

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Навчальний посібник

Під загальною редакцією В.В. Ткачова

Друге видання, доповнене та перероблене

Частина перша

СЕНСОРНА ТЕХНІКА

Дніпро
НТУ «ДП»
2019

УДК 681

Т 48

Рекомендовано вченою радою університету як навчальний посібник для студентів напрямів підготовки 151 Автоматизація та приладобудування і 123 Інформаційні технології (протокол № 8 від 13.06.2018).

Рецензенти:

А.І. Купін, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих систем та мереж ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

І.В. Жуковицький, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка А. Лазаряна.

Т 48 **Технічні засоби автоматизації: навч. посіб.: у 2 ч. Ч. 1. Сенсорна техніка /** В.В. Ткачов, М.І. Стаднік, В.І. Шевченко, М.В. Козарь, О.В. Карпенко ; М-во освіти і науки України, НТУ «Дніпровська політехніка». – 2-ге вид., доповн. та переробл. – Дніпро : НТУ «ДП», 2019. – 144 с.

ISBN 978-966-350-701-9

Викладено основні поняття та визначення автоматики, фізичні принципи роботи первинних перетворювачів, вимоги до датчиків, схеми, конструкції та параметри датчиків, їх переваги й недоліки, а також галузі застосування.

Призначено для студентів напрямів підготовки 151 Автоматизація та приладобудування і 123 Інформаційні технології, а також для студентів інших спеціальностей, у навчальних планах яких передбачено дисципліни, пов'язані з автоматизацією та сенсорною технікою.

УДК 681

ISBN 978-966-350-701-9

© В.В. Ткачов, М.І. Стаднік, В.І. Шевченко,
М.В. Козарь, О.В. Карпенко, 2019

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2019

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	6
1.1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ.....	6
1.2 СТРУКТУРА СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	9
1.3 ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ПРИНЦИПИ КЕРУВАННЯ.....	13
1.4 ВИДИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	17
1.5 РЕЖИМИ РОБОТИ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ.....	20
1.6 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ....	22
2 ДАТЧИКИ.....	29
2.1 СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДАТЧИКІВ.....	29
2.2 ТИПИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ.....	30
2.2.1 Амплітудно-безперервні сигнали.....	30
2.2.2 Амплітудно-імпульсні сигнали.....	31
2.2.3 Частотно-безперервні сигнали.....	32
2.2.4 Частотно-імпульсні сигнали.....	32
2.2.5 Фазово-безперервний сигнал.....	33
2.2.6 Фазово-імпульсні сигнали.....	33
2.2.7 Широтно-імпульсні сигнали.....	34
2.3 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКІВ.....	35
2.3.1 Статична характеристика вхід-вихід.....	35
2.3.2 Динамічна характеристика вхід-вихід.....	39
2.3.3 Похибки перетворення датчиків.....	41
2.4 ВИМІРЮВАЛЬНІ СХЕМИ ДАТЧИКІВ.....	43
2.4.1 Потенціометрична схема.....	44
2.4.2 Диференціальна схема.....	46
2.4.3 Мостова схема.....	47
2.5 ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ Й ДАТЧИКИ.....	52
2.5.1 Потенціометричні перетворювачі.....	53
2.5.2 Терморезистивні перетворювачі.....	58
2.5.3 Тензорезистивні перетворювачі.....	63
2.5.4 Магніторезистивні перетворювачі.....	68
2.5.5 Фоторезистивні перетворювачі.....	73
2.5.6 Ємнісні перетворювачі.....	78

2.5.7	Індуктивні перетворювачі.....	82
2.5.8	Перетворювачі Холла.....	89
2.5.9	Електроконтактні перетворювачі.....	95
2.5.10	Тахогенераторні перетворювачі.....	105
2.5.11	Термоелектричні перетворювачі.....	112
2.5.12	П'єзоелектричні перетворювачі	121
2.5.13	Перетворювачі кутових переміщень	125
2.5.14	Безконтактні індуктивні датчики.....	132
	Список літератури	142

Вступ

Автоматизація – один з напрямів науково-технічного прогресу, застосування саморегулюючих технічних засобів, економіко-математичних методів і систем керування, які звільняють людину від участі в процесах отримання, перетворення, передачі й використання енергії, матеріалів або інформації, істотно зменшують ступінь цієї участі або трудомісткість виконуваних операцій.

Автоматизуються виробничі процеси, проектування, планування та керування підприємствами, наукові дослідження, навчання, бізнес-процеси та інші сфери людської діяльності.

У даній книзі розглядаються технічні засоби автоматизації виробничих і технологічних процесів.

Цілі автоматизації – підвищення продуктивності праці, поліпшення якості продукції, збільшення обсягів продукції, що випускається, зниження енерговитрат, витрат сировини, зниження кількості або виключення продукції невідповідної якості, оптимізація керування, усунення людини від виробництв, небезпечних для здоров'я, підвищення безпеки, скорочення чисельності обслуговуючого персоналу, підвищення екологічності виробництва.

Автоматизація технологічного процесу – сукупність методів і засобів, призначених для реалізації системи (або систем), що дозволяє здійснювати керування самим технологічним процесом без безпосередньої участі людини або залишає за людиною права прийняття найