 $S$  - площа перерізу дроту,

то при розтягуванні дроту його опір зміниться на величину  $\Delta R$  і складе  $R + \Delta R$ .

Відносна зміна опору тензорезистора визначається співвідношенням

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l}(1 + 2\mu), \quad (2.34)$$

де  $\Delta l$  - зміна довжини;  
 $\mu$  - коефіцієнт Пуассона.

Частка від ділення відносної зміни опору  $\Delta R/R$  на відносну зміну довжини провідника  $\varepsilon = \Delta l/l$  у межах пружної деформації характеризується постійною величиною, яка дорівнює

$$\frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = k \quad (2.35)$$

і одержала назву **коефіцієнта тензочутливості**. Коефіцієнт тензочутливості наряду з номінальним опором  $R$  та довжиною тензорешітки (базою)  $l_p$  є основною характеристикою тензорезистора. Величина коефіцієнта тензочутливості  $k$  залежить від властивостей матеріалу, з якого тензорезистор виготовлений.

За одиницю деформації прийнята одиниця відносної деформації (ОВД), яка дорівнює 1 ОВД =  $10^{-6}$  відносної деформації, що відповідає закордонним одиницям відносної

деформації “мікрострейн” (microstrain) =  $10^{-6}$  відносних одиниць, ppm (part per million) = млн<sup>-1</sup> або мкм/м [15].

Зміна опору тензорезисторів під дією деформацій та навантажень, під час роботи тензорезисторних вимірювальних перетворювачів систем автоматики БШМ, дуже мала, від  $10^{-6}$  Ом до  $10^{-1}$  Ом. Для вимірювання таких змін опору використовують дві основні схеми: потенціометричну та мостову (рис. 2.25).

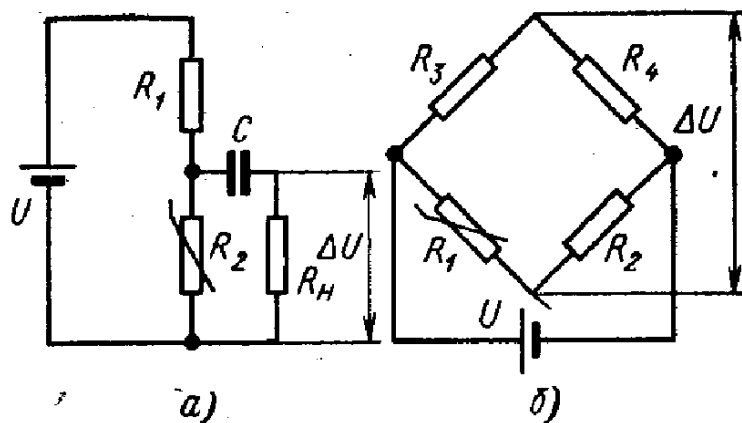


Рис. 2.25. Схеми включення тензорезисторів  
а – потенціометрична; б – мостова

Потенціометрична схема (рис. 2.25, а) складається з джерела живлення і послідовно з'єднаних тензорезисторів  $R_1$  і  $R_2$ , один з яких  $R_2$  є активним, тобто змінює свій опір в результаті деформації на величину  $\Delta R_2$ , а тензорезистор  $R_1$  є пасивним елементом ( $R_1 = \text{const}$ ). Якщо опір  $R_H$  навантаження значно більше опору активного тензорезистора ( $R_H \gg R_2$ ), то напруга сигналу складає

$$\Delta U \approx U \frac{R_1 \Delta R}{(R_1 + R_2)^2} = U \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \frac{\Delta R_2}{R_2} = U \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} k \varepsilon. \quad (2.36)$$

Таким чином, величина вихідного  $\Delta U$  сигналу визначається напругою джерела живлення, співвідношенням  $R_1$  і  $R_2$  та пропорційна деформації.

Більш досконалою є мостова схема (рис. 2.25, б). Умовою врівноваження моста є відоме співвідношення

$$R_1 R_4 = R_3 R_2. \quad (2.37)$$

Напруга на виході попередньо збалансованого моста при одному активному тензорезисторі  $R_1$  буде дорівнювати

$$\Delta U = U \left( \frac{R_1 \pm \Delta R_1}{R_1 \pm \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right). \quad (2.38)$$

При умові, що активні тензорезистори включені у два суміжних плеча, причому  $R_1$  і  $R_4$  при деформації збільшуються, а  $R_2$  і  $R_3$  – зменшуються, то напруга на виході моста буде дорівнювати

$$\Delta U_4 = U \frac{\Delta R}{R}. \quad (2.39)$$

Порівняно з попередньою схемою, при інших рівних умовах, мостова схема має більшу чутливість і дає сигнал на виході більше в чотири рази.

Наприклад, визначимо напругу на виході моста при навантаженні сталюого стержня, який має площу перерізу  $S=10 \text{ см}^2$ , силою  $F=2100 \text{ Н}$ .

Напруга в матеріалі стержня

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{2100}{10 \cdot 10^{-4}} = 2100000 \text{ Н/м}^2 = 2,1 \text{ МПа}.$$

При модулі пружності  $E=210 \text{ ГПа}$  відносна деформація складає

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{2,1}{210 \cdot 10^3} = 10 \cdot 10^{-6}.$$

При коефіцієнті тензочутливості  $k=2$  відносна зміна опору дорівнює

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 20 \cdot 10^{-6}.$$

При опорі тензорезистора  $R=200$  Ом, максимальному струмі  $I_{\max}=30$  мА напруга живлення моста повинна бути

$$U = 2I_{\max}R = 2 \cdot 0,03 \cdot 200 = 12 \text{ В}.$$

Напруга сигналу при одному активному тензорезисторі

$$V = \frac{U}{4} \frac{\Delta R}{R} = \frac{12}{4} \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 60 \text{ мкВ},$$

а при чотирьох  $V = 0,24 \text{ мВ}$ .

### Чутливі елементи з тензорезисторними перетворювачами

Чутливі елементи з використанням тензорезисторів перетворюють механічну величину, що вимірюється, в зміну опору. На рис. 2.26 показані схеми чутливих перетворювачів механічних величин, що найчастіше використовуються у системах автоматичного керування.

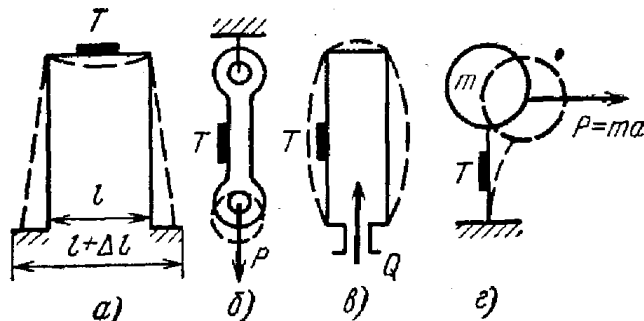


Рис. 2.26. Схеми чутливих пружних елементів з тензорезисторами:

а – пересування; б – зусиль; в – тиску; г – прискорення;  
Т – тензорезистори



## Чутливі елементи вимірювальних перетворювачів пересування

Чутливі елементи для вимірювання пересування дуже різноманітні. Найчастіше в системах автоматики БШМ використовують елементи балочного, кільцевого, мембранного типів.

Коефіцієнт перетворення тензорезисторних вимірювальних перетворювачів у статичному режимі визначається співвідношенням, ОВД·мм<sup>-1</sup>,

$$K_{nn} = \frac{n\varepsilon_t}{\delta}, \quad (2.40)$$

де  $K_{nn}$  - коефіцієнт перетворення;

$n$  - кількість активних плеч тензорезисторного моста (звичайно вибирають  $n=1, 2, 4$ );

$\varepsilon_t$  - деформація чутливого елемента;

$\delta$  - пересування, яке вимірюється.

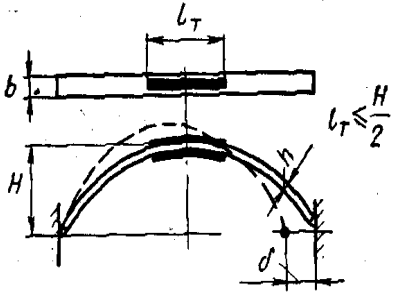
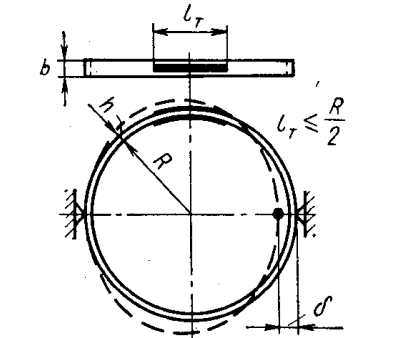
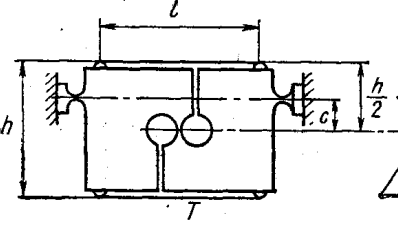
Вибір розмірів чутливих елементів тензорезисторних перетворювачів здійснюється за допомогою наведених нижче залежностей для датчиків пересування, які найчастіше використовують у системах автоматики БШМ. Задаючись значеннями  $\delta$  та  $\varepsilon_t$ , визначають чисельну величину  $K_{nn}$ . За допомогою табл. 2.4, задаючись одним з розмірів, визначають інші розміри перетворювачів пересування.

Таблиця 2.4.

## Основні схеми вимірювальних перетворювачів пересування

Номер схеми	Розрахункова схема	Коефіцієнт перетворення $K_{nn}$ , ОВД·мм <sup>-1</sup>	Пружна реакція $r$ , Н
1	2	3	4
1		$1,5 \cdot 10^6 \frac{nh \left[ 1 - \left( a_T + \frac{l_T}{2} \right) \right]}{l}$ <p>де <math>n</math> - число активних плеч тензомоста</p>	$\frac{0,25 \cdot 10^3 bh \delta}{l^3} E,$ <p>де <math>E</math> – модуль пружності, МПа</p>
2		$10^6 \frac{nh}{l^2}$	$\frac{0,17 \cdot 10^3 b_0 h^3 \delta}{l^3} E$
3		$10^6 \frac{nh}{(l - a_T)^2 (1 + a_c)}$ <p>де <math>a_c</math> - коефіцієнт деформативності пружного зв'язку:</p> $a_c = \frac{10^6 \cdot l^3}{b(l - a_T)^2} -$	$\frac{0,17 b_0 h^2 \delta}{(l - a_T)^3} E$
4		$10^6 \frac{nh}{2l^2}$	$\frac{0,9 \cdot 10^2 b_0 h^3 \delta}{l^3} E$

Продовження табл. 2.4

1	2	3	4
5		$7 \cdot 10^6 \frac{nh}{2H^2}$	$\frac{0,6 \cdot 10^3 bh^3 \delta}{R^3} E,$ <p>де R - радіус кривини</p>
6		$7 \cdot 10^6 \frac{nh}{4R^2}$	$\frac{0,6 \cdot 10^3 bh^3 \delta}{R^3} E$
7		$10^6 \frac{2h}{2lc}$	-

Вибір оптимальних розмірів вимірювальних перетворювачів можна проводити і за допомогою номограм. Приклад найпростішої номограми для вибору розмірів консольних чутливих елементів у вигляді балки рівного опору згину, а також для оцінки її реакції ( $r$ ) подано на рис. 2.27.

На номограмі показано порядок визначення довжини і характеристики жорсткості чутливого елемента, який призначений для вимірювання пересування до  $\delta_{max} = 10,0$  мм.

Наприклад, задаючись товщиною чутливого елемента  $h=4$  мм, знаходимо з номограми розмір  $l=125$  мм і величину  $r=63$  Н.

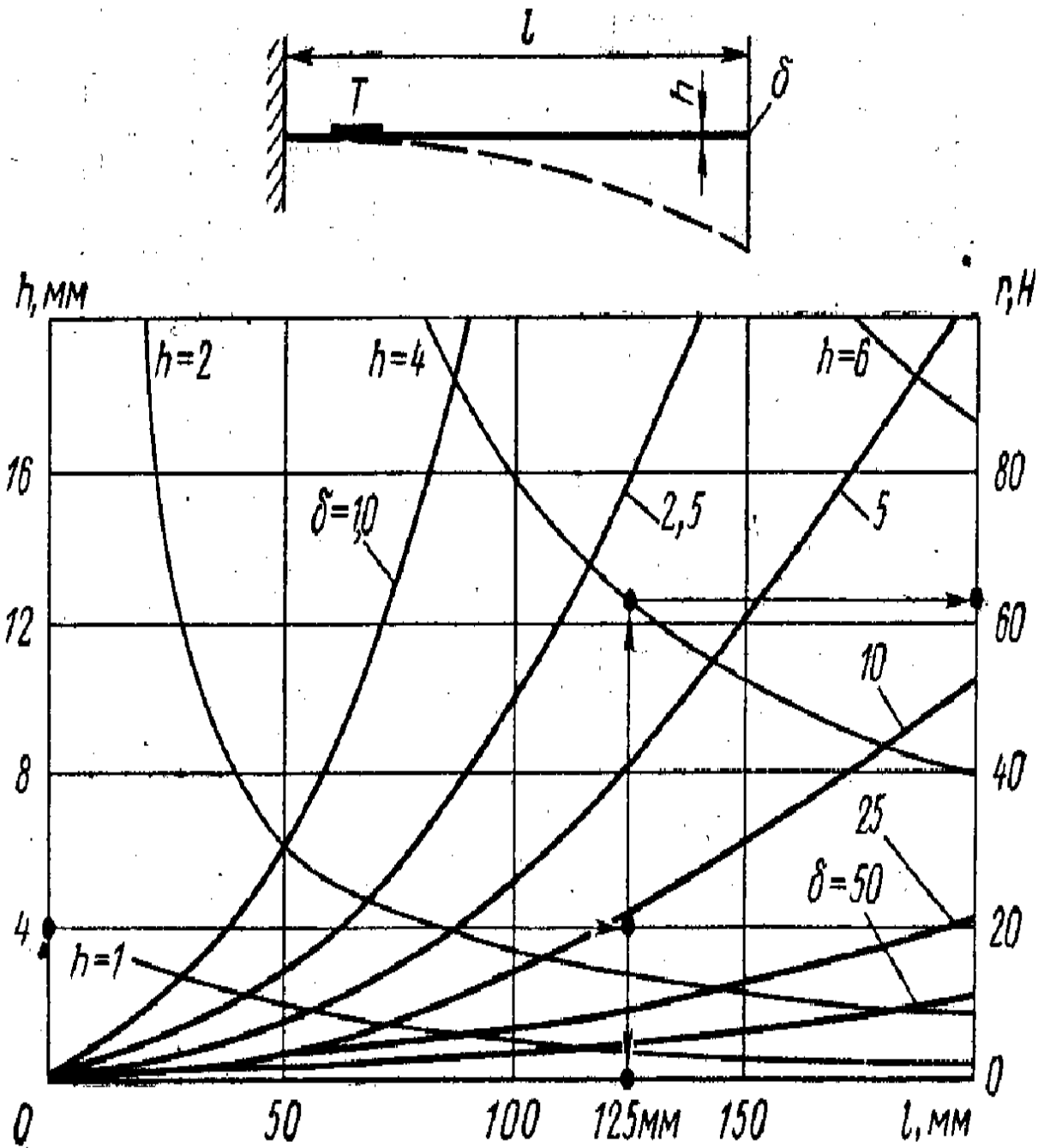


Рис. 2.27. Номограма для вибору розмірів консольних чутливих елементів перетворювачів пересування (ширина чутливого елемента  $b=6$  мм;  $T$  - тензорезистор)

## Чутливі елементи вимірювальних перетворювачів зусиль

Вимірювання зусиль здійснюється двома способами [15]. Перший спосіб оснований на вимірюванні деформацій (тензометруванні) вузлів, які передають або сприймають зусилля. Можливість використання у системах автоматики БКВРМ цього способу вимірювання зусиль обмежена деякими умовами:

- матеріал деталей та вузлів, які сприймають зусилля, повинен обиратися у межах пружності, інакше, внаслідок гістерезису, можливі значні похибки при вимірюванні;
- форма деталей повинна бути досить простою для того, щоб зусилля та деформації можна було визначити розрахунковим шляхом;
- деталі та вузли, що тензометруються, повинні легко зніматися для проведення градування та тарування;
- робочий переріз деталей, що тензометруються, повинен бути таким, щоб при дії максимального зусилля напруження було не менш як 0,05-0,06 ГПа (для сталі).

Другий спосіб заснований на використанні спеціального тензорезисторного перетворювача сили, який встановлюється в розрив силової ланки. При порівнянні двох означених способів перевагу слід віддати другому способу, який дає більшу точність результатів вимірювання і дозволяє тарувати вимірювальні перетворювачі до установлення на об'єкт автоматизації. Це відповідає вимогам масового виробництва систем автоматики БШМ.

У табл. 2.5 подані основні конструкції чутливих елементів тензорезисторних вимірювальних перетворювачів та формули для їх розрахунків. Коефіцієнти перетворення відповідають співвідношенню

$$K_{n.c} = \frac{n\varepsilon_t}{P} \text{ овд} \cdot \text{Н}^{-1}, \quad (2.41)$$

де  $K_{n.c}$  - коефіцієнт перетворення сили;

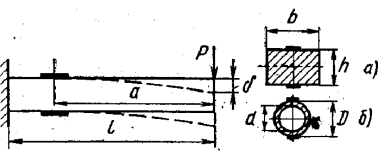
$P$  - сила, яка вимірюється;

$n$  - кількість активних плеч тензорезисторного моста (звичайно вибирають  $n=1, 2, 4$ );

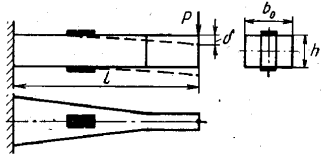
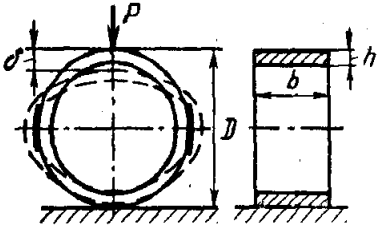
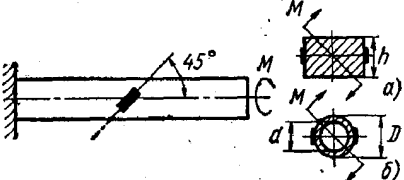
$\varepsilon_t$  - деформація чутливого елемента.

Таблиця 2.5.

Основні схеми вимірвальних перетворювачів сили та моменту

Номер схеми	Розрахункова схема	Коефіцієнт перетворення $K_{n.c}$ , ОВД·Н <sup>-1</sup>	Деформація (прогин) чутливого елемента $\delta$ , мм
1	2	3	4
1.		$\frac{10^3 n(1 + \mu)}{EF}$ <p>де <math>n</math> - кількість активних плеч моста,  <math>F</math> - площа поперечного перерізу:  <math>F_a = bh</math>;  <math>F_b = \pi(D^2 - d^2)/4</math>;  <math>F_B = bh - 2b_1h_1</math>  <math>E</math> - модуль пружності, Гпа;  <math>\mu</math> - коефіцієнт Пуассона</p>	$\frac{lP}{10^3 EF}$ <p>де <math>P</math> - сила, Н</p>
2.		<p>Для перерізу а)  <math display="block">6 \cdot 10^3 \frac{na}{bh^2 E}</math></p> <p>Для перерізу б)  <math display="block">\frac{32}{\pi} \cdot \frac{10^3 nDa}{(D^4 - d^4)E}</math></p>	<p>Для а) <math>\frac{4l^3 P}{10^3 bh^3 E}</math>          Для б) <math>\frac{64}{3\pi} \cdot \frac{7l^3 P}{10^3 (D^4 - d^4) E}</math></p>

Продовження табл. 2.5

1	2	3	4
3.		$6 \cdot 10^3 \frac{nl}{b_0 h^2 E}$	$\frac{6l^3 P}{10^3 b_0 h^3 E}$
4.		$1,5 \cdot 10^3 \frac{D(\pi - 2)}{\pi b h^2 E}$	$\frac{1,5 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) D^3 P}{10^3 b h^3 E}$
5.		<p>Для а)</p> $0,5 \cdot 10^3 \frac{nL}{h^2 b g G'}$ <p>де <math>L = M/P</math> - плече прикладення сили;  <math>M</math> - момент сили, Н м;  <math>G</math> - модуль зсуву, ГПа;  <math>g</math> - коефіцієнт,  <math>g=0,209</math> при <math>b/h=1</math>;  <math>g=0,269</math> при <math>b/h=3</math>;  <math>g=0,312</math> при <math>b/h=10</math>.</p> <p>Для б)</p> $\frac{8}{\pi} 10^3 \frac{nLD}{(D^4 - d^4) G}$	<p>Кут закручування, рад</p> <p>Для а)</p> $\frac{16ML}{hb^3 \left[ 5,3 - 3,6 \frac{b}{h} \left( 1 - \frac{0,08b^4}{h^4} \right) \right] G}$ <p>Для б)</p> $\frac{32ML}{\pi(D^4 - d^4) G}$

## Конструкції вимірювальних перетворювачів Конструкції вимірювальних перетворювачів пересування

Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі пересування з консольними чутливими елементами (рис. 2.28) дозволяють вимірювати деформації на поверхні деталей БШМ з матеріалів, у яких модуль пружності більше 1ГПа.

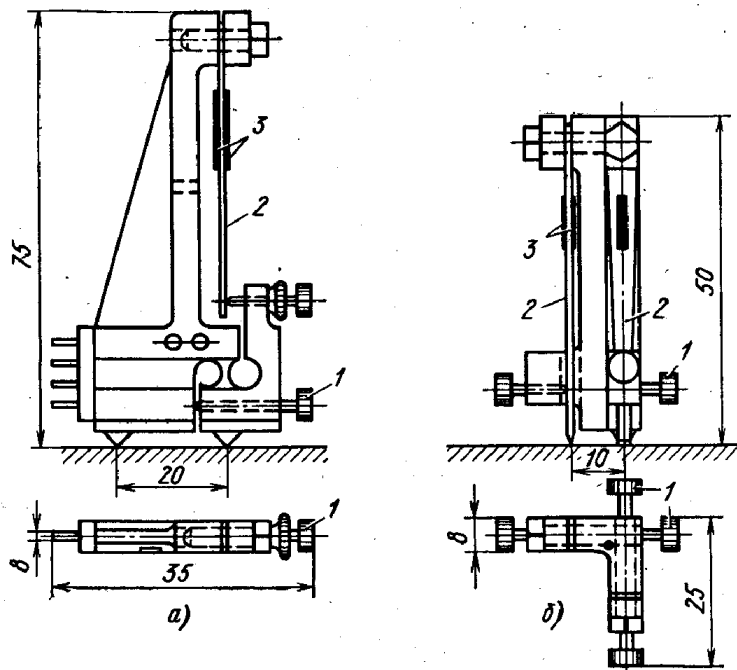


Рис. 2.28. Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі пересування (тензометри):

- а) – для вимірювання лінійних переміщень на базі 10 – 20 мм;
- б) – для вимірювання лінійних переміщень у двох взаємно перпендикулярних напрямках на базі 10 мм;
- 1 – регулюючі гвинти; 2 – консольні чутливі елементи;
- 3 – тензорезистори

Обидва типи перетворювачів мають регулюючі гвинти для початкового вигину чутливих елементів у потрібний бік. Діапазон вимірювань переміщень – до  $\pm 10^3$  ОВД, коефіцієнт перетворення –  $10 - 50 \cdot 10^6$  ОВД/мм.



Індикатори переміщень, які подані на рис. 2.29, призначені для вимірювання переміщень деталей машин до 1 – 10 мм при коефіцієнті перетворення  $5 - 20 \cdot 10^3$  ОВД/мм.

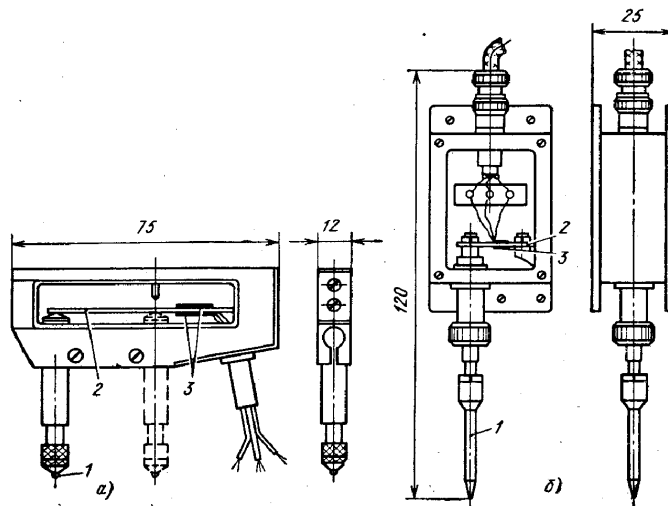


Рис. 2.29. Тензорезисторні вимірювальні перетворювачі пересування (індикатори):

а – з консольним чутливим елементом; б – з заземленим чутливим елементом; 1 – упорний штифт; 2 – чутливий елемент; 3 – тензорезистори

Вимірювальні перетворювачі такого типу використовують для вимірювання ексцентричності та биття валів.

Для вимірювання переміщень більшої величини, а також прогину елементів машин та механізмів використовують перетворювачі, конструкції яких показані на рис. 2.30.

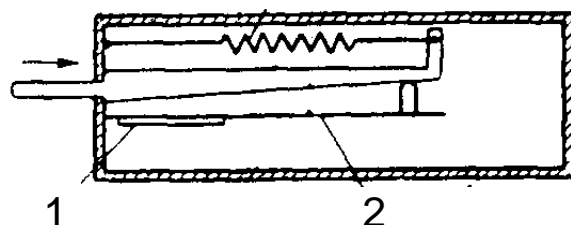


Рис. 2.30. Вимірювальний перетворювач пересування:  
1 – тензорезистор; 2 – чутливий елемент

Для вимірювання вигину у межах 2,5 – 25 мм використовують електромеханічні тензорезисторні перетворювачі переміщень (прогиноміри), одна з конструкцій яких подана на рис. 2.31.

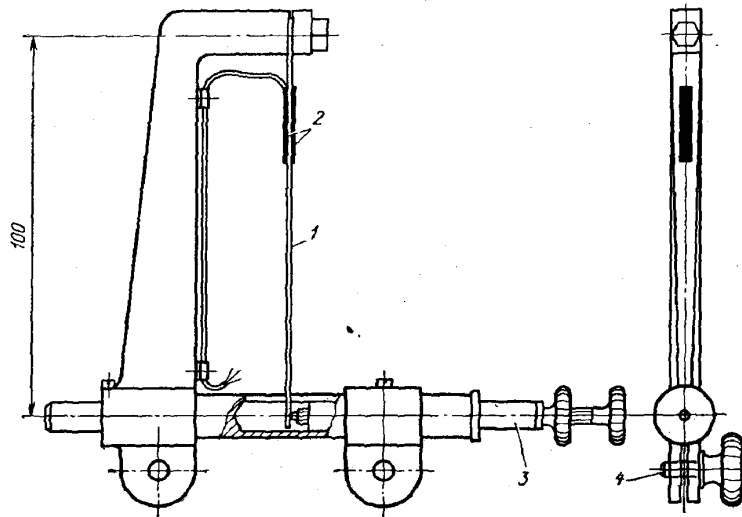


Рис. 2.31. Тензорезисторний перетворювач переміщення (прогиномір)

1 – чутливий елемент; 2 – тензорезистори; 3 – регулюючий гвинт;  
4 – встановлюючий гвинт

Коефіцієнт перетворення для таких датчиків дорівнює  $5 - 20 \cdot 10^3$  ОВД/мм.

### Конструкції вимірювальних перетворювачів зусиль

Промисловість випускає цілий ряд перетворювачів сили, які призначені як для вимірювання зусиль, які розтягують, так і для стискальних зусиль. При вимірюванні зусиль 1 – 10 кН використовують кільцеві чутливі елементи, при навантаженні 20 – 500 кН – стержневі. Перетворювачі для вимірювання стискальних зусиль позначаються літерою С, для зусиль, що розтягують, – Р, універсальні – У. В табл. 2.6 подані технічні дані перетворювачів для вимірювання сили [16].

Таблиця 2.6

## Технічні характеристики перетворювачів сили типу У, С, Р

Умовне позначення	Максимальне зусилля кН	Максимальна частота, Гц	Габаритні розміри, мм				Маса, кг	Рисунок
			L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	B	D		
У-0,1	1	50	114	120	114	90	5	9а
У-0,2	2	50	114	120	114	90	5	9а
У-0,5	5	50	114	120	114	90	5	9а
У-1	10	50	114	120	114	90	5	9а
У-2	20	225	136	143	152	120	7,5	9б
У-5	50	175	167	174	174	140	11	9б
У-10	100	175	202	209	196	160	16	9б
У-20	200	500	246	254	213	176	23	9б
С-0,1	1	50	108	114	114	90	5	9в
С-0,2	2	50	108	114	114	90	5	9в
С-0,5	5	50	108	114	114	90	5	9в
С-1	10	50	108	114	114	90	5	9в
С-2	20	225	122	127	140	115	6,5	9а
С-5	50	175	150	156	162	128	9,5	9а
С-10	100	175	184	192	178	145	14,5	10а
С-20	200	500	190	198	172	140	16	10б
С-50	500	300	184	192	160	135	14,5	10в
Р-50	500	300	166	325	164	140	17	10г

Конструкції вимірювальних тензорезисторних перетворювачів сили подані на рис. 2.32 та 2.33. Опори діагоналей моста: живлення – 95, 190, 380 Ом; вимірювальної – 110, 220, 400 Ом. Напряга живлення – 4, 8, 12 В.

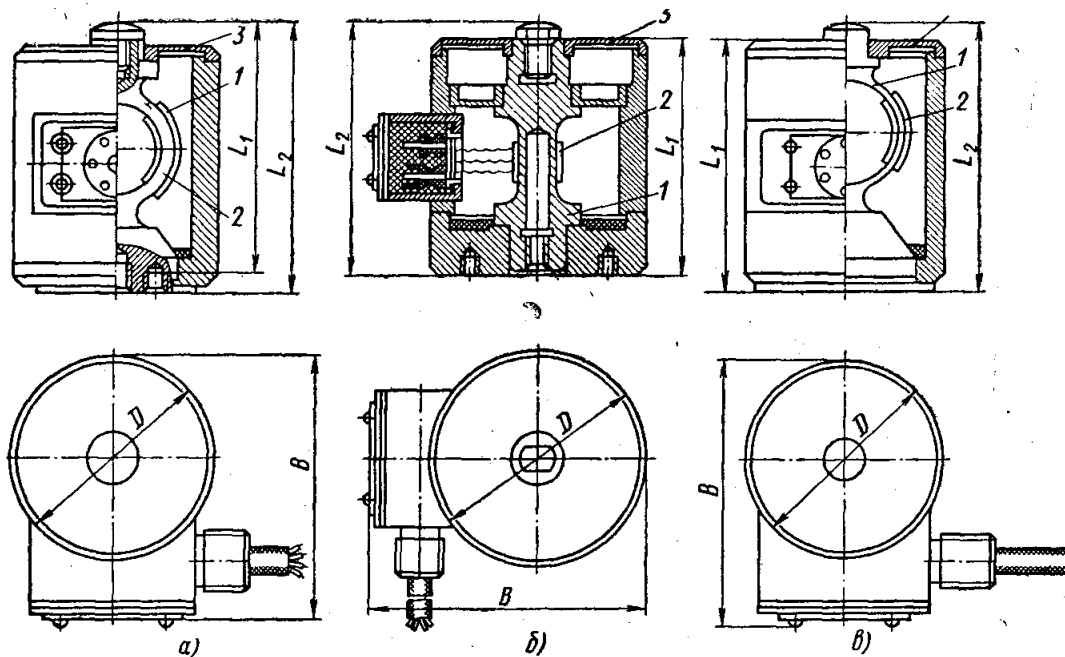


Рис. 2.32. Тензорезисторні перетворювачі сили:  
 а – типу У з кільцевим чутливим елементом; б – типу У з чутливим елементом у формі порожнистого стержня; в – типа С з кільцевим чутливим елементом; 1 – чутливий елемент; 2 – тензорезистори; 3 – мембрана

Для вимірювання зусиль у діапазоні 0,5 – 4000 кН використовують датчики зусиль типу ТДС з чутливим елементом у формі порожнистого стержня (рис. 2.34). Зусилля сприймається сферичною опорою чутливого елемента. По перерізу А-А на поверхні чутливого елемента розташовано 8 тензорезисторів. Тензорезистори 2 є активними, а тензорезистори 3, які наклеєні перпендикулярно напрямку дії стискаючої сили, є термокомпенсаційними.

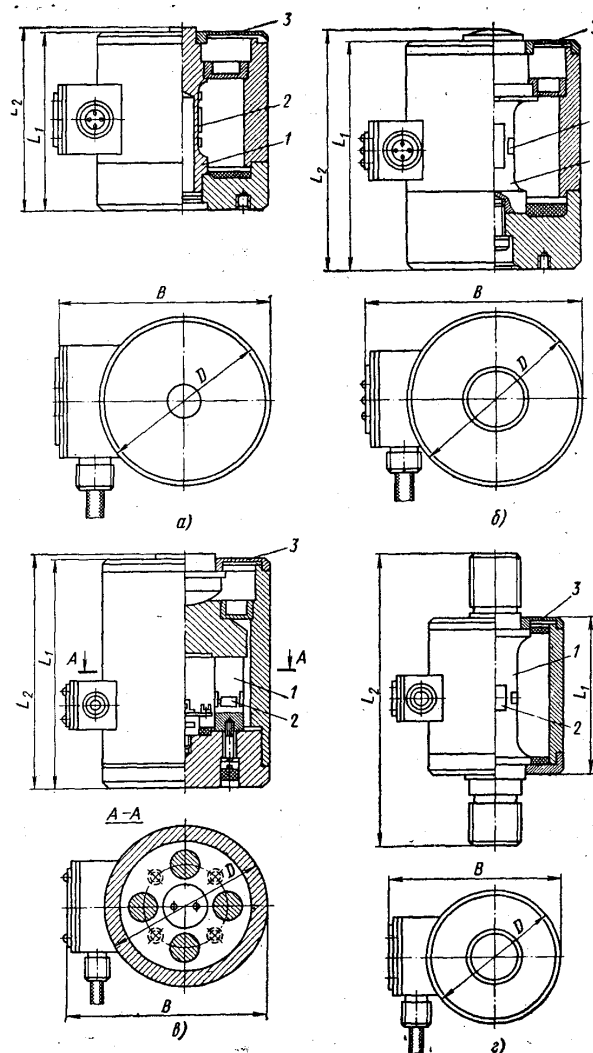


Рис. 2.33. Тензорезисторні силовимірювачі  
 а – типу С з чутливим елементом у формі порожнистого стержня;  
 б – типу С з чутливим елементом у формі суцільного стержня;  
 в – типу С з багатостержневим чутливим елементом;  
 г – типу Р з чутливим елементом у формі суцільного стержня;  
 1 – чутливий елемент; 2 – тензорезистори;  
 3 – мембрана

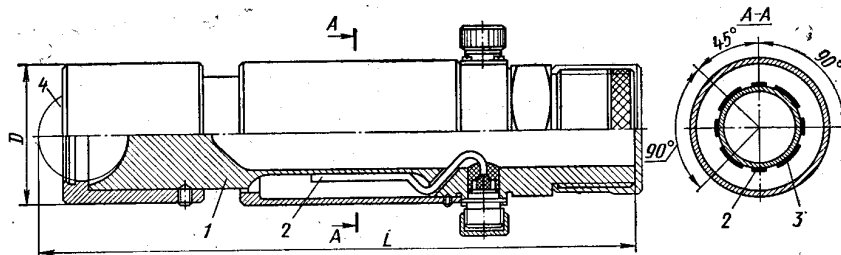


Рис. 2.34. Тензорезисторний датчик зусиль типу ТДС:  
 1 – чутливий елемент; 2 – активні тензорезистори (наклеєні вздовж  
 осі стержня); 3 – компенсаційні тензорезистори (наклеєні поперек осі  
 стержня); 4 – сферична опора

Основні технічні характеристики тензорезисторних вимірювальних перетворювачів типу ТДС подано у табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Технічні характеристики перетворювачів типу ТДС

Умовне позначення	Діапазон вимірювання, кН	Конструктивне виконання чутливого елемента	Габаритні розміри, мм		Маса, кг
			L	D	
ТДС-0,05-0,25	0,5-2,5	Кільце	110	54	0,9
ТДС-0,2-1	2-10	Стержень порожнистий	92	50	0,6
ТДС-1-3	1-30	Стержень порожнистий	94	72	3,3
ТДС-3-12	30-120	Стержень порожнистий	137	80	5
ТДС-10-40	100-400	Стержень суцільний	170	100	6
ТДС-30-120	300-1200	Стержень суцільний	230	110	20,5
ТДС-100-400	1000-4000	Стержень суцільний	322	170	37,8

Примітка: Опір кожного плеча моста  $105 \pm 0,5$  Ом.

Для вимірювання зусиль, які розтягують, використовують вимірювальні перетворювачі з чутливими елементами у формі стержнів, як показано на рис. 2.35. Тензорезистори температурної компенсації приклеєні на сталевих пластинках, які закріплені на чутливому елементі одним кінцем для виключення можливої передачі на них деформації чутливого елемента.

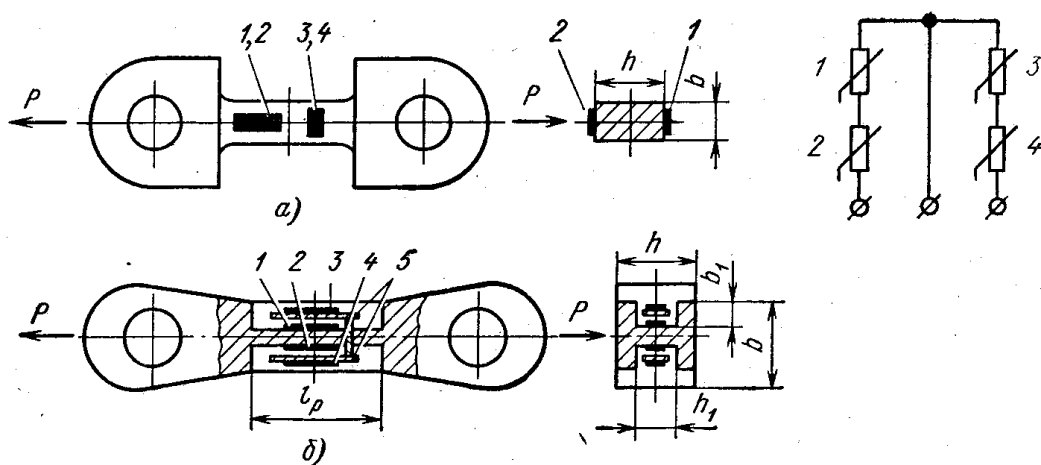


Рис. 2.35. Вимірювальний перетворювач зусиль, які розтягують:

а) – чутливий елемент прямокутної форми; б) – чутливий елемент у формі двотавра; 1, 2 – активні тензорезистори; 3, 4 – тензорезистори температурної компенсації; 5 – пластинки температурної компенсації

### Конструкції вимірювальних перетворювачів тиску

На рис. 2.36 показано конструкції тензометричних ВПТ для вимірювання відносно низького тиску у діапазоні 0 – 1 МПа.

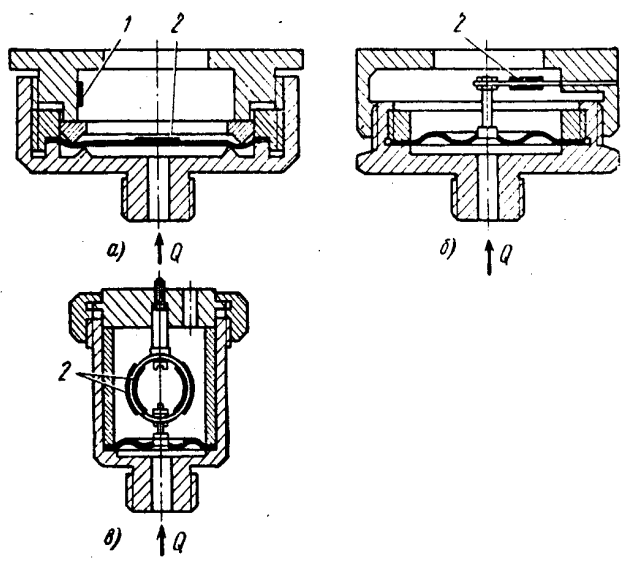


Рис. 2.36. Конструкції тензометричних ВПТ низького тиску:  
 а - з натягнутою площинною мембраною; б – з гофрованою мембраною та консольним чутливим елементом;  
 в – з гофрованою мембраною та кільцевим чутливим елементом;  
 1 – компенсаційні тензорезистори; 2 – активні тензорезистори

Чутливим елементом перетворювача, який показано на рис. 2.36 а, є мембрана. Активний тензорезистор 2 наклеюють на мембрану. Тензорезистор 1 температурної компенсації наклеюють на натискну гайку. Якщо прогин мембрани під дією номінального тиску не перевищує половини її товщини, то характеристика перетворювача буде практично лінійною. При цьому діаметр мембрани повинен бути більше її товщини хоча б у 10 разів [13].

На рис. 2.36 б і в показано конструкції тензометричних перетворювачів тиску, в яких мембрана перетворює тиск у переміщення і передає його проміжному перетворювачу переміщення, на якому наклеєні тензорезистори. Найбільшу жорсткість та найбільш високу власну частоту має ВПТ з кільцевим проміжним перетворювачем переміщень (рис. 2.36, в).

На рис. 2.37 показано конструкції перетворювачів для вимірювання тиску більше 1 МПа.

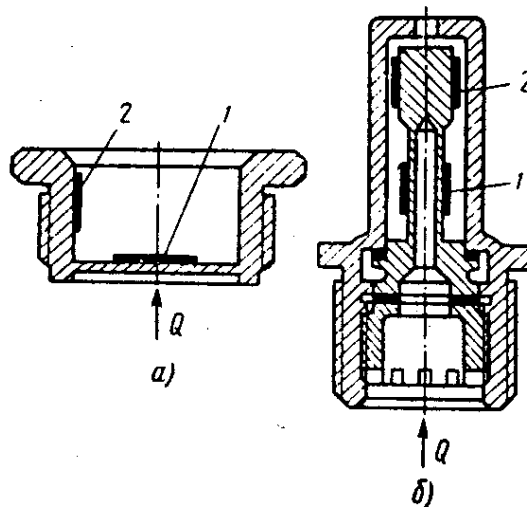


Рис. 2.37. Конструкції тензометричних перетворювачів для вимірювання відносно високого тиску:

- а – з площинною мембраною в ролі чутливого елемента;
- б – з циліндричним чутливим елементом; 1 – активні тензорезистори; 2 – компенсаційні тензорезистори

Перетворювач, який показано на рис. 2.37 а, має чутливий елемент у вигляді стакана, на дно якого приклеєний активний тензорезистор 1. Такий ВПТ має досить високу власну частоту; наприклад, при діаметрі



мембрани 20 мм, товщині 3 мм власна частота перетворювача 30 кГц.

Перетворювач, який показано на рис. 2.37 б, має чутливий елемент у вигляді циліндра, в середній частині циліндра наклеєний активний тензорезистор 1, а у верхній, масивній частині – тензорезистори температурної компенсації.

Деякі тензорезисторні перетворювачі випускаються серійно. Так, на рис. 2.38 показані конструкції перетворювачів тиску типу ТДД (рис. 2.38, а) та ТДДМ (рис. 2.38, б).

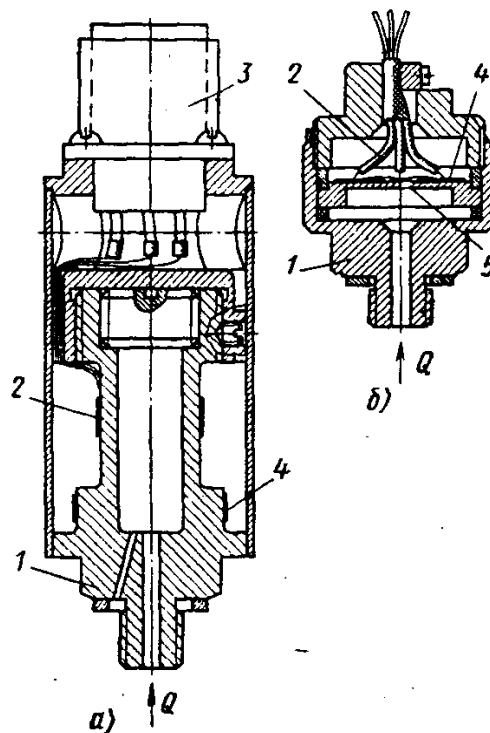


Рис. 2.38. Тензорезисторні перетворювачі тиску:  
а – типу ТДД; б – типу ТДДМ; 1 – корпус; 2 – активний тензорезистор; 3 – штепсельний роз'єднувач; 4 – компенсаційний тензорезистор; 5 – мембрана

Перетворювачі типу ТДДМ розраховані для вимірювання тиску від 0,5; 1; 2,5 МПа, перетворювачі типу ТДД – для вимірювання тиску до 5; 10; 20 або 40 МПа. У цих перетворювачах використовують тензорезистори номінальним опором 100 або 200 Ом. Чутливі елементи розраховані на 25 % перевантаження. Перетворювачі мають уніфіковану різьбу (М12×1,25) для підключення до об'єкта.

### 2.2.5. Пружинні вимірювальні перетворювачі тиску

Пружинні вимірювальні перетворювачі тиску (ВПТ) призначені для вимірювання тиску у системах автоматики підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх та меліоративних машин. Робота пружинних ВПТ основана на тому, що спеціальний елемент (пружина) деформується під дією тиску. Пружинні ВПТ працюють за принципом врівноваження вимірюваного тиску силою пружності чутливого елемента. В ролі таких елементів використовуються одновіткові пружини (трубка Бурдона), багатовіткові пружини (гелікоїдальні), площинні мембрани та гармонікові мембрани.

Найбільше розповсюдження мають прості, надійні та дешеві ВПТ з одновітковою трубчастою пружиною (рис. 2.39). Трубчаста пружина 1 одним кінцем впаяна у тримач 2, який закінчується ніпелем 3 з різьбою для приєднання до джерела тиску, який вимірюється. Другий кінець пружини запаяний та з'єднаний з передавальним механізмом, до складу якого входять поводок 4, сектор 5, трубка 6, на вісь якої насаджена стрілка, яка вказує на шкалі величину тиску.

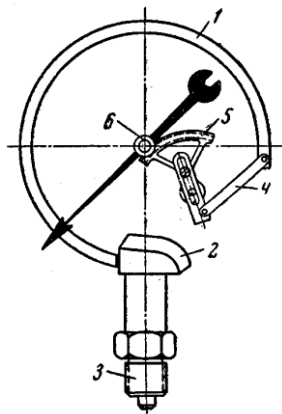


Рис. 2.39. Манометр з одновітковою пружиною

Принцип дії манометра оснований на тому, що під дією тиску рідини, яка подається до внутрішньої порожнини, трубка некруглого перерізу розкручується. Трубка круглого

перерізу під дією внутрішнього тиску не змінює своєї кривини.

За класами точності (ГОСТ 13600-68) манометри розподіляються на: 0,16; 0,25; 0,4; 1,0; 1,5; 2,5; 4. Клас точності манометра визначає приведену допустиму похибку і чисельно дорівнює їй. Для кожного манометра допустима абсолютна похибка  $\Delta$  однакова для всього діапазону вимірювань, залежить від класу точності приладу і кінцевого значення шкали, а відносна похибка  $\delta$  зменшується зі збільшенням величини, що вимірюється. Тому робити вимірювання на початковій ланці шкали недоцільно. Так, наприклад, при вимірюванні тиску  $40 \text{ кГ/см}^2$  манометром класу точності 1,0 при кінцевому значенні шкали  $60 \text{ кГ/см}^2$  допустимі похибки складають:  $\Delta = 0,6 \text{ кГ/см}^2$  і  $\delta = 1,2\%$ , а при кінцевому значенні шкали  $160 \text{ кГ/см}^2$  – відповідно  $\Delta = 1,6 \text{ кГ/см}^2$  і  $\delta = 4,0\%$ . В останньому разі одержана низька точність вимірювання, яка відповідає манометру класу точності 4,0 з кінцевим значенням шкали  $40 \text{ кГ/см}^2$ .

Основні конструктивні схеми пружинних манометрів, їх розміри та типи приєднувальних штуцерів подані у дод. 1 – 3.

Серед ВПТ манометричного типу виділяються манометри з електричним сигналом. В манометрах такого типу використовують електричні вимірювальні системи, які видають сигнал релейного типу або сигнал, пропорційний тиску, який вимірюється. Сигналізуючі манометри призначені для вимірювання тиску і сигналізації про максимальне або мінімальне значення параметра. У приладах типу ЕКМ-1У, ЕКМ-2У, ЕКМВ-1У, ЕКВ-1У, ВЕ-16РБ використовують контактний механізм, який управляється безпосередньо від стрілки манометра. Максимальна робоча напруга складає 220 В, допустима потужність навантаження – 10 Вт. У приладах типу МП4-III, МВП4-III, ВП4-III, МП-IV, МВП4-IV, ВП4-IV використовують умонтований сигнальний пристрій. Допустиме навантаження на сигнальний пристрій складає 40 ВА при

напрузі змінного струму 220 В і 60 Вт при напрузі постійного струму 30 В.

Манометри типу МП4-VI, МВП4-VI, ВП4-VI призначені для вимірювання тиску з видачею сигналу, пропорційного тиску. Вихідний сигнал постійного струму змінюється у діапазоні 0 – 5мА.

### Основні розрахункові залежності

Розрахункова схема манометра з одновітковою пружиною подана на рис. 2.40.

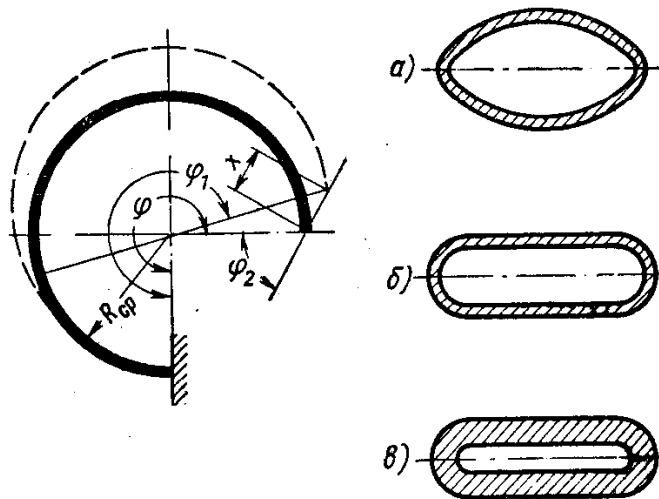


Рис. 2.40. Розрахункова схема манометра з одновітковою пружиною

Для визначення відносної зміни центрального кута трубки манометра з тонкостінною  $\left(\frac{\delta}{b} \leq 0,6 \div 0,7\right)$  еліптичною або площинно-овальною пружиною Бурдона, які показано на рис. 2.40, а і б, під дією тиску треба скористатися формулою [20]

$$\frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi} = p \frac{(1 - \mu^2) R_{cp}^2}{Eb\delta} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{\alpha}{\beta + X^2}, \quad (2.42)$$

де  $\varphi$  - кут повного скручування трубки Бурдона, рад;  
 $\varphi_1$  - кут після деформації, рад;  
 $p$  - тиск, який вимірюється, МПа;  
 $R_{cp}$  - радіус кривизни осі трубки до навантаження, м;  
 $\delta$  - товщина стінки трубки, м;  
 $a$  та  $b$  – найбільша та найменша напівосі перетину трубки, які вимірюються по середньому контуру перетину, м;  
 $\alpha$  та  $\beta$  - коефіцієнти, які залежать від відношення  $a/b$ , визначаються за допомогою табл. 1;  
 $\mu$  - коефіцієнт Пуассона;  
 $X$  - коефіцієнт, який визначається за формулою

$$X = \frac{R_{cp} \delta}{a^2};$$

$E$  - модуль пружності матеріалу пружини, МПа.

Тягове зусилля, яке розвиває кінець пружини при її розкручуванні, визначається за формулами:  
тангенціальна складова

$$F_t = pab \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{48S}{\varepsilon + X^2} \cdot \frac{\varphi - \sin \varphi}{3\varphi - 4 \sin \varphi + \sin \varphi \cos \varphi}; \quad (2.43)$$

радіальна складова

$$F_r = pab \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{48S}{\varepsilon + X^2} \cdot \frac{1 - \cos \varphi}{\varphi - \sin \varphi \cos \varphi}. \quad (2.44)$$

Величини коефіцієнтів  $S$  та  $\varepsilon$  залежать від співвідношення  $a/b$  і знаходяться за допомогою табл. 2.8, де наведені значення коефіцієнтів для розрахункових формул манометричних трубок, які найчастіше використовують у САК БШМ (рис. 2.40, а та б) [21].



Зміна внутрішньої ємності трубки Бурдона при її деформації може бути підрахована за формулою

$$\Delta V = 12p \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot \frac{R_{cp}^3}{\delta} a \varphi \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right)^2 \frac{n}{\beta + X^2}. \quad (2.45)$$

Для ВПТ з товстостінною трубкою, який показано на рис. 2.40, в  $\left( \frac{\delta}{b} \geq 0,6 \div 0,7 \right)$  кут розкручування трубки визначається за формулою

$$\frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi} = p \frac{(1 - \mu^2) R_{cp}^2}{Eb \delta} \cdot \frac{1 - \chi}{\frac{\delta^2}{12b^2} + \chi}. \quad (2.46)$$

Значення  $\chi$  визначається за допомогою графіка, який наведено на рис. 2.41.

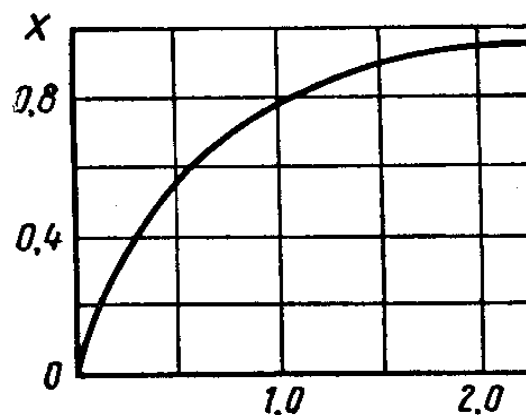


Рис. 2.41. Графік залежності  $\chi=f(x)$

Тягове зусилля, яке розвиває кінець пружини при її розкручуванні, визначається за формулами:  
тангенціальна складова

$$F_t = \frac{1}{6} p a b (1 - \chi) \frac{\varphi - \sin \varphi}{3\varphi - 4 \sin \varphi + \sin \varphi \cos \varphi}; \quad (2.47)$$

радіальна складова

$$F_r = \frac{1}{6} pab(1 - \chi) \frac{1 - \cos \varphi}{\varphi - \sin \varphi \cos \varphi}. \quad (2.48)$$

Повне переміщення кінця одновіткової трубки визначається як сума тангенціального  $x_t$  та радіального  $x_r$  переміщень:

$$x = \sqrt{x_t^2 + x_r^2} = \frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi} R_{cp} \sqrt{(\varphi - \sin \varphi)^2 + (1 - \cos \varphi)^2}. \quad (2.49)$$

При  $\varphi = 270^\circ$

$$x = 5,8 R_{cp} \frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi}. \quad (2.50)$$

Чутливість ВПТ дорівнює відношенню величини ходу вільного кінця трубки (або кута розкручування) до величини тиску

$$S = \frac{\Delta x}{\Delta p}. \quad (2.51)$$

### **2.2.6. Ємнісні вимірювальні перетворювачі**

Робота ємнісних датчиків полягає в перетворенні вимірюваної величини в ємнісний опір. Тому ємнісні датчики відносяться до параметричних. Принцип дії ємнісних датчиків заснований на залежності ємності конденсатора від розмірів обкладок, відстані між ними, діелектричної проникності середовища між обкладками.

Ємність конденсатора, що має дві плоскі обкладки,

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / d, \quad (2.52)$$



де  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність середовища між обкладками;

$\varepsilon_0$  - діелектрична постійна ( $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м);

$s$  - площа обкладок;

$d$  - відстань між обкладками.

З (2.52) виходить, що зміна ємності конденсатора може відбуватися через зміну кожної із трьох величин:  $d$ ,  $s$ ,  $\varepsilon$ . Поширення набули ємнісні датчики, що вимірюють лінійні переміщення. На рис. 2.42, а, б показана схема ємнісного датчика лінійного переміщення й залежність ємності датчика від вхідного сигналу – переміщення  $x$ .

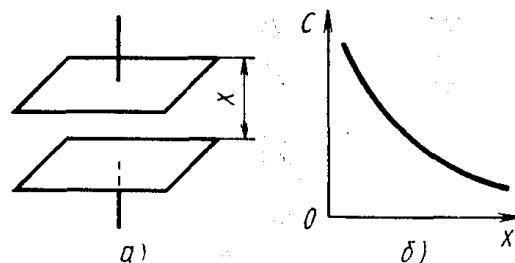


Рис. 2.42. Ємнісний датчик лінійного переміщення

На рис. 2.43, а, б показана схема ємнісного датчика кутового переміщення й залежність ємності датчика від вхідного сигналу – кута повороту  $\alpha$ . У цьому датчику ємність змінюється через зміну площі взаємного перекриття двох обкладок – пластин 1 і 2. Одна із пластин (1) нерухома, інша (2) – може повертатися на осі щодо пластини 1. Відстань між пластинами не міняється, при повороті пластини 2 міняється активна площа між пластинами 1 і 2 (на рис. 2.43,  $\alpha$  позначена штрихуванням).

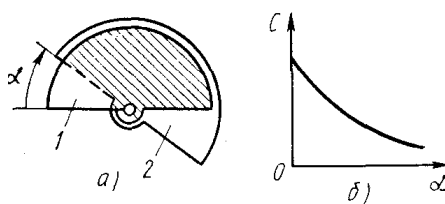


Рис. 2.43. Ємнісний датчик кутового переміщення

На рис. 2.44 показаний ємнісний датчик рівня. У цьому датчику ємність змінюється залежно від рівня рідини, оскільки змінюється діелектрична проникність середовища між нерухомими пластинами. В машинах БШМ їх використовують для виміру рівня палива.

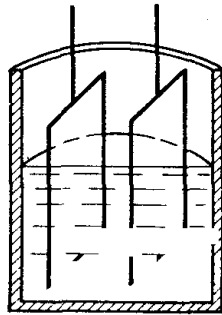


Рис. 2.44. Ємнісний датчик рівня

Ємнісні датчики використовуються в колах змінного струму. Ємнісний опір обернено пропорційний частоті живлення:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (2.53)$$

де  $\omega$  – кутова частота,  $\omega = 2\pi f$ ;  
 $f$  – частота, Гц.

При малій частоті живлення ємнісний опір настільки великий, що зміну струму в колі з ємнісним датчиком дуже важко зафіксувати навіть високочутливим приладом. Застосування ємнісних датчиків переважніше при живленні підвищеною частотою (400 Гц і більше).

Чутливість ємнісних ВПТ визначається, як відношення приросту ємності до приросту вимірюваної величини. Для найпростішого площинного двохобкладкового ємнісного ВПТ з повітряним зазором ємність визначається, як [24]

$$C = 8,85 \cdot 10^{-12} S / (d_{нач} + x) , \quad (2.54)$$

де  $S$  – площа пластин конденсатора;  
 $d_{нач}$  – початкова відстань між пластинами конденсатора;  
 $x$  – переміщення пластин конденсатора.

Початкова відстань між пластинами ємнісного ВПТ вибирається з конструктивних міркувань, але не повинна бути менше значення, при якому стає можливий електричний пробій. Мінімальна відстань, яку приймають для високочутливих ємнісних мікрометрів, не перевищує, 30 мкм.

Чутливість ємнісного ВПТ визначається диференціюванням рівняння (2.54)

$$\eta = \frac{dC}{dx} = -8,85 \cdot 10^{-12} \frac{S}{(d_{нач} + x)^2} . \quad (2.55)$$

Одна з можливих конструкцій ємнісного вимірювального перетворювача тиску показана на рис. 2.45.

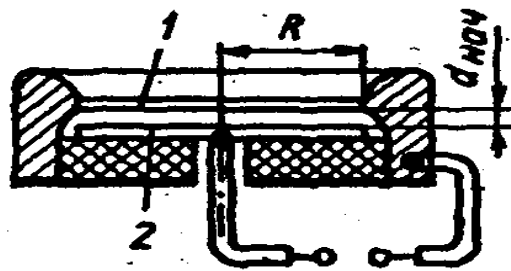


Рис. 2.45. Конструкція ємнісного ВПТ

В цьому ВПТ однією з обкладок конденсатора є площинна кругла мембрана 1, яка деформується під дією тиску рідини. Інша обкладка 2 перетворювача нерухома і має такий же радіус  $R$ , як і мембрана 1. Між обкладками конденсатора є повітряний зазор  $d_{нач}$ . Під дією тиску мембрана прогинається, що приводить до зміни ємності

конденсатора. Для розрахунку ємності такого типу ВПТ слід користуватися наведеною нижче залежністю [24]

$$C = \frac{\varepsilon_0 \pi R^2}{2\sqrt{d_{нач} \delta}} \ln \frac{\sqrt{d_{нач}} + \sqrt{\delta}}{\sqrt{d_{нач}} - \sqrt{\delta}}, \quad (2.56)$$

де  $\varepsilon_0$  - абсолютна діелектрична проникність вакууму.

Чутливість, як слідує з (2.55) і графіка (рис.2.42, б), не постійна в діапазоні можливих переміщень  $x$ . Вона максимальна при малих вхідних сигналах (коли пластини розташовані близько одна до одної) і швидко зменшується при видаленні пластин.

Безпосереднє об'єднання чутливого елемента (мембрани) з датчиком тиску без проміжних кінематичних елементів забезпечує простоту конструкції та високу надійність, а відсутність витрат на тертя обумовлює високу чутливість по тиску такого датчика.

При включенні ємнісного датчика у вимірювальну мостову схему змінного струму чутливість виміру можна збільшити підвищенням напруги живлення моста. Однак і тут необхідно мати на увазі небезпеку пробоя між пластинами. Для значного збільшення напруги живлення між обкладками конденсатора поміщають тонку слюдяну пластинку. Для підвищення чутливості вимірювальної схеми з ємнісним датчиком необхідно підвищувати частоту живильної напруги. Однак при цьому необхідні спеціальні заходи щодо екранування схеми й проводів, що підводять, для зменшення похибки виміру, викликані струмами витoku й струмами наведення.

Енергія електричного поля в конденсаторі

$$W_e = C \frac{U^2}{2}. \quad (2.57)$$

Сила, що діє на пластини, визначається як похідна енергії по переміщенню:

$$F_e = \frac{dW_e}{dx} = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{dx}. \quad (2.58)$$

Для підвищення точності й чутливості, а також з метою зменшення впливу механічних сил ємнісний датчик можна виконати диференціальним (рис. 2.46) і включити в мостову схему.

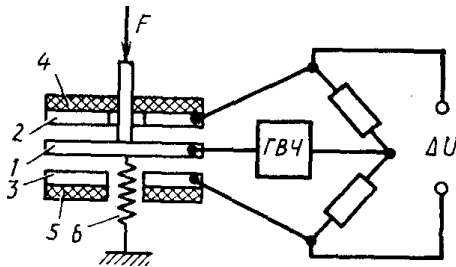


Рис. 2.46. Диференціальний ємнісний датчик у мостовій вимірювальній схемі

Диференціальний ємнісний датчик являє собою плоский конденсатор з металевою обкладкою 1, на яку діє вимірювана сила  $F$ . Обкладка закріплена на пружній підвісці 6 і під дією сили  $F$  переміщається паралельно собі самій.

Дві нерухомі обкладки 2 і 3 ізольовані від корпуса спеціальними прокладками 4 і 5. При відсутності сили  $F$  обкладка 1 займає симетричне положення щодо нерухомих обкладок 2 і 3. При цьому ємність конденсатора, утвореного пластинами 1 і 2, дорівнює ємності конденсатора, утвореного пластинами 1 і 3:  $C_{1-2} = C_{1-3} = C$ . Під впливом вимірюваної сили  $F$ , яка переборює протидію пружної підвіски 6, обкладка 1 переміщається і ємності верхнього й нижнього конденсаторів одержують збільшення різних знаків:

$$C_{1-3} = C + \Delta C; \quad C_{1-2} = C - \Delta C.$$

Оскільки ці ємності включені в суміжні плечі мостової схеми, чутливість вимірювальної схеми зростає вдвічі. Сили, що діють між парами обкладок, спрямовані протилежно одна одній, тобто взаємно компенсуються.

Живлення моста здійснюється від генератора високої частоти (ГВЧ). Частота живлення становить декілька кілогерц. Напряга у вимірювальній діагоналі моста  $\Delta U$  залежить від вимірюваної сили. При зміні напрямку сили змінюється фаза вихідної напруги на  $180^\circ$ .

Якщо пластини мають форму половини кола (як на рис. 2.43), а вісь обертання рухомих пластин проходить через центри окружності всіх пластин, то ємність датчика змінюється залежно від кута повороту:

$$C = 8,85 \cdot 10^{-12} s(n-1)\alpha / (d \cdot 180), \quad (2.59)$$

де  $n$  – загальна кількість нерухомих і рухомих пластин;  
 $s$  – площа взаємного перекриття пластин при  $\alpha = 0$  (рухомі пластини повністю встановлені між нерухомими);  
 $d$  – постійна відстань між рухомими й нерухомими пластинами.

Діапазон зміни кута повороту  $\alpha$  від  $0$  до  $180^\circ$ . Всі рухомі пластини електрично з'єднані між собою, всі нерухомі також з'єднані між собою. Таким чином, є паралельне з'єднання конденсаторів, при якому загальна ємність, як відомо, дорівнює сумі ємностей паралельно з'єднаних конденсаторів.

Чутливість такого датчика визначається як зміна ємності при повороті на  $1^\circ$ , тобто

$$\eta = 8,85 \cdot 10^{-12} s(n-1) / (d \cdot 180). \quad (2.60)$$

Датчики кутових переміщень використовують у мостових вимірювальних схемах. Для підвищення чутливості можливе застосування диференціального датчика, показаного на рис. 2.47. При повороті за

годинниковою стрілкою рухомої пластини збільшується ємність між цією пластиною й нерухомою пластиною 2 і зменшується ємність між пластиною 1 і нерухомою пластиною 3.

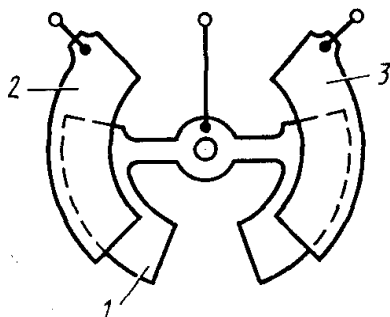


Рис. 2.47. Диференційний ємнісний датчик кутових переміщень підвищеної чутливості

Диференціальна схема, як ми вже відзначали, забезпечує компенсацію протидіючого моменту, оскільки сумарна ємність датчика залишається незмінною.

На рис. 2.48 показаний ємнісний датчик із циліндричними обкладками, застосовуваний для виміру рівня рідини, яка не проводить струм, або сипких тіл.

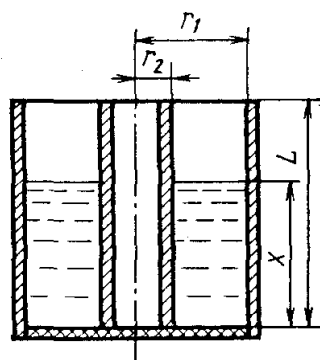


Рис. 2.48. Ємнісний датчик для виміру рівня рідини, що не проводить струм

Однією обкладкою може служити металевий бак або резервуар із внутрішнім радіусом  $r_1$ , друга обкладка виконана у вигляді металевого стрижня або циліндра із

зовнішнім радіусом  $r_2$ . Якщо резервуар заповнений до рівня  $x$  рідиною з діелектричною проникністю  $\varepsilon_0$  (наприклад, дизельне паливо), то ємність датчика можна подати як ємність двох паралельно з'єднаних конденсаторів:

$$C = C_x + C_{L-x}, \quad (2.61)$$

де  $C_x$  – ємність нижньої частини резервуара, заповненої рідиною;

$C_{L-x}$  – ємність верхньої частини резервуара, заповненої повітрям.

Чутливість такого датчика тим більше, чим більше діелектрична проникність  $\varepsilon_0$  матеріалу, рівень якого вимірюється.

Загальна формула для визначення ємності конденсатора із циліндричними обкладками [9]

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{l}{2 \ln(r_1 / r_2)}, \quad (2.62)$$

де  $l$  – довжина обкладок.

Для визначення ємності нижньої частини датчика

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_0 \frac{x}{2 \ln(r_1 / r_2)}. \quad (2.63)$$

Для визначення ємності верхньої частини датчика

$$C_{L-x} = \varepsilon_0 \frac{L-x}{2 \ln(r_1 / r_2)}. \quad (2.64)$$

Підставляючи (2.63) і (2.64) в (2.61), одержимо



$$C = \frac{\varepsilon_0}{2 \ln(r_1 / r_2)} [L + (\varepsilon_\delta - 1)x], \quad (2.65)$$

де  $L$  – висота обкладок датчика, тобто максимальний рівень заповнення резервуара.

Чутливість такого датчика визначаємо диференціюванням (2.65) по  $x$ .

$$\eta = \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon_\delta - 1)}{2 \ln(r_1 / r_2)}. \quad (2.66)$$

З рівняння (2.66) видно, що чутливість датчика постійна у всьому діапазоні вимірів. При вимірі рівня хімічно агресивних рідин зовнішня й внутрішня обкладки покриваються захисним покриттям. Вимір рівня за допомогою ємнісних датчиків використовується в будівельних, дорожніх та вантажно-розвантажувальних машинах і устаткуванні.

### **2.2.7. Електромагнітні вимірювальні перетворювачі Типи електромагнітних датчиків**

Електромагнітні датчики призначені для перетворення переміщення в електричний сигнал за рахунок зміни параметрів електромагнітного кола. Ці зміни можуть полягати, наприклад, у збільшенні або зменшенні магнітного опору  $R_m$  магнітного кола датчика при переміщенні сердечника. Якщо переміщається не сердечник, а обмотка, то відбувається зміна потокозчеплення обмотки. Таким чином, зміни в електромагнітному колі датчика можуть бути викликані як переміщенням елемента магнітного кола (сердечника або якоря), так і переміщенням елемента електричного кола (обмотки). У результаті таких переміщень змінюється індуктивність обмотки  $L$  або її взаємоіндуктивність  $M$

з обмоткою збудження. Тому в технічній літературі електромагнітні датчики часто називають *індуктивними*.

Електромагнітні датчики звичайно розглядають як параметричні, оскільки величини  $L$  і  $M$  залежать від переміщення  $x$ :  $L = f(x)$ ,  $M = f(x)$ . Але електромагнітні датчики зі змінною взаємоіндуктивністю можна віднести й до генераторного типу, оскільки в результаті змінюється і ЕРС обмотки, тобто  $E = f(x)$ .

Оскільки ЕРС у вихідній обмотці з'являється за рахунок зміни коефіцієнта взаємоіндукції з обмоткою збудження, то такі електромагнітні датчики називають *трансформаторними*. Адже обмотку збудження можна розглядати як первинну обмотку трансформатора, а вихідну обмотку – як вторинну. До генераторних відносяться й *індукційні* датчики, в обмотках яких генерується ЕРС залежно від швидкості переміщення:  $E=f(dx/dt)$ .

За допомогою електромагнітних датчиків можна автоматично вимірювати механічні сили, тиск, температуру, властивості магнітних матеріалів, визначати внутрішні порожнини й тріщини в деталях (дефектоскопія), товщину немагнітних покриттів на сталі, витрату рідин і газів у трубопроводах та ін.

Електромагнітні датчики мають такі переваги: простота й дешевина конструкції, механічна міцність, висока надійність за рахунок можливості знімання вихідного сигналу без ковзних контактів, можливість живлення від промислової мережі частотою 50 Гц, можливість одержання досить високої потужності вихідного сигналу, можливість роботи як у діапазоні малих (частки міліметра), так і більших (метри) переміщень. В машинах БКВРМ з особливими умовами експлуатації (великий перепад температур, вібрація, агресивне середовище) індуктивні датчики знайшли широке поле використання.

До недоліків електромагнітних датчиків варто віднести вплив на вихідний сигнал зовнішніх електромагнітних полів і частоти живильної напруги, а також можливість роботи тільки на змінному струмі (живлення постійним струмом можливе лише для індукційних датчиків).

Зміна індуктивності та взаємодуктивності може відбуватися і під впливом механічних напруг у сердечнику електромагнітного датчика. Такі напруги приводять до зміни магнітної проникності феромагнітного матеріалу сердечника. Електромагнітні датчики, засновані на такому фізичному явищі, називаються *магнітопружними* датчиками.

Електромагнітні датчики (індуктивні, трансформаторні, індукційні, магнітопружні) набули поширення в системах автоматики.

### Принцип дії й основи розрахунку індуктивних датчиків

Найпростіший індуктивний датчик являє собою дросель зі змінним повітряним зазором у магнітопроводі. На рис. 2.49 показані дві найпоширеніші конструктивні схеми індуктивних датчиків на одному сердечнику. Це одинарні індуктивні датчики. На сердечнику 1 з електротехнічної сталі розміщена обмотка 2, що підключає до джерела змінної напруги. Магнітний потік у сердечнику замикається через ярмо 3, що може переміщатися щодо сердечника 2. Ярмо 3 механічно пов'язаний з деталлю, переміщення якої необхідно виміряти.

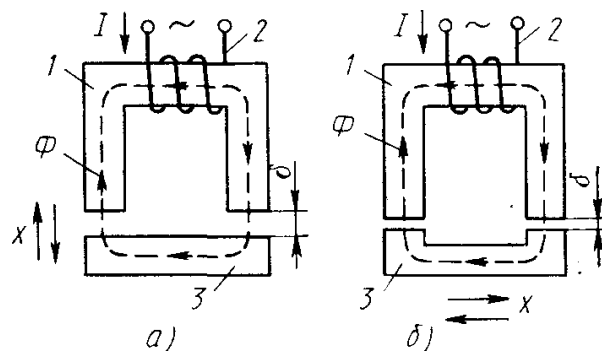


Рис. 2.49. Найпростіші індуктивні вимірювальні перетворювачі

Ця деталь на рисунку не показана, але переміщення  $x$  її може відбуватися у вертикальному (рис. 2.49, а) або в горизонтальному напрямку (рис. 2.49, б). Переміщення

якоря змінює магнітний опір магнітного кола, що складається з сердечника, якоря і повітряного зазора  $\delta$ . Тому зміниться індуктивність обмотки 2. Оскільки ця обмотка включена у змінну напругу, струм в обмотці 2 буде визначатися її повним опором, у який входить і індуктивний опір. Зі збільшенням повітряного зазора магнітний опір збільшується, а індуктивність, індуктивний і повний опори зменшуються (рис. 2.50, а). Отже, струм в обмотці збільшується (рис. 2.50, б).

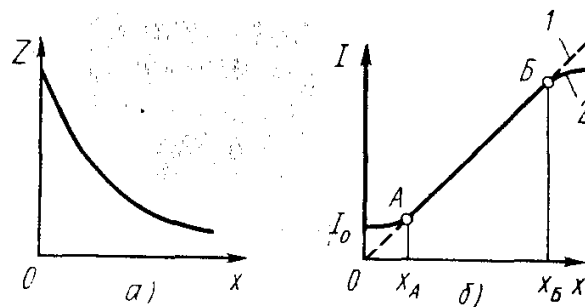


Рис. 2.50. Характеристики індуктивних вимірювальних перетворювачів

Знайдемо вираз, що визначає залежність струму в обмотці датчика від переміщення. Аналіз проведемо стосовно до конструктивної схеми, показаної на рис. 2.49, а. У цьому випадку збільшення переміщення  $x$  завжди дорівнює збільшенню зазора  $\delta$ , тому нам необхідно одержати математичну залежність струму  $I$  від зазора  $\delta$ :  $I = f(\delta)$ .

Нехай обмотка датчика включена на напругу живлення;

$$u = \sqrt{2}U \sin \omega t,$$

де  $U$  – діюче значення напруги,  
 $\omega$  – кутова частота, рад/с.

За законом Ома, діюче значення струму в обмотці

$$I = U/z, \quad (2.67)$$

де  $z$  – повний опір обмотки датчика, Ом, що складається з активного  $R$  і індуктивного  $X_L$  опорів:

$$z = \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Індуктивний опір  $X_L$  пропорційний індуктивності  $L$  і частоті живлення  $f$ :

$$X_L = 2\pi fL = \omega L$$

(нагадаємо, що  $\omega = 2\pi f$ ). Після підстановки маємо

$$z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}. \quad (2.68)$$

Індуктивність обмотки датчика із числом витків  $\omega$

$$L = \omega\Phi / I, \quad (2.69)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік сердечника, Вб.

Приймаємо, що весь магнітний потік проходить через повітряний зазор, тобто потоки розсіювання відсутні. Тоді

$$\Phi = I\omega / R_m, \quad (2.70)$$

де  $R_m$  - магнітний опір магнітопроводу датчика, Гн<sup>-1</sup>.

Цей опір складається з опору сталі сердечника і якоря  $R_{cm}$  і опору повітряного зазора  $R_n$ :

$$R_m = R_{cm} + R_n. \quad (2.71)$$

Опір повітряного зазора пропорційний подвоєній довжині повітряного зазора  $\delta$ , оскільки магнітний потік проходить через повітряний зазор двічі:

$$R_n = 2\delta / (\mu_0 S_M), \quad (2.72)$$

де  $S_M$  – поперечний переріз повітряної частини магнітопроводу, рівний активній площі поперечного переріза сердечника в зоні повітряного зазора, м<sup>2</sup>;

$\mu_0$  – магнітна проникність повітря,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Після підстановки (2.71) і (2.72) в (2.70) одержимо вираз для магнітного потоку:

$$\Phi = \frac{Iw}{R_{ст} + 2\delta / (\mu_0 S_M)}. \quad (2.73)$$

Вираз для індуктивності одержуємо підстановкою (2.73) в (2.69):

$$L = \frac{w^2}{R_{ст} + 2\delta / (\mu_0 S_M)}. \quad (2.74)$$

Індуктивний опір обмотки

$$X_L = \omega L = \frac{\omega w^2}{R_{ст} + 2\delta / (\mu_0 S_M)}. \quad (2.75)$$

Повний опір обмотки

$$z = \sqrt{R^2 + \omega^2 \left[ \frac{w^2}{R_{ст} + 2\delta / (\mu_0 S_M)} \right]^2}. \quad (2.76)$$

Аналіз формули (2.76) показує, що зі збільшенням повітряного зазора (а також і переміщення) повний опір зменшується, прагнучи в межі до величини активного опору обмотки  $R$ . Залежність повного опору  $z$  від величини зазора  $\delta$  показана на рис. 2.50, а. Струм в обмотці датчика

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \left[ \frac{w^2}{R_{ст} + 2\delta / (\mu_0 S_M)} \right]^2}}. \quad (2.77)$$

Якщо вхідним сигналом датчика вважати переміщення якоря  $x$  від початкового положення при  $\delta=0$  у бік збільшення зазора (за рис. 2.49, а), то формула після заміни  $\delta$  на  $x$  являє собою статичну характеристику одинарного індуктивного датчика, тобто  $I=f(x)$ . Графік статичної характеристики показаний на рис. 2.50, б. Як видно з аналізу формули (2.77) і графіка, залежність  $I=f(x)$  має нелінійний характер. Однак на графіку можна виділити ділянку  $AB$ , на якій дотримується пряма пропорційність між вхідним і вихідним сигналами. Ця ділянка називається робочою, датчик використовується саме в діапазоні вхідних сигналів від  $X_A$  до  $X_B$ . Отже, датчик завжди має деякий повітряний зазор, не менший  $X_A$ . У більшості конструкцій індуктивних датчиків магнітопровід ненасичений і магнітна проникність матеріалу сердечника досить велика. Тому магнітний опір повітряного зазора (вже при  $\delta = X_A$ ) значно більше магнітного опору сталевого сердечника, тобто  $R_n \gg R_{cm}$ .

Нехтуючи величиною  $R_{cm}$  у формулі (2.75), одержуємо спрощений вираз для індуктивного опору (з урахуванням  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м):

$$X_L = \frac{\omega w^2}{2\delta / (4\pi \cdot 10^{-7} s_m)} = \frac{2\pi\omega w^2 s_m}{\delta} 10^{-7}. \quad (2.78)$$

У цьому ж діапазоні зміни повітряного зазора від  $X_A$  до  $X_B$  активний опір  $R$  значно менше індуктивного опору  $X_L$ :  $R \ll X_L$ .

Нехтуючи в (2.68) величиною  $R$ , з урахуванням (2.78) одержуємо наближений вираз статичної характеристики індуктивного датчика

$$I = \frac{10^7 U}{2\pi\omega w^2 s_m} x = Kx, \quad (2.79)$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі, обумовлений напругою і частотою живлення, конструктивними розмірами сердечника і числом витків обмотки датчика;

$$K = \frac{10^7 U}{2\pi\omega w^2 s_m}. \quad (2.80)$$

Таким чином, у деякому діапазоні зміни вхідного сигналу  $X_A \leq x \leq X_B$  статична характеристика індуктивного датчика є лінійною з постійним коефіцієнтом передачі.

Графік такої статичної характеристики має вигляд прямої лінії (штрихова на рис. 2.50, б). Це ідеальна характеристика датчика. Реальна характеристика (суцільна лінія 2 на рис. 2.50, б) збігається з ідеальною на робочій ділянці  $AB$ . Проаналізуємо причини відхилення реальної характеристики від ідеальної.

У зоні  $x < X_A$  повітряний зазор дуже малий і його магнітний опір стає порівняним з магнітним опором сталевого сердечника і якоря. Реальна характеристика починається не від нуля, оскільки навіть при  $\delta=0$  індуктивний опір не може дорівнювати нескінченності. Отже, деякий струм буде протікати по обмотці, виконаній навіть на замкнутому магнітопроводі. Для зменшення значення початкового струму  $I_0$  використовують матеріали з високим значенням магнітної проникності для сердечника і якоря індуктивного датчика.

У зоні  $x > X_B$  індуктивний опір обмотки вже настільки зменшується, що стає порівняним з активним опором обмотки, що і обмежує наростання струму. Слід також зазначити, що при більших зазорах частина магнітного потоку вже не замикається через якір, а замикається безпосередньо по повітрю.

На практиці діапазон зміни повітряного зазора для індуктивних датчиків за рис. 2.49, а не перевищує 4 – 5 мм. Значно більший діапазон зміни вхідного сигналу (переміщення) мають індуктивні датчики за рис. 2.49, б. Такі



датчики мають близьку до лінійного статичну характеристику при переміщеннях якоря до 10 – 15 мм.

Величину початкового повітряного зазора  $\delta_0$  (тобто вихідне положення якоря, при якому вхідний сигнал дорівнює нулю) рекомендується вибирати в середині лінійної ділянки статичної характеристики вимірювального перетворювача. Оцінимо чутливість індуктивного датчика при включенні його в одне плече мостової вимірювальної схеми як змінний опір. Живлення моста здійснюється напругою змінного струму. У цьому випадку чутливість являє собою відносну зміну опору, поділену на прирощення величини повітряного зазора:

$$\eta = \frac{\Delta z / z}{\Delta \delta}, \quad (2.81)$$

де  $\Delta \delta$  – збільшення величини повітряного зазора, яке викликає зміну повного опору обмотки датчика  $z$  на  $\Delta z$ .

Нехтуючи  $R \ll X_L$ , маємо  $z = \omega L$ . Візьмемо похідну повного опору по переміщенню при  $\omega = const$

$$dz / d\delta = \omega dL / d\delta. \quad (2.82)$$

Підставимо в (2.82) значення індуктивності з (2.75), нехтуючи  $R_{cm}$ :

$$\frac{dz}{d\delta} = -\frac{\omega w^2 \mu_0 s_m}{2\delta^2}$$

або, переходячи до кінцевих прирощень,

$$\frac{\Delta z}{\Delta \delta} = -\omega w^2 \mu_0 s_m / 2\delta^2. \quad (2.83)$$

Поділивши (2.83) на  $z = \omega L$ , отримуємо вираз для визначення чутливості

$$\eta = \left| \frac{\Delta z / \Delta \delta}{z} \right| = \frac{\omega w^2 \mu_0 s_m}{2 \delta^2 \omega L} = \frac{\omega^2 \mu_0 s_m 2 \delta}{2 \delta^2 \omega^2 \mu_0 s_m} = \frac{1}{\delta}. \quad (2.84)$$

Зі збільшенням зазора чутливість датчика різко зменшується. А при виборі початкової точки малої величини зазора можна одержати більшу чутливість і значний сигнал розбалансу мостової схеми, що дозволяє в ряді випадків відмовитися від використання підсилювача на виході моста. Наприклад, при  $\delta_0 = 1 \text{ мм}$  і  $\Delta \delta = 0,1 \text{ мм}$  чутливість дорівнює  $\eta = 1/10^{-3} = 1000 \text{ 1/м}$  і відносна зміна опору  $\Delta z / z = \eta \cdot \Delta \delta = 1000 \cdot 10^{-4} = 0,1$ , тобто при зміні зазора на 0,1 мм опір датчика змінюється на 10 %.

Одним з недоліків одинарного індуктивного датчика є те, що на його якір діє сила притягання до сердечника. Ця сила вносить похибку у роботу датчика тим більшу, чим менше зусилля пересування деталі, переміщення якої треба виміряти. Індуктивний датчик являє собою електромагніт, тягова сила якого, як відомо з електротехніки, пропорційна похідній магнітної енергії  $W_m$  по переміщенню

$$F = - \frac{dW_m}{d\delta}. \quad (2.85)$$

Знак мінус означає, що сила спрямована убік, що відповідає зменшенню магнітної енергії. Енергія магнітного поля котушки зі струмом

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (2.86)$$

Якщо зробити ті ж допущення, що й при виведенні рівняння статичної характеристики датчика (2.79), то для електромагнітної сили, яка впливає на якір, можна записати рівняння

$$F_e = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\delta} = \frac{1}{\omega^2 \mu_0 s_m} - \frac{U^2}{\omega^2}. \quad (2.87)$$

Аналіз рівняння (2.87) показує, що в робочому діапазоні вхідних переміщень при прийнятих допущеннях електромагнітна сила притягання не залежить від зазора  $\delta$ . Ця сила пропорційна квадрату напруги живлення й обернено пропорційна частоті живлення. Підвищення частоти живлення знижує силу притягання, але погіршує точність роботи датчика, оскільки зростають втрати в сталі через вихрові струми.

Крім наявності електромагнітної сили притягання, індуктивні датчики мають також і інші серйозні недоліки: при зміні знака вхідного сигналу не міняється знак вихідного сигналу (тобто датчик не є реверсивним); діапазон зміни вхідного сигналу, при якому зберігається лінійність статичної характеристики, невеликий.

Зазначені недоліки обмежують область застосування одинарних індуктивних датчиків. На практиці вони знайшли застосування як безконтактні датчики положення й кінцевих вимикачів при керуванні механізмами, що мають значні пересувні зусилля. У таких схемах автоматики найбільш повно проявляються переваги одинарних індуктивних датчиків: простота конструкції й висока надійність.

### **Диференціальні (реверсивні) індуктивні вимірювальні перетворювачі**

Диференціальні індуктивні датчики являють собою сукупність двох одинарних (нереверсивних) датчиків із загальним якорем. Призначені диференціальні індуктивні датчики для одержання реверсивної статичної характеристики і для компенсації електромагнітної сили притягання якоря.

Розглянемо роботу диференціального індуктивного датчика (рис. 2.51, а), який складається із двох однакових сердечників 1 і 2 з обмотками та розташованого між сердечниками якоря 3, здатного переміщатися вліво й вправо щодо середнього симетричного положення.

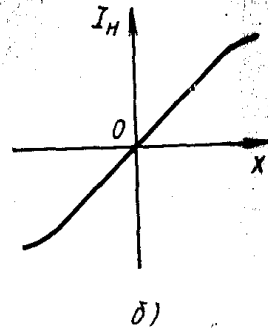
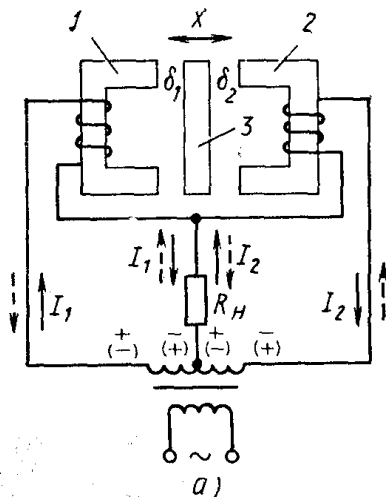


Рис. 2.51. Диференціальний індуктивний вимірювальний перетворювач

Живлення диференціального датчика здійснюється від трансформатора з виводом від середньої точки вторинної обмотки. Опір навантаження  $R_H$  включається між цією середньою точкою й загальною точкою обмоток сердечників 1 та 2. Струм в опорі навантаження можна подати як алгебраїчну суму двох струмів: у лівому і правому контурах. Кожний контур складається з половини вторинної обмотки трансформатора, одинарного індуктивного датчика й опору навантаження  $R_H$  загального для обох контурів. Розглянемо напрямки контурних струмів у момент часу, коли у вторинній обмотці трансформатора виникає умовно позитивний півперіод напруги: плюс – у лівого затискача; мінус – у правого. Полярність середньої точки щодо лівого затискача буде мінусова, а щодо правого – плюсова. Приймаючи за позитивний напрямок струму в зовнішньому колі від плюса до мінуса, визначаємо, що струм лівого контуру  $I_1$  спрямований зверху вниз, а струм правого контуру  $I_2$  – знизу нагору. Отже, ці струми віднімаються, а через навантаження піде різницевий струм. У наступний півперіод полярність зміниться на протилежну (на рис. 2.51 показана в дужках). Відповідно зміниться напрямок струмів у навантаженні, але знову струм у навантаженні буде дорівнює різниці струмів  $I_1$  та  $I_2$  (їхній напрямок показаний пунктиром). Очевидно,

що кожний із цих контурних струмів можна визначити за формулами (2.77) або (2.79). При середньому (симетричному) положенні якоря з індуктивності обмоток 1 і 2 однакові. Отже, струми  $I_1$  та  $I_2$  рівні, їхня різниця дорівнювати нулю, вихідний сигнал (струм в опорі навантаження) дорівнює нулю:  $I_n = I_1 - I_2 = 0$ .

При переміщенні якоря вправо (прийmemo його за позитивний вхідний сигнал) індуктивність  $L_2$  зростає, оскільки повітряний зазор в одинарному індуктивному датчику 2 зменшується, а індуктивність  $L_1$  убуває, оскільки зазор у датчику 1 збільшується. Отже,  $I_1 > I_2$  і з'являється вихідний сигнал у вигляді струму навантаження певної полярності. При переміщенні якоря вліво (негативний вхідний сигнал) відповідно зменшується  $L_2$  і збільшується  $L_1$ , співвідношення струмів  $I_1 < I_2$  і полярність струму навантаження змінюється. Оскільки мова йде про змінний синусоїдальний струм, це означає, що фаза струму змінюється на  $180^\circ$ . Таким чином, статична характеристика диференціального датчика (рис. 2.51, б) буде реверсивною, залежною від знака вхідного сигналу. А диференціальним датчик називається тому, що вихідний сигнал формується як різниця сигналів двох однакових датчиків.

Сили притягання якоря до сердечників виникають і в цьому випадку, але спрямовані вони в протилежні боки й тому майже повністю взаємно компенсуються. Тому для переміщення якоря потрібне незначне зусилля. Дуже важливою особливістю диференціального датчика є рівність нулю вихідного сигналу при нульовому вхідному сигналі. Нагадаємо, що в одинарному датчику вихідний сигнал (струм через обмотку) був нерівний нулю навіть при нульовому повітряному зазорі.

Для одержання реверсивної статичної характеристики використовують і мостову схему включення індуктивних датчиків (рис. 2.52, а, б).

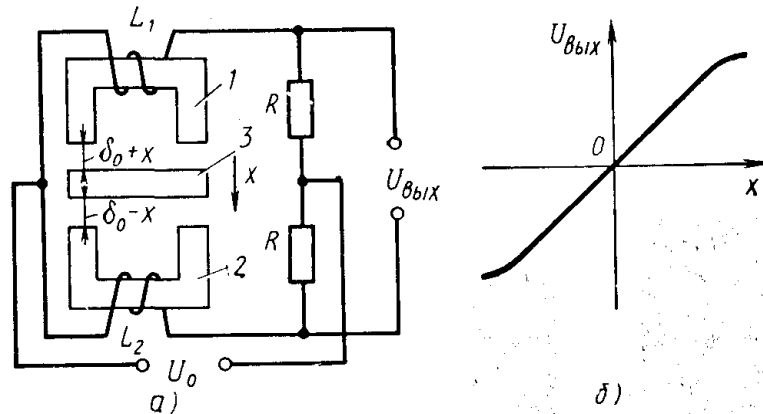


Рис. 2.52. Мостова схема реверсивного індуктивного датчика

Плечі моста утворені обмотками двох сердечників 1 і 2 з індуктивностями відповідно  $L_1$  та  $L_2$  і двома постійними резисторами з опором  $R$ . До однієї діагоналі моста підводиться напруга живлення  $U_0$  змінного струму, із другої діагоналі знімається вихідна напруга  $U_{вих}$ . Якщо яр 3 займає середнє положення, то індуктивності  $L_1$  та  $L_2$  однакові й міст збалансований. Вихідна напруга  $U_{вих}$  при цьому дорівнює нулю. При відхиленні ярка від середнього положення баланс моста порушується, тому що індуктивність однієї обмотки збільшується, а іншої – зменшується. Зміна напрямку переміщення ярка викликає зміну фази вихідної напруги на  $180^\circ$ , тобто характеристика мостової схеми індуктивних датчиків є реверсивною (див. рис. 2.52, б).

Підвищити чутливість можна збільшенням напруги живлення й зниженням величини початкового повітряного зазора, тобто зближенням сердечників 1 і 2.

Живлення індуктивних датчиків завжди здійснюється змінним струмом, але за допомогою випрямних схем вихідний струм може бути й постійним. Для того щоб мати реверсивну характеристику, використовують фазочутливий випрямляч.

Реверсивні індуктивні датчики із сердечниками Ш- і П-подібної форми використовуються для виміру досить малих переміщень; вони мають початковий зазор порядку 0,3 – 1 мм.

Для виміру більших переміщень застосовують індуктивні датчики у вигляді котушки з рухомим внутрішнім сердечником. Якщо сердечник повністю уведений усередині котушки, на яку намотана обмотка, то її індуктивний опір максимальний, а струм в обмотці має мінімальне значення. При виведенні сердечника з котушки індуктивний опір зменшується, а струм відповідно збільшується. Індуктивні датчики у вигляді котушки із сердечником, що переміщається усередині її, одержали назву плунжерних датчиків. Їх також називають індуктивними датчиками з розімкнутим магнітопроводом, оскільки навіть при максимальній індуктивності обмотки основний шлях магнітного потоку проходить по повітрю. З огляду на це розглянуті вище датчики з обмоткою на нерухомому сердечнику й з якорем, що переміщається, називають індуктивними датчиками із замкнутим магнітопроводом.

В плунжерних датчиках є одна дуже важлива особливість: вони дозволяють одержати інформацію про переміщення із замкнутого, ізольованого простору. Нехай, наприклад, треба виміряти рівень якої-небудь дуже шкідливої рідини, пари якої отруйні і перебувають під тиском. Тоді котушку 1 плунжерного датчика (рис. 2.53) надягають на розділову трубку 3 з нержавіючої немагнітної сталі, усередині якої й переміщається сердечник 2 з феромагнітного матеріалу. Переміщення сердечника змінює індуктивність котушки, а розділова трубка не екранує магнітне поле, оскільки матеріал трубки має дуже малу магнітну проникність. Таким чином, обмотка датчика, всі інші електричні елементи вимірювальної схеми розміщені у звичайних, нормальних умовах. У зв'язку із цим про плунжерні датчики говорять, що вони дозволяють вивести переміщення із замкнутого об'єму.

У цьому полягає основна перевага плунжерних датчиків перед датчиками із замкненим магнітопроводом. За чутливістю, потужністю вихідного сигналу плунжерні датчики поступаються індуктивним датчикам із замкненим магнітопроводом.

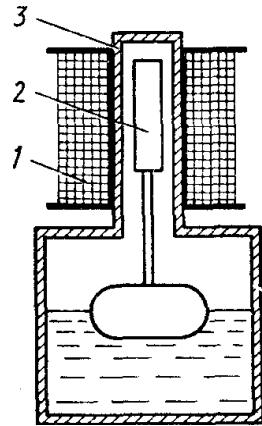


Рис. 2.53. Індуктивний вимірювальний перетворювач плунжерного типу

За допомогою плунжерних датчиків можуть бути реалізовані такі ж диференціальні й мостові схеми, які були розглянуті вище (див. рис. 2.51, 2.52).

Розглянемо як приклад використання плунжерних датчиків у схемі індуктивного моста (рис. 2.54). Обмотка кожного із двох датчиків *A* і *B* має вивід від середньої точки.

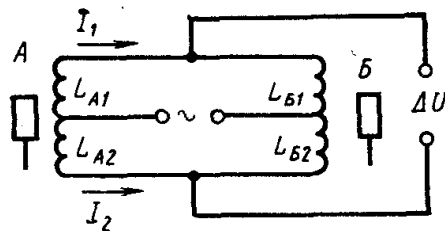


Рис. 2.54. Індуктивний міст для дистанційної передачі лінійних переміщень

Обмотки датчиків з'єднані одна з одною проводами лінії зв'язку. Напряга живлення прикладена між середніми точками обмоток. Кожна з половин обмоток утворить плече моста змінного струму. Датчик *A* встановлений у передавальному приладі, датчик *B* у приймальному приладі. При переміщенні сердечника датчика *A* змінюється індуктивний опір кожної з половин його обмотки. Наприклад,



при переміщенні сердечника нагору зростає індуктивність  $L_{A1}$  і зменшується індуктивність  $L_{A2}$ . Баланс моста порушується, і по проводах лінії зв'язку протікають струми розбалансу  $I_1$  і  $I_2$ . Ці струми, протікаючи по обмотці датчика  $B$ , викликають електромагнітну силу, що переміщає сердечник датчика  $B$ . Під дією цієї сили сердечник датчика  $B$  устанавлюється в таке ж положення, що й сердечник датчика  $A$ . При цьому, природно, відбувається відповідна зміна індуктивностей  $L_{B1}$  і  $L_{B2}$ . Умовою балансу моста є, як відомо, рівність добутків опорів протилежних плечей моста або відповідних індуктивностей:  $L_{A1}L_{B2} = L_{A2}L_{B1}$ .

Схема індуктивного моста дозволяє здійснити дистанційну передачу лінійних переміщень. Однак зусилля на приймальній стороні досить невелике. Наприклад, випускалися прилади з котушками діаметром 65 мм, висотою 135 мм і масою 2,5 кг. При повному ході в 30 мм забезпечувалося зусилля в один ньютон на 1 % повного ходу сердечника. Такого зусилля досить лише для переміщення стрілки в приймальному приладі.

Для одержання значно більших зусиль схема індуктивного моста використовується разом з підсилювачем і електродвигуном. Напруга розбалансу моста  $\Delta U$  знімається з вимірювальної діагоналі моста й подається на вхід підсилювача, який керує електродвигуном, що переміщає (через редуктор) сердечник датчика  $B$ , поки не настане баланс моста, тобто  $\Delta U=0$ .

### **Трансформаторні вимірювальні перетворювачі**

Принцип дії трансформаторних датчиків заснований на зміні коефіцієнта взаємоіндукції обмоток при переміщенні якоря. Вони відносяться до електромагнітних датчиків генераторного типу. Магнітні системи трансформаторних датчиків такі ж, як і в розглянутих раніше індуктивних датчиків. Відмінність полягає лише в тім, що додається ще обмотка, з якої й знімається вихідний сигнал. Завдяки цьому в трансформаторних датчиках відсутній безпосередній електричний зв'язок між колом живлення й вимірювальним

колом. Існує зв'язок лише за рахунок магнітного поля (трансформаторний зв'язок), що дозволяє вибором числа витків вихідної обмотки одержати будь-який рівень вихідної напруги.

На рис. 2.55 показаний трансформаторний датчик з рухомим якорем. На обмотку збудження  $W_1$  подається напруга  $U_1$ , яка створює в магнітопроводі змінний магнітний потік  $\Phi$ . У вторинній обмотці  $W_2$  виникає ЕРС  $E_2$ , значення якої залежить від величини повітряного зазора  $\delta$ . Максимальна ЕРС  $E_2$  виходить при  $\delta = 0$ , оскільки при цьому магнітний опір замкнутого магнітопровода мінімальний і по ньому проходить максимальний магнітний потік  $\Phi$ . Зі збільшенням  $\delta$  зменшується магнітний потік і відповідна до нього ЕРС  $E_2$ .

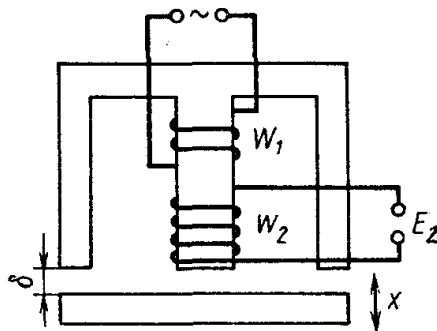


Рис. 2.55. Трансформаторний вимірювальний перетворювач лінійних переміщень

Такий датчик використовується для виміру малих лінійних переміщень, але має серйозний недолік: залежність ЕРС  $E_2$  від переміщення якоря  $x$  нелінійна й не проходить через нуль.

На рис. 2.56, а показаний трансформаторний датчик з поворотною обмоткою. Він призначений для вимірювання кутових переміщень. Магнітопровід датчика не рухається і складається з ярма 1 і сердечника 2. Обмотка збудження  $W_1$  розміщена на ярмі 1, на неї подається змінна напруга  $U$ , яка створює в зазорі між ярмом 1 і сердечником 2 змінний магнітний потік  $\Phi$ , амплітудне значення якого незмінно. У

зазори з рівномірним розподілом індукції розміщена поворотна рамка 3 з вторинною обмоткою  $W_2$ , у якій індукується ЕРС  $E_2$ , що є вихідним сигналом датчика.

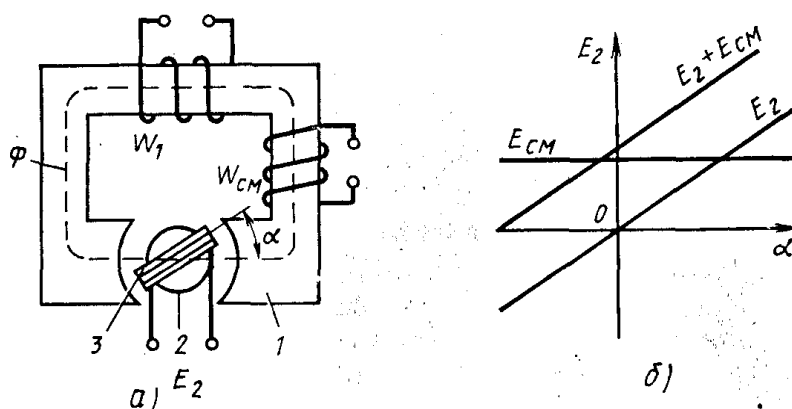


Рис. 2.56. Трансформаторний вимірювальний перетворювач кутових переміщень

Залежно від кута повороту  $\alpha$   $E_2$  змінюється від нуля (при  $\alpha = 0$  площина рамки розміщена уздовж напрямку магнітного потоку) до максимального значення (при  $\alpha = 90^\circ$  площина рамки розміщена поперек напрямку магнітного потоку, весь магнітний потік зчеплений з витками вторинної обмотки  $W_2$ ). При зміні знака кута повороту  $\alpha$  фаза ЕРС  $E_2$  змінюється на  $180^\circ$ , тобто датчик є реверсивним. У деякому діапазоні вхідного сигналу (кута повороту  $\alpha$ ) забезпечується лінійна залежність  $E_2=f(\alpha)$ . Статична характеристика трансформаторного датчика з поворотною обмоткою показана на рис. 2.56, б. Такі датчики набули поширення для дистанційних передач показань різних приладів за назвою *феродинамічних* перетворювачів. Недоліком феродинамічних перетворювачів є залежність вихідного сигналу від коливань напруги та частоти живлення.

Якщо необхідно вимірювати більші кутові переміщення в один бік, то послідовно із вторинною обмоткою включається додаткова обмотка зсуву, яка розміщена на ярмі 1. Потокозчеплення її незмінне; отже, у ній індукується ЕРС  $E_{cm}$  з постійним амплітудним значенням. При послідовному з'єднанні обмоток  $W_2$  і  $W_{cm}$  ЕРС  $E_2$  і  $E_{cm}$

сумуються (з урахуванням фази). Результируюча статична характеристика датчика з обмоткою зсуву показана на рис. 2.56, б.

Трансформаторні датчики із вхідним сигналом у вигляді кутового переміщення часто виконують у вигляді електричних мікромашин, відомих за назвою «обертові трансформатори» (ОТ). На статорі й роторі ОТ розміщені по дві взаємно перпендикулярні обмотки. Коефіцієнт взаємоіндукції роторних обмоток змінюється за синусоїдальним законом залежно від кута повороту  $\alpha$ . Залежно від схеми з'єднання обмоток розрізняють синусно-косинусні обертові трансформатори і лінійні обертові трансформатори.

Для дистанційних передач кутових переміщень широко застосовуються також електромашинні елементи автоматики – сельсини. Вони мають однофазну обмотку на статорі й трифазну обмотку синхронізації на роторі (можливо й зворотне розташування обмоток). Сельсини можуть працювати в індикаторному й трансформаторному режимах. На передавальному боці встановлюється сельсин-датчик, а на приймальному – сельсин-приймач, який повинен автоматично повторювати кут повороту сельсина-датчика.

В індикаторній схемі (рис. 2.57) обмотки збудження сельсина-датчика й сельсина-приймача підключаються до мережі змінного струму, а обмотки синхронізації обох сельсинів з'єднуються одна з одною проводами ліній зв'язку. ЕРС у кожній з фаз обмотки синхронізації змінюється пропорційно косинусу кута між віссю обмотки збудження та віссю цієї фази.

Під дією цього моменту сельсин-приймач повертається в те саме положення, що й датчик, оскільки тільки при  $\alpha = \beta$  обертальний момент стає рівним нулю. Обертальний момент впливає й на вал сельсина-датчика, однак його кут повороту заданий механізмом або чутливим елементом, кутове переміщення якого підлягає контролю. Для індикаторної схеми (рис. 2.57) дуже важливою характеристикою є величина питомого синхронізуючого

моменту, тобто моменту на  $1^0$  розбіжності. Для сельсинів, використовуваних у промисловості, ця величина становить  $(4 - 50) \cdot 10^{-4}$  Нм.

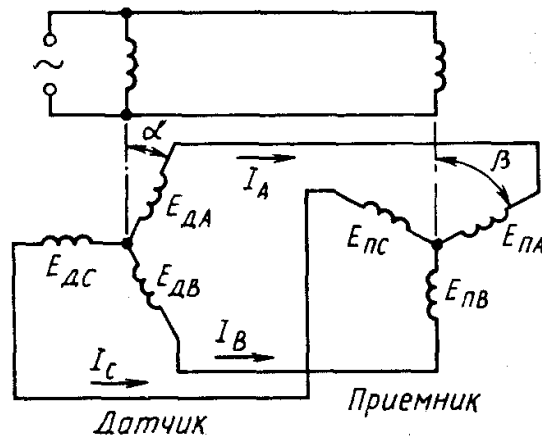


Рис. 2.57. Схема сельсинів

Для підвищення обертового моменту використовується трансформаторна схема сельсинів. У цій схемі обмотка збудження сельсина-приймача не підключається до мережі, а з неї знімається напруга, що пропорційна синусу кута розбіжності. Ця напруга подається на підсилювач, який управляє електродвигуном, що приводить через редуктор сельсин-приймач у погоджене із сельсином-датчиком положення. Одночасно встановлюється в необхідне положення й навантаження – той виробничий механізм, кутовим переміщенням якого потрібно управляти на відстані. Такі автоматичні пристрої називаються системами, що стежать: приймач мовби «стежить» за датчиком.

Поряд з контактними сельсинами поширення набули безконтактні сельсини. У контактних сельсинах підключення обмоток ротора в зовнішнє коло здійснюється за допомогою контактних кілець і щіток. У безконтактних сельсинах обмотки збудження й синхронізації розміщені на статорі, а зміна магнітного зв'язку між ними за синусоїдальним законом забезпечується за допомогою безобмотувального ротора з неоднаковим магнітним опором по взаємно перпендикулярних осях. Надійність безконтактних сельсинів істотно вище, ніж контактних.

## Магнітопружні датчики

Принцип дії магнітопружних датчиків заснований на *магнітопружному ефекті* – фізичному явищі, що проявляється у вигляді зміни магнітної проникності ферромагнітного матеріалу залежно від механічних напруг у ньому. Магнітопружні датчики використовуються для виміру силових параметрів: зусиль, тисків, крутних і згинальних моментів, механічних напруг і т.п. Конструкції деяких з них показані на рис. 2.58.

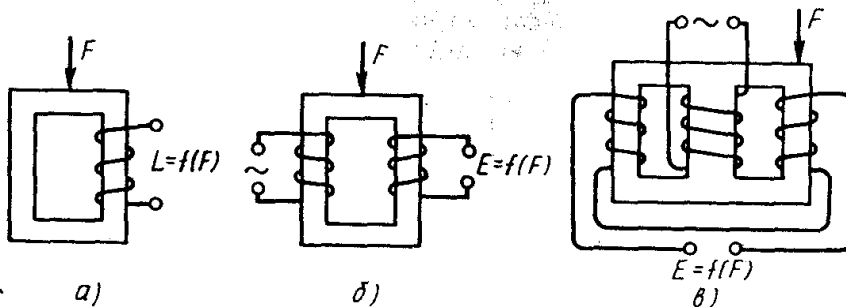


Рис. 2.58. Схеми магнітопружних датчиків

Конструктивно магнітопружні датчики являють магнітопровід з однією або декількома обмотками. Якщо до сердечника прикладене механічне зусилля  $F$ , то магнітна проникність  $\mu$  зміниться. Отже, зміняться й магнітний опір сердечника, і індуктивність обмотки на сердечнику. Як бачимо, є аналогія з індуктивними датчиками. В індуктивних датчиках також відбувається зміна магнітного опору, але за рахунок довжини або перетину повітряного зазора. У магнітопружних датчиках зазор не потрібний, сердечники можуть бути замкнутими.

Так само, як і індуктивні датчики, магнітопружні датчики можуть бути використані у вигляді одинарних (рис. 2.58, а), трансформаторних (рис. 2.58, б), диференціально-трансформаторних (рис. 2.58, в).

Залежність магнітної проникності від механічних напруг має нелінійний характер. Зв'язано це як з нелінійністю кривої намагнічування, так і з нелінійною залежністю

деформацій від зусилля. Нелінійність магнітопружного ефекту виражена дуже сильно. Наприклад, у слабких магнітних полях магнітна проникність під дією механічних напруг зростає, а в сильних полях – зменшується. Однак при певних значеннях напруженості магнітного поля в сердечнику можна одержати близьку до лінійного залежність зміни магнітної проникності  $\Delta\mu$  сердечника від відносної деформації  $\Delta l/l$  або нормальної механічної напруги  $\sigma$  в зоні лінійних деформацій. Найбільш помітний магнітопружний ефект у пермалоевих (залізокобальтових і залізонікелевих) сплавах. На рис. 2.59 показана залежність відносної магнітної проникності  $\Delta\mu/\mu$  від зміни механічної напруги  $\sigma$ .

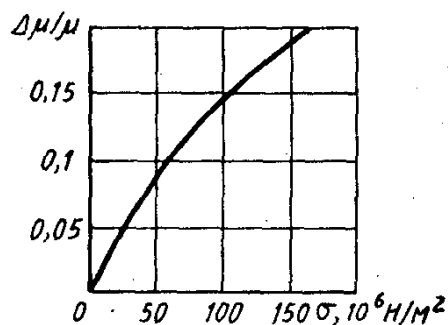


Рис. 2.59. Залежність відносної магнітної проникності від механічної напруги

Відносна деформація  $\Delta l/l$  у зоні пружних деформацій пов'язана з механічною напругою  $\sigma$  через модуль пружності  $E$ :

$$\Delta l/l = E\sigma.$$

Чутливість магнітопружного датчика визначається за формулою

$$S_d = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l};$$

вона може досягати значень 200—300.

Для вимірювання частоти обертання використовуються й спеціальні електричні машини малої потужності – тахогенератори.

Тахогенератор постійного струму (рис. 2.60, а) має обмотку збудження, що створює при живленні постійним струмом магнітний потік  $\Phi$ .

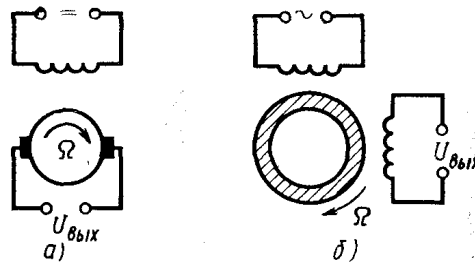


Рис. 2.60. Тахогенератори

При обертанні якоря в ньому створюється ЕРС, пропорційна частоті обертання  $n$ :  $E = k\Phi n$ , де  $k$  – постійна, яка обумовлена конструкцією.

Нагадаємо, що частота обертання  $n$  звичайно виражається в оборотах за хвилину і зв'язана зі швидкістю обертання  $\Omega$  виразом

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad \text{или} \quad n = \frac{60\Omega}{2\pi} .$$

За допомогою колектора й щіток вихідний сигнал подається на навантаження у вигляді спрямованої напруги.

Тахогенератор змінного струму (рис. 2.60, б) має на статорі дві обмотки, зсунуті одна щодо іншої на 90 ел. град. Одна обмотка включається в мережу змінного струму. При обертанні ротора, виконаного у вигляді тонкостінного електропровідного циліндра, в іншій обмотці наводиться змінна ЕРС, яка пропорційна частоті обертання  $n$ . Для підвищення температурної стабільності як матеріал порожнього ротора використовується константан.

Тахогенератори мають високу чутливість і потужність вихідного сигналу. Загальним недоліком всіх генераторних датчиків є залежність вихідного сигналу від опору навантаження.



### **2.2.8. П'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі. Принцип дії**

Робота п'єзоелектричного датчика заснована на фізичному явищі, яке називається *п'єзоелектричним ефектом*. Цей ефект проявляється в деяких кристалах у вигляді появи на їхніх гранях електричних зарядів різних знаків при стиску кристала в певному напрямку. Слово «п'єзо» грецькою мовою означає «натискаю». Залежно від значення сили стиску (або розтягання) міняється кількість зарядів, та відповідно, і різниця потенціалів, заміряна між гранями. П'єзоелектричні датчики відносяться до генераторного типу. Широко відомі п'єзоелектричні звукознімачі: голка звукознімача сприймає всі зміни глибини звукової доріжки й передає їх на п'єзокристал. Вихідна напруга з п'єзокристала підсилюється, і через динамік ми чуємо записані звуки. Поява зарядів на гранях залежно від стиску називається *прямим п'єзоелектом*. Існує й *зворотний п'єзоелектом*: при подачі напруги на грані кристала змінюються його розміри (він стискається або розтискається). Зворотний п'єзоелемент знайшов застосування в ультразвукових генераторах. А засновані на прямому п'єзоелектомі п'єзоелектричні датчики використовуються в автоматичі для виміру тисків, вібрацій, прискорень, інших параметрів швидкозмінних процесів.

Розглянемо появу зарядів на гранях кристала кварцу, у якого п'єзоелектричний ефект досить сильно виражений. На рис. 2.61 зображений кристал кварцу, що має вигляд шестигранної призми. У кристалі можна виділити три осі симетрії:  $Z$  – поздовжня вісь, називана оптичною віссю;  $X$  – поперечна вісь, що проходить через ребра призми перпендикулярно поздовжній осі;  $Y$  – поперечна вісь, що проходить через грані призми перпендикулярно їм і осям  $Z$ ,  $X$ . Вісь  $X$  називається електричною віссю, вісь  $Y$  – механічною або нейтральною.

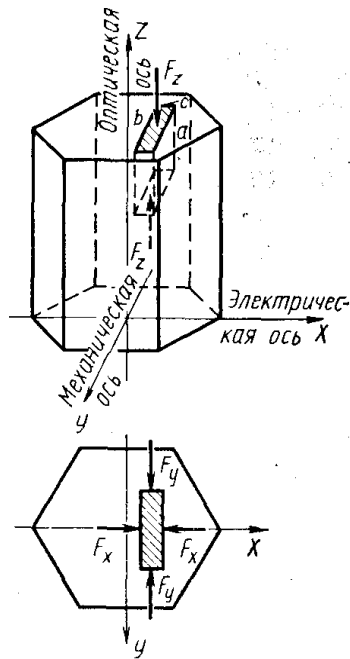


Рис. 2.61. Кристал кварцу та його осі симетрії

Виріжемо із кристала кварцу паралелепіпед таким чином, щоб його грані були перпендикулярні осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , і розглянемо появу зарядів на його гранях під дією сил, орієнтованих по осях  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , тобто нормально до площин граней. Під дією сили  $F_x$  уздовж електричної осі  $X$  на кожній із граней паралелепіпеда, перпендикулярних осі  $X$ , з'являються електричні заряди. Величина зарядів не залежить від геометричних розмірів кристала, а визначається силою  $F_x$ :

$$q_x = K_0 F_x, \quad (2.88)$$

де  $K_0$  – постійна п'єзоелектричного матеріалу, або п'єзоелектричний модуль. Знак зарядів (полярність) залежить від напрямку сили по осі  $X$  (сила стиску або сила розтягання).

Під дією сили розтягання  $F_y$  уздовж механічної осі  $Y$  виникають заряди на тих же гранях, що й при дії сили  $F_x$  (тобто на гранях, які перпендикулярні осі  $X$ ), але знак заряду буде той же, що при дії сили стиску  $F_x$ . Відповідно сила стиску  $F_y$  приводить до появи зарядів на тих же гранях і

того ж знаку, що сила розтягання  $F_x$ . Величина зарядів під дією сил  $F_y$  залежить від геометричних розмірів кристала  $b$  і  $c$  (рис. 2.61) і пропорційна силі

$$q_y = -K_0 F_y (b/c). \quad (2.89)$$

Коефіцієнт  $K_0$  у формулах (2.88) і (2.89) той самий. Знак «мінус» означає, що полярність заряду від сил стиску по осях  $X$  і  $Y$  протилежна. Поява зарядів під впливом сили  $F_x$  називається *поздовжнім* п'єзоелементом, а під впливом сили  $F_y$  – *поперечним* п'єзоелементом. Стиск або розтягання по осі  $Z$  не викликає появи зарядів на гранях. Електричні заряди, що з'явилися на гранях п'єзоелемента, під дією сил  $F_x$  і  $F_y$  зникають, як тільки припиняється дія сили. Крім того, навіть якщо сила прикладена постійно, заряди стікають через повітря або ізоляцію. Тому п'єзоелектричні датчики використовують лише для виміру динамічних процесів, коли під дією змінних сил заряди на гранях увесь час поповнюються. У п'єзоелектричних датчиках застосовують, крім кварцу, сегнетову сіль, титанат барію. Властивості кристалів цих матеріалів, що мають значення для виготовлення п'єзодатчиків, наведені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Властивості п'єзоелектричних кристалів

Кристал	П'єзоелектричний модуль $K_0$ , К/Н	Діелектрична проникність $\epsilon$	Питомий опір, Ом·мм <sup>2</sup> /м
Кварц	$2,1 \cdot 10^{-3}$	4,5	$1 \cdot 10^{12}$ - уздовж оптичної осі, $2 \cdot 10^{14}$ - перпендикулярно оптичній осі
Сегнетова сіль	2,1	$9 \cdot 10^3$	—
Титанат барію	0,225	$10^4$	—

П'єзоелектричний модуль кварцу порівняно невисокий. Але його головна перевага – низька вартість. Адже кварц – це один з найпоширеніших мінералів, його

склад ( $\text{SiO}_2$ ) той же, що й у звичайного піску. Кварц також має більшу механічну міцність, хороші ізоляційні властивості, незначну залежність параметрів від температури та вологості повітря.

Найбільш яскраво п'єзоелектричний ефект виражений у кристалах сегнетової солі: при дії однієї і тієї ж сили з'являється в тисячу раз більша кількість електрики, ніж у кварцу. Однак ці заряди досить швидко стікають через малий питомий опір. Властивості сегнетової солі змінюються залежно від температури та вологості. Тому п'єзоелементи із сегнетової солі застосовуються для виміру швидкозмінних сил і тисків при малій вологості й неширокому діапазоні зміни температури навколишнього середовища.

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

### Конструкції п'єзодатчиків

П'єзоелектричні датчики застосовуються для виміру тиску, сили, прискорення. На рис. 2.62 показаний пристрій п'єзоелектричного датчика тиску із двома кварцовими пластинами. Вимірюваний тиск діє на мембрану 1, що являє собою дно корпусу датчика.

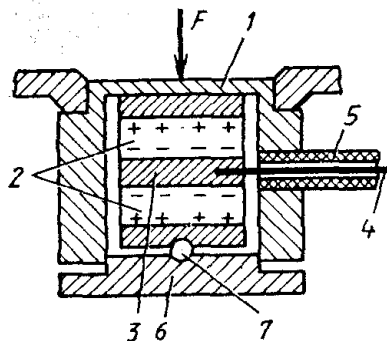


Рис. 2.62. П'єзоелектричний датчик тиску

Кварцові пластини 2 затиснуті між металевими прокладками 3. Середня прокладка 3 з'єднана з виводом 4, який проходить через екрановану втулку 5 з ізоляційного матеріалу. Кришка 6 з'єднується з корпусом і через кульку 7 передає тиск пластинам, завдяки чому вимірюваний тиск розподіляється по поверхні кварцових пластин більш рівномірно. Кварцові пластини звичайно розташовані таким чином, що у вимірювальну схему подається негативний потенціал. Позитивний потенціал подається на корпус датчика. Для зменшення витоку зарядів необхідна дуже якісна ізоляція. Із цією ж метою поверхню кварцових пластин ретельно полірують. Використання двох (а іноді й більше) пластин підвищує вихідну ЕРС, оскільки вихідні сигнали пластин складаються.

На рис. 2.63 показаний п'єзоелектричний датчик прискорення (іноді його називають акселерометром), який використовується у вібровимірювальній апаратурі. П'єзоелемент 1 з титанату барію розташований у корпусі приладу 2 між інерційною масою 3 і підп'ятником 4.

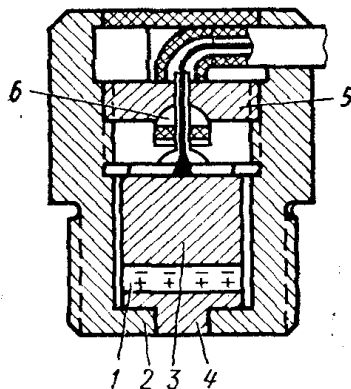


Рис. 2.63. П'єзоелектричний датчик прискорення

Для збільшення сили, яка діє на п'єзоелемент при прискореннях, інерційна маса має відносно великі розміри і виготовлена з вольфраму. Пакет включає до себе інерційну масу 3, п'єзоелемент 1 і підп'ятник 4, притиснутий до основи корпуса гайкою 5 через сферичну п'яту 6, ізоляційну прокладку, пружинну шайбу і контактну пластину. Вивід

сигналу виконаний за допомогою спеціального антивібраційного кабелю. Датчик вимірює прискорення від 0,2 до 200  $g$ . Коефіцієнт перетворення порядку 8  $\mu V$  на 1  $g$ . Мінімальна частота віброприскорень 5 Гц.

### Чутливість п'єзодатчика і вимоги до вимірювального ланцюга

П'єзоелектричний датчик подібний до електричного конденсатора. Кількість заряду  $q$ , що з'явилася під впливом механічної сили, заряджає грані п'єзоелемента й з'єднані з ним провідники до напруги  $U$ , обумовленої як  $V=q/C$ , де  $C$  – ємність між провідниками (включаючи ємність п'єзоелемента). Чутливість датчика визначається як збільшення вихідної напруги, що відповідає зміні сили  $F$ . При паралельному з'єднанні  $n$  пластин їхня ємність складається. Чутливість п'єзодатчика в цьому випадку

$$\eta = nK_0 / (C_{ex} + C_0n), \quad (2.90)$$

де  $n$  – кількість пластин;

$K_0$  – п'єзоелектричний модуль матеріалу пластини;

$C_{ex}$  – ємність вимірювального кола;

$C_0$  – ємність однієї пластини.

Ємність однієї пластини датчика товщиною  $d$  і площею  $s$  можна визначити як ємність площинно-паралельного конденсатора:

$$C_0 = \varepsilon\varepsilon_0s / d,$$

де  $\varepsilon_0$  - абсолютна діелектрична проникність вакууму;

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{12} \text{ Ф/м.}$$

Ємність п'єзоелемента  $C$  на практиці буває невелика і виражається в пікофарадах (1 пФ=10<sup>-12</sup> Ф). Вихідний сигнал п'єзодатчика  $U=S_0F$ , де  $F$  – сила, яка вимірюється.

Заряджений до напруги  $U$  конденсатор буде розряджатися через опір датчика  $R_0$  і опір вимірювального кола  $R_{ex}$ . Для зменшення швидкості розряду необхідно прагнути до збільшення постійної часу ланцюга розряду  $T = (R_0/n + R_{ex})X X(nC_0 + C_{ex})$ . При практично реалізованих значеннях опору датчика  $R_0$  (десятки й сотні мегаомів і його ємності  $C_0$  (десятки пікофарадів) треба забезпечити дуже великий вхідний опір вимірювального кола. Для цього використовуються спеціальні електронні лампи, які називаються електрометричними. Електрометричні схеми можуть забезпечити вхідний опір вимірювального кола до  $10^{13}$  Ом. Для збільшення постійної часу розряду паралельно датчику іноді включають конденсатор. Застосування вимірювальних ланцюгів з дуже великим вхідним опором дозволяє знизити нижню границю частоти вхідних сигналів до декількох герців.

При вимірі високочастотних ударних навантажень і прискорень п'єзоелектричні датчики мають перевагу перед датчиками інших типів.

### ***2.2.9. Вимірювальні перетворювачі температури***

Діапазон температур, вимірюваних при експлуатації будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин, а також при проведенні лабораторних досліджень або на виробництві, і вимоги до точності виміру змінюються в широких межах. Цим пояснюється велика розмаїтість застосовуваних вимірювальних перетворювачів.

Метод виміру, що припускає безпосереднє зіткнення перетворювача із середовищем, температура якого вимірюється, прийнято називати контактним. Найчастіше в цьому випадку використовуються термометри опору й термопари (термоелектричні перетворювачі), а також напівпровідникові діоди й тріоди. Якщо температура об'єкта дуже висока й виключає можливість зіткнення з ним перетворювача або температуру потрібно виміряти в точці, практично недоступній для устанавлення перетворювача, то застосовуються радіаційні перетворювачі, дія яких

заснована на залежності інтенсивності й спектральної сполуки випромінювання від температури тіла (яскравісні, радіаційні і колірні пірометри).

Дія термометрів опору заснована на зміні опору провідників і напівпровідників залежно від температури. Такі перетворювачі відносяться до параметричних. Матеріали для термометрів опору повинні мати високий і стабільний температурний коефіцієнт і стійкі фізико-хімічні властивості.

Металеві термометри опору виготовляють із чистих металів (платини, міді, нікелю, вольфраму). Зміна опору чистої платини в температурному діапазоні від 0 до +650°C може бути описана рівнянням [27]

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (2.91)$$

де  $A = 3,968 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ ;

$B = -5,85 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-2}$ ;

$R_0$  - опір при 0° С.

Для чистої міді в діапазоні температур – 50 ÷ + 180°C дійсне співвідношення

$$R_t = R_0(1 + \alpha^2), \quad (2.92)$$

де  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ .

Чутливий елемент термометра опору складається з каркаса, виконаного з кераміки, слюди або скла, на який намотується біфілярно дріт діаметром 0,04 ÷ 0,08 мм.

До кінців обмотки припаюються виводи зі срібного (а при температурі до 100°C із мідного) дроту. Чутливий елемент міститься в сталевий або латунний корпус із клемною голівкою. Для зменшення інерційності необхідно створити хороший тепловий контакт між чутливим елементом і корпусом. Глибина занурення термометра опору в контрольоване середовище становить від 150 до 300 мм. Конструкція термометра опору дана на рис. 2.64.



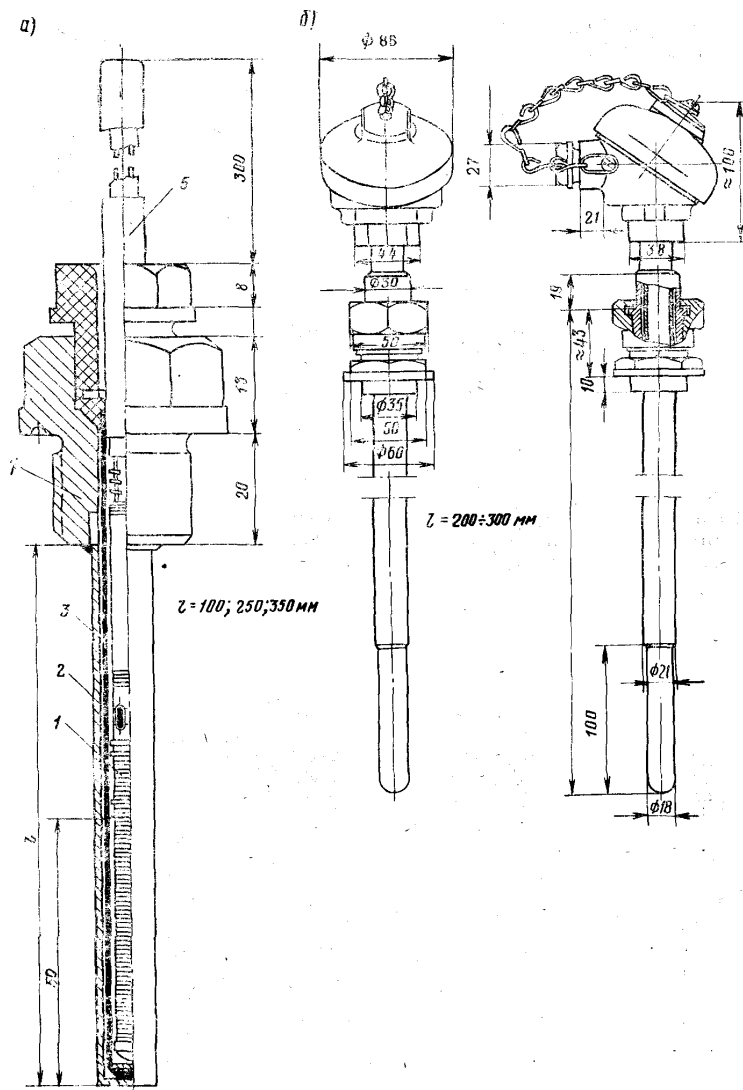


Рис. 2.64. Термометри опору:  
 а) – мідний ЭТМ-ХІ; б) – платиновий ЭТП-175:  
 1 – чутливий елемент; 2 – трубки; 3 – чохол; 4 – *штуцер* для  
 установлення на робочому місці; 5 – вивід (кабель СРГ)

Термометри опору мають досить високу інерційність. Постійна часу термометрів звичайного виконання становить 3 – 4 хв, а іноді й більше. Для збільшення теплового контакту між обмоткою й корпусом застосовують іноді обтиск останнього за формою чутливого елемента. У деяких випадках це дозволяє істотно знизити величину постійної часу. Крім цього, термометри опору мають більші розміри, що утрудняють, а в ряді випадків виключають

можливість їх застосування. Деякі дані стандартних термометрів опору наведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10

Технічні параметри термометрів опору

Матеріал чутливого елемента	$R_0, \text{Ом}$	Верхня межа вимірюваної температури	$\left(\frac{R_{100}}{R_0}\right)$	Діаметр дроту, мм	Матеріал каркаса
Платина	46,100 46,100 0,1; 0,5; 1,0	120 650 1300	1,391	0,05 ÷ 0,07 0,05 ÷ 0,07	Пластмаса, скло, слюда, плавлений кварц
Мідь	53,100	180	1,426	До 0,1	Пластмаса

**Напівпровідникові термометри опору** (темістори) виготовляють із суміші окислів різних металів ( $\text{Cu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ni}$  і ін.). Суміш окислів піддається обпалюванню, у результаті чого відбувається її спікання в однорідну масу, що супроводжується хімічними сполуками. Напівпровідникові термометри опору мають високий негативний температурний коефіцієнт (від 2,5 до 6% на градус). Залежність опору  $R$  від температури може бути описана виразом, Ом,

$$R = R_{\infty} e^{\frac{B}{T}}, \quad (2.93)$$

де  $T$  — температура,  $^{\circ}\text{K}$ ;

$R_{\infty}$ ,  $B$  — коефіцієнти, постійні для даного екземпляра термоопору.

Для обчислення коефіцієнтів  $R_{\infty}$  і  $B$  необхідно в (2.93) підставити два відомих значення  $R$  і відповідні температури.

Розв'язавши отриману систему рівнянь, одержимо формули для визначення  $R_{\infty}$  і  $B$ :

$$R_{\infty} = R_1 e^{\frac{B}{T_1}}, \quad (2.94)$$

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}. \quad (2.95)$$

Підставляючи значення  $R_{\infty}$  в (2.93), одержимо

$$R = R_1 e^{\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{T_1}\right)}. \quad (2.96)$$

У ролі  $R_1$  беруть звичайно опір термістора при кімнатній температурі  $T_1 = 293^{\circ}\text{K}$ , який прийнято вважати його номінальним опором.

Опір  $R_2$  вимірюють при температурі кипіння води, тобто  $T_2 = 373^{\circ}\text{K}$ .

$$B = 1365 \ln \frac{R_1}{R_2} \quad \text{Отримане значення } B \text{ використовується}$$

при розрахунку температурної характеристики.

Опір термістора (рис. 2.65, а) у значній мірі залежить від температури, при цьому характеристика різко нелінійна. Вольт-амперна характеристика термістора (рис. 2.65, б) також нелінійна через нагрівання струмом, що протікає по ньому.

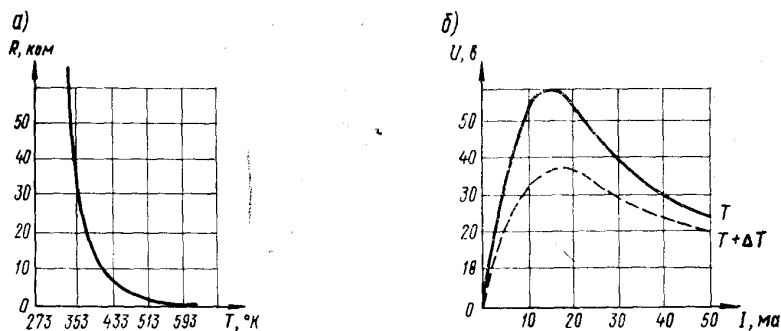


Рис. 2.65. Характеристики напівпровідникового термістора

Опір термістора набуває при цьому значення, що відповідає сумарній температурі (температура середовища

плюс перегрів). При цьому на форму вольт-амперної характеристики впливають не тільки температура навколишнього середовища, але й умови тепловіддачі.

Важлива характеристика термістора – його постійна часу. Величина її для різних конструкцій термісторів коливається від часток секунди до декількох хвилин.

Промисловістю випускається кілька десятків типів термісторів для використання їх з різною метою. Конструктивно термістори виготовляють у вигляді шайб, стрижнів, дисків і бусинок (рис. 2.66).

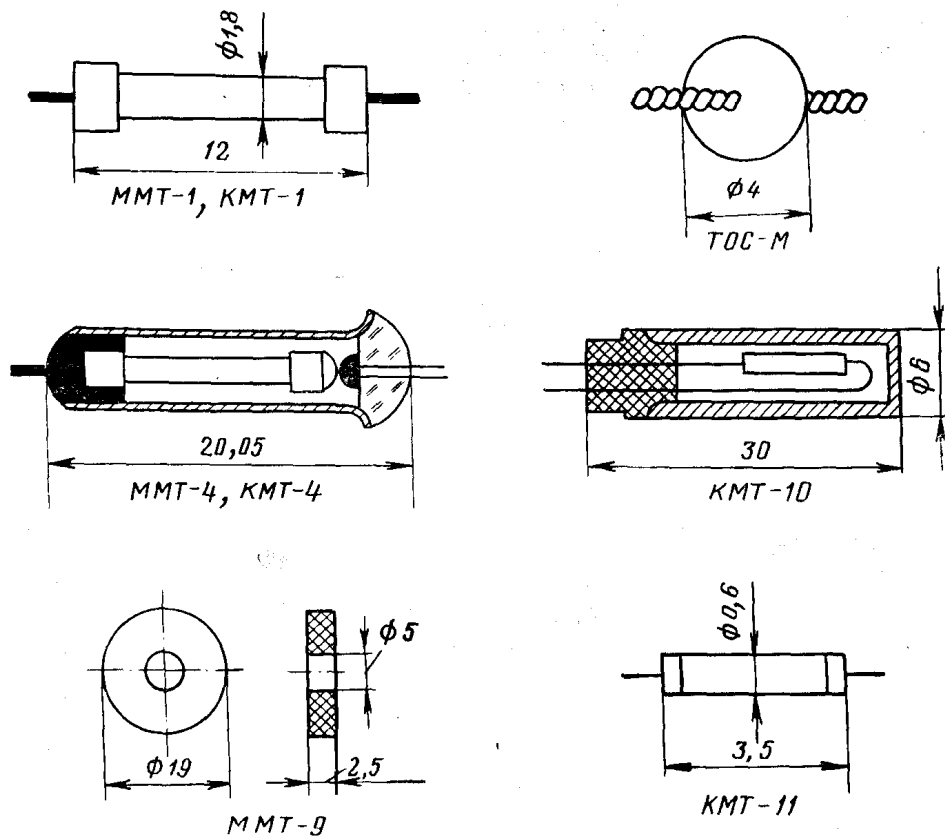


Рис. 2.66. Напівпровідникові термометри опору

Термістори випускають негерметизованими (для сухих приміщень) або герметизованими. При цьому напівпровідниковий стрижень міститься в металевий корпус і герметизується склом та оловом (наприклад, ММТ-4 і КМТ-4). Робочий інтервал температур термісторів від  $-70$  до  $+120^{\circ}\text{C}$  ( $203\div 393^{\circ}\text{K}$ ). Крім виміру температури, термістори, завдяки

негативному температурному коефіцієнту, використовуються для компенсації температурних похибок у різних вимірювальних приладах.

Основні недоліки термісторів, що обмежують їхнє застосування, – нестабільність характеристик у часі, а також великий розкид по опору (до 20 % номінального значення), тобто відсутність взаємозамінності.

### Вимірювальні кола термометрів опору

Для включення термометрів опору може бути використаний будь-яке коло для виміру опору. Найчастіше використовується міст Андерсона з логометром або автоматичний урівноважений міст. При дистанційному вимірі температури навколишнього середовища у вимір вноситься похибка тим більша, чим більше опір лінії зв'язку. При відстанях від точки контролю до приладу порядку кількох сотень метрів опір лінії зв'язку може становити близько 5 Ом, а опір термометра – 46,53 або 100 Ом.

Похибка виміру температури

$$\Delta t = \frac{\Delta r_l}{\Delta R_t}, \quad (2.97)$$

де  $\Delta r_l$  - збільшення опору лінії від зміни температури навколишнього середовища;

$\Delta R_t$  - збільшення опору перетворювача при зміні вимірюваної температури на  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta R_t = R_0 \alpha$ .

Для зменшення похибки застосовують трипровідну лінію зв'язку (рис. 2.67). Опори проводів лінії включаються в суміжні плечі, завдяки чому відбувається компенсація похибки.

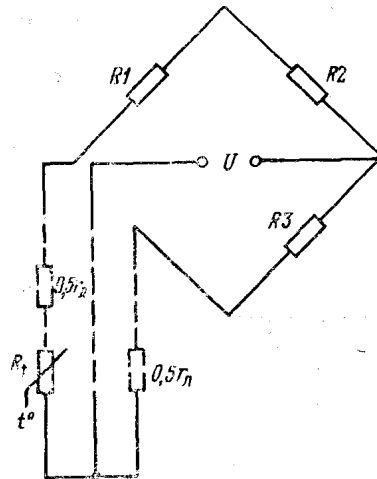


Рис. 2.67. Трьохпровідна лінія включення термометра опору

### Термоелектричні перетворювачі (термопари)

Термопара складається із двох електродів, два кінці яких спаяні або зварені, а два вільних включаються в зовнішнє коло. Якщо місце з'єднання провідників («робочий» або «гарячий» спай) помістити в середовище з температурою  $t_1$ , підтримуючи при цьому постійною температуру  $t_0$  її кінців (неробочий спай), то в колі з'явиться ЕРС, величина якої є функцією різниці температур  $t_1$  і  $t_0$ . При температурі холодного спаю, рівній нулю, величина термо-ЕРС.

$$E_{t_1} = \alpha t_1 + b t_1^2 c t_1^3, \quad (2.98)$$

де  $a, b, c$  - коефіцієнти, постійні для даної пари матеріалів.

Звичайно на практиці термо-ЕРС визначають за градусованими кривими або за таблицями. Термопари виготовляють із металів рідше з напівпровідникових матеріалів, внаслідок їх малої механічної міцності.

Термоелектричні якості різних металів характеризуються величиною й напрямком ЕРС, що розвивається ними в парі із платиною.

Нижче подається термо-ЕРС різних термоелектродів у парі із платиною при температурі робочого спаю  $+100^{\circ}\text{C}$  і неробочого  $0^{\circ}\text{C}$ :

Термо-ЕРС, $\mu\text{V}$		Термо-ЕРС. $\mu\text{V}$	
Кремній	+ 44,8	Срібло	+ 0,72
Хромель	+ 2,4	Платинородій	+ 0,64
Ніхром	+ 2,2	Платина	0
Манганін	+ 0,76	Нікель	- 1,5
Мідь	+ 0,76	Алюмель	- 1,7
Золото	+ 0,75	Константан	- 3,4
		Копель	- 4,5

При конструюванні термопар найкращі результати можна одержати при сполученні термопозитивних і термонегативних електродів. Крім того, необхідно враховувати температурний діапазон використання матеріалів.

Найбільш широко застосовуються в промисловості термопари платинородій-платинові, хромель-алюмелеві й хромель-копелеві. Платинородій-платинові термопари служать для виміру температури до  $1300^{\circ}\text{C}$ , хромель-алюмелеві – до  $1000^{\circ}\text{C}$  і хромель-копелеві – до  $600^{\circ}\text{C}$ . При вимірі температур до  $1800^{\circ}$  застосовують термопари з різних платинородієвих сплавів. Термопара ТХА-080 (рис. 2.68, б) служить для виміру температур до  $900^{\circ}\text{C}$ . Вона складається із двох термоелектродів, хромелевого (+) і алюмелевого (-), ізольованих фарфоровими кільцями один від одного та від стінок захисного чохла. Вільні кінці приєднані до затискачів, які розташовані на ізоляційній колодці усередині голівки. Робочий кінець ізольований від захисного чохла фарфоровим наконечником. Захисний чохол виконаний зі складених труб. Робоча ділянка  $l$  – зі сталі Х-28, неробоча – зі сталі 20. Робоча довжина термопари  $l$  – від 300 до 2500 мм, загальна довжина  $L$  – від 500 до 3000 мм. На робочому місці термопара кріпиться пересувним фланцем.

Термопара ТХК-834 (рисю 2.68, в) без захисної арматури і голівки служить для виміру температури сталевих поверхонь до 400°С. Її електроди, хромелевий (+) і копелевий (-), ізольовані один від одного фарфоровими кільцями. Пружинна втулка, приварена до робочого кінця термопари, забезпечує надійний контакт із контрольованою поверхнею.

Термопари працюють звичайно в комплекті з мілівольтметрами або автоматичними потенціометрами. При цьому, якщо температура холодного спаю відмінна від нуля, то виникає похибка виміру. Усунення цієї похибки може бути здійснено декількома способами.

Широко застосовується термостатування неробочих спаїв при температурі 0° або при іншій температурі, точно відомій. Термостатування при 0°С вимагає застосування ванни з льодом, який тоне, що практично не завжди здійснено. Температуру ж, відмінну від нуля, легко забезпечити в автоматичному термостаті. При цьому до показань приладу необхідно ввести виправлення, яке легко визначити із тарувальної кривої ( рис. 2.69).

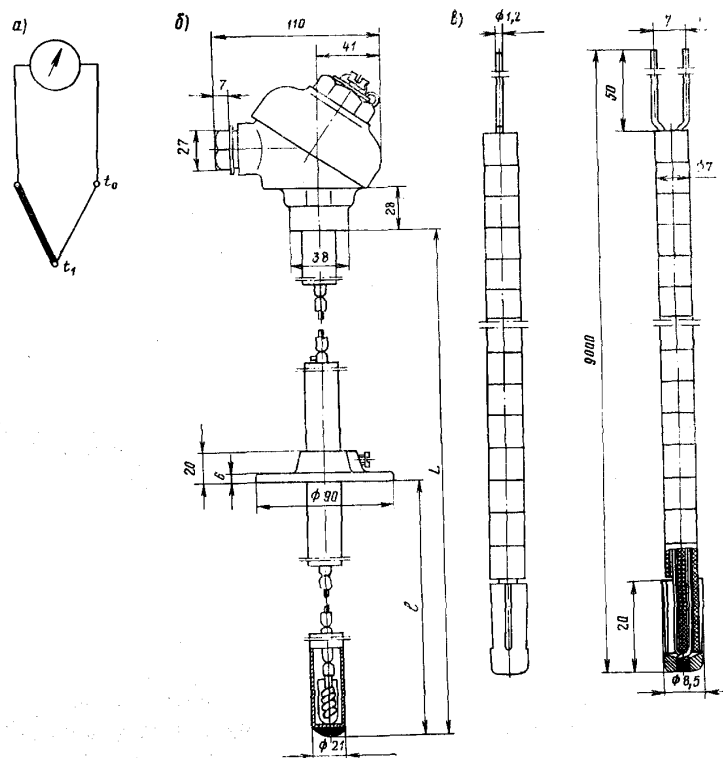


Рис. 2.68. Термоелектричні перетворювачі:  
а) позначення термопари в схемах; б), в) конструкція термопар



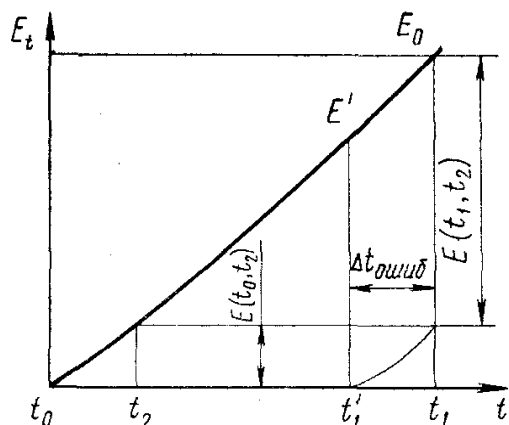


Рис. 2.69. Тарувальна крива термопары

При температурі неробочого спаю  $t_0=0^0$  і температурі робочого спаю  $t_1$  величина термо-ЕРС буде  $E_0$ . Якщо температура неробочого спаю буде більше, ніж  $t_0$ , наприклад  $t_2$ , величина термо-ЕРС зменшиться на величину  $E(t_2, t_0)$  і буде

$$E(t_1, t_2) = E(t_1, t_0) - E(t_2, t_0). \quad (2.99)$$

Це, як видно з рис. 2.69, еквівалентно зниженню температури робочого спаю до величини  $t_1'$  при збереженні температури неробочого спаю, рівній нулю. Вимірювальний прилад покаже при цьому температуру  $t_1'$  меншу, ніж  $t_1$ . При відомій температурі  $t_2$  поправка може бути уведена відповідно до рівняння (2.99).

В ряді вимірювальних приладів поправка на зміну температури неробочого спаю вводиться автоматично. Розглянемо схему автоматичного введення компенсації (рис. 2.70).

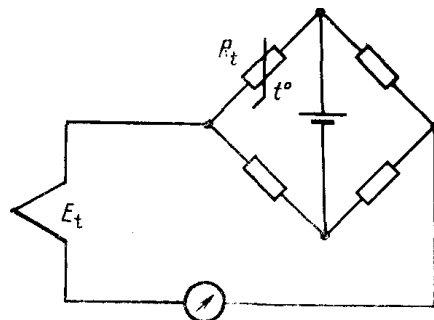


Рис. 2.70. Схема автоматичного введення поправки на температуру неробочих спаїв

У коло термопари включається міст, одним із плечей якого є термоопір, розташований поблизу неробочого спаю. Три плечі моста – термоне залежного опору. Параметри термоопору вибираються таким чином, щоб при температурі градування міст був збалансований, при змінах же температури неробочого спаю напруга розбалансу моста компенсує похибки термопари. Температурна похибка при цьому може бути значно зменшена.

### Напівпровідникові діоди й тріоди як перетворювачі температури

При зміні температури в напівпровідникових діодів різко змінюється величина зворотного опору, що може бути використане для виміру. Якщо через діод пропускається постійний струм (рис. 2.71, а) у запереному напрямку, то виходить практично лінійна залежність спадання напруги на *p-n*-переході від температури. При струмі  $1 \mu\text{A}$  чутливість становить до  $2,2 \text{ мВ/град}$ . Для виміру температури використовуються звичайно силові діоди типів Д7А-Д7Ж. Вони мають герметичне виконання, що дає можливість поміщати їх у контрольоване середовище. Крім діодів, для виміру температури використовують також напівпровідникові тріоди (рис. 2.61, б), що дозволяють одержати чутливість до  $0,4 \text{ В/град}$ .

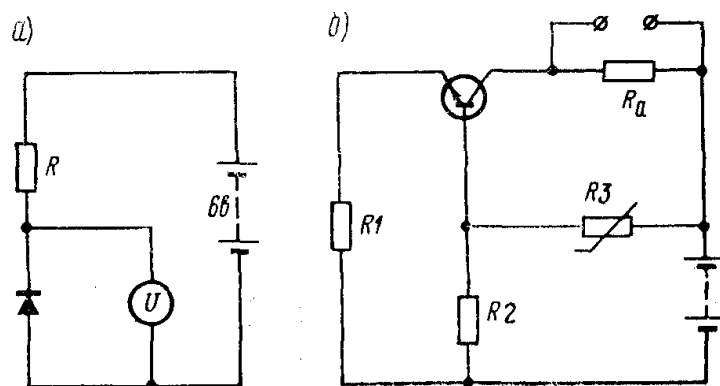


Рис. 2.71. Схеми включення напівпровідникових діодів і тріодів як датчиків температури

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Кондратець В.О. Автоматика та автоматизація виробництва машин: Підручник: У 2 ч.: Ч.1. Теорія і технічні засоби систем. – К.:Вища школа, 1993. – 319 с.
2. Автоматика и автоматизация производственных процессов в строительстве и путевом хозяйстве: Учеб. для вузов ж.д. тр-та / В.Д. Яковлев. – М.: Транспорт, 1990. – 279 с.
3. Мартыненко И.И. Основы автоматики и микропроцессорной техники. – К.: Вища школа, 1988. – 248 с.
4. Токаренко В.М. Гидропривод и гидрооборудование автотранспортных средств: Учеб. пособие. – К.: Либідь, 1991. – 232 с.
5. Задачи по объемному гидроприводу /А.В. Перекрестов – К.: Вища школа, 1983.-144 с.
6. Векслер В.М., Муха Т.И., Солофенко В.Н. Автоматическое регулирование погрузочно-разгрузочных и строительных машин. – Л.: Машиностроение, 1967. – 249 с.
7. Жильцов В.Р., Зеленов А.Ф., Кокин А.Г. Двигатели внутреннего сгорания. – М.: Оборонгиз, 1955. – 471 с.
8. Попов Е.П. Автоматическое регулирование и управление. – М.: Наука, 1966. – 388 с.
9. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. – М.: Высш. шк., 1991. – 304 с.
10. Бермант А.Ф., Араманович И.Г. Краткий курс математического анализа. – М.: Наука, 1971. – 735 с.
11. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1966. – 992 с.
12. Строительные машины: Справочник: В 2т. Т. 1: Машины для строительства промышленных, гражданских сооружений и дорог / А.В. Раннев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 496 с.
13. Раевский Н.П. Датчики механических параметров машин. – М.: Изд. АН СССР, 1960. – 188 с.
14. Рuzга З. Электрические тензометры сопротивления / Пер. с чешского. – М.: Мир, 1964. – 356 с.
15. Логинов В.Н. Электрические измерения механических величин. – М.: Энергия, 1970. – 80 с.

16. Методы и приборы тензометрии //Сборник трудов /Под ред. Н.И. Пироговского. – М.: ГОСИНТИ, 1964. – Вып. 1-7. – 896 с.
17. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования (справочные материалы). – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.
18. Суранов О.В. Вимірювальні перетворювачі систем автоматики будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин: Конспект лекцій. Розд.: Вимірювальні перетворювачі тиску. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – 26 с.
19. Емельянов А.И., Емельянов В.А., Калинина С.А. Практические расчеты в автоматике. – М.: Машиностроение, 1967. – 316 с.
20. Справочник машиностроителя: В 6 т. / Под ред. С.В. Серенсена. – М.: МАШГИЗ, 1962. – Т. 3. – 651 с.
21. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие/ Под ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 283 с.
22. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики: Учеб. для сред. спец. заведений. – М.: Высш. шк., 1991. – 304 с.
23. Нудлер Г.И., Тульчин И.К. Основы автоматизации производства. – М.: Высш. шк., 1968. – 209 с.
24. Автоматика и автоматизация производственных процессов в строительстве и путевом хозяйстве: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. /В.Ф. Яковлев, Н.М. Булаш, В.В. Гниломедов и др.; Под ред. В.Ф. Яковлева. – М.: Транспорт, 1990. – 279 с.
25. Основы автоматизации производственных процессов в дорожном строительстве /В.И. Колышев, Б.С. Марышев, В.А. Рихтер и др. – М.: Транспорт, 1973. – 208 с.
26. Элементы гидропривода: Справочник / Е.И. Абрамов, К.А. Колисниченко, В.Т. Маслов. – К.:Техніка, 1977. – 320 с.
27. Автоматизация производственных процессов в дорожном строительстве / Л.Я. Цикерман. – М.: Транспорт, 1972. – 316 с.
28. Добронравов С.С., Дронов В.Г. Строительные машины и основы автоматизации: Учеб. для строит. вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 575 с.

## Додаток

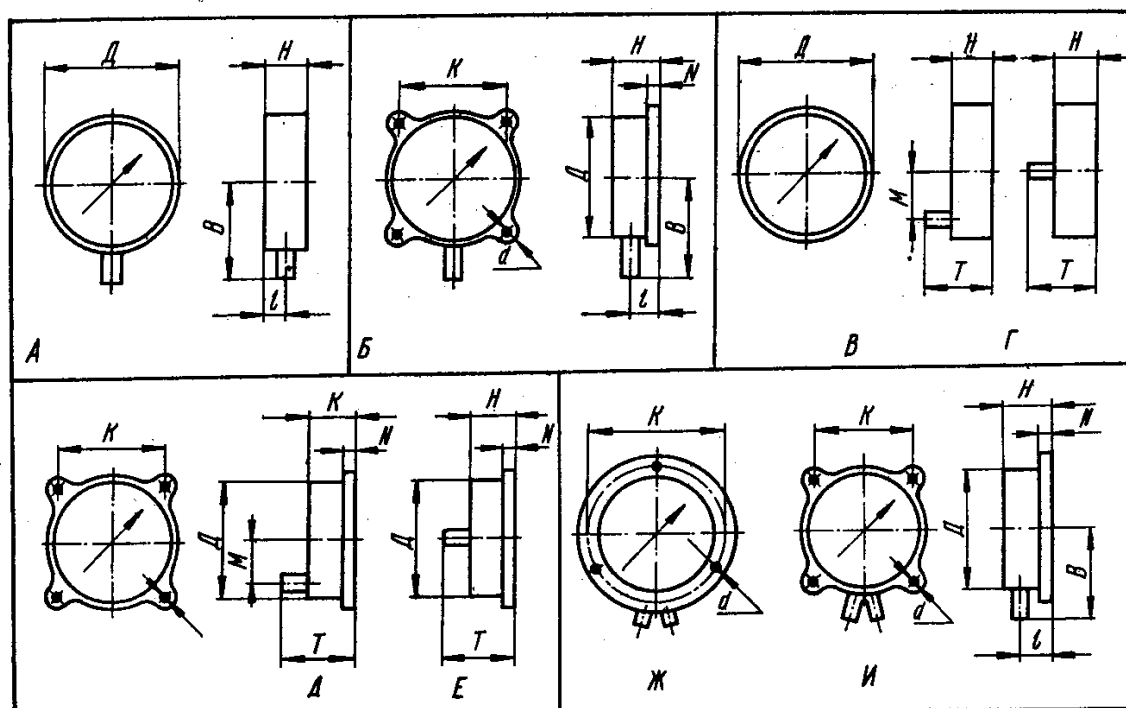


Рис. Д.1. Конструктивні схеми пружинних манометрів

Розміри манометрів, які найчастіше використовують у БКМ, наведені у табл. Д.1 та Д.2.

Таблиця Д.1

Манометри у корпусі  $\varnothing 60$  мм

Тип	Розміри, мм							Конструктивна схема
	<i>B</i>	<i>l</i>	<i>A</i>	<i>K</i>	<i>d</i>	<i>N</i>	<i>T</i>	
MT-1	55,2	15,55	-	-	-	-	-	А
MT-2	55,25	15,55	63	48	4,5	5	-	Б
MT-3	-	-	63	48	4,5	5	62,7	Е
MT-4	-	-	-	-	-	-	62,7	Г

**Примітки:**

1. Клас точності – 4.
2. Розміри  $D=60$  мм,  $H=36$  мм.
3. Приєднувальні штуцери манометрів виконані за типом “в” (рис. Д.2).
4. Верхня межа вимірювання тиску,  $\text{кГ/см}^2$ : 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160; 250; 400.

Таблиця Д.2

Манометри у корпусі  $\varnothing 40$  мм

Тип	Верхня межа вимірювань, кг/см <sup>2</sup>	Тип	Верхня межа вимірювань, кг/см <sup>2</sup>	Тип	Верхня межа вимірювань, кг/см <sup>2</sup>
М1Д-1	1,6	М1Д-7	16	М1Д-12	160
М1Д-2	2	М1Д-8	25	М1Д-13	250
М1Д-3	2,5	М1Д-9	40	ММ-40С2	250
М1Д-4	4	ММ-40С1	40	ММ-40С3	250
М1Д-5	6	М1Д-10	60	М1Д-14	400
М1Д-6	10	М1Д-11	100		

## Примітки:

1. Манометри М1Д-1 ÷ М1Д-14 та ММ-40С3 мають клас точності 2,5, манометри ММ-40С1 та ММ-40С2 – клас точності 4,0.

2. Конструктивна схема манометрів – Г (рис. Д.1); основні розміри: Д=40мм; Н=25мм; Т=44 мм;

3. Приєднувальні штуцери виконуються за типом “г” (рис. Д.2).

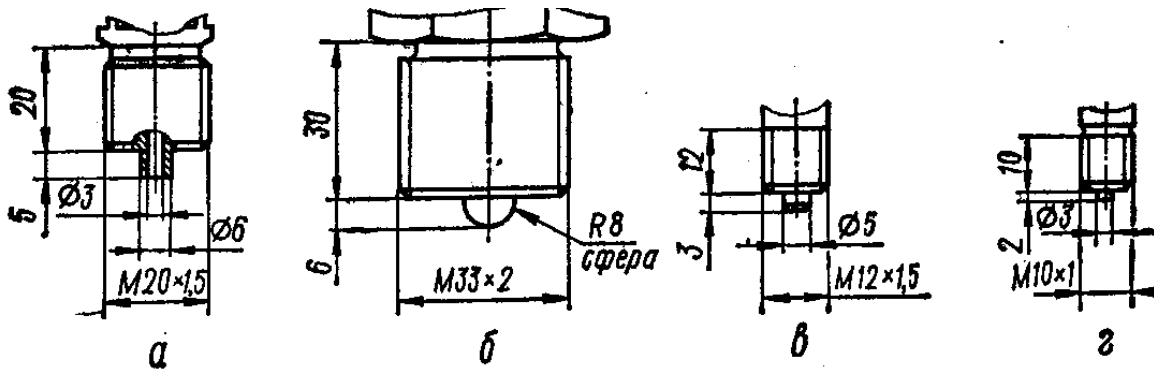


Рис. Д.2. Типи приєднувальних штуцерів для манометричних приладів

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**  
**«Основи автоматизації будівельних, дорожніх і**  
**вантажно-розвантажувальних машин»**  
**Частина I «Вимірювальні перетворювачі»**  
для студентів спеціальності 7.090214  
“Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні  
машини і устаткування”  
всіх форм і строків навчання

Відповідальний за випуск Суранов О.В.

Редактор

---

Підписано до друку  
Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.  
Умовн.-друк. Арк.                      Обл. вид. арк.  
Замовлення №                      Тираж 300    Ціна

---

---

Друкарня Укрдазту.  
310050, Харків - 50, пл. Фейербаха, 7

Таблиця 2.8

Значення коефіцієнтів до формул для розрахунків манометричних трубок

Переріз трубки	$a/b$	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10
Еліптичні (рис. 2.40, а)	$\alpha$	0,750	0,636	0,566	0,493	0,452	0,430	0,416	0,400	0,390
	$\beta$	0,083	0,062	0,053	0,045	0,044	0,043	0,042	0,042	0,042
	$S$	0,098	0,078	0,066	0,057	0,052	0,048	0,047	0,046	0,045
	$\varepsilon$	0,833	0,662	0,584	0,499	0,459	0,439	0,429	0,416	0,404
	$n$	0,197	0,149	0,142	0,121	0,111	0,106	0,102	0,098	0,095
Площинно- овальний (рис. 2.40, б)	$\alpha$	0,637	0,594	0,548	0,480	0,437	0,408	0,388	0,360	0,343
	$\beta$	0,096	0,110	0,115	0,121	0,121	0,121	0,121	0,119	0,118
	$S$	0,083	0,0848	0,0815	0,0743	0,0690	0,0652	0,0624	0,0585	0,0560
	$\varepsilon$	0,811	0,713	0,652	0,591	0,552	0,524	0,504	0,476	0,458
	$n$	0,149	0,1667	0,166	0,152	0,140	0,132	0,126	0,118	0,113

Основні розміри манометрів наведені у додатку.





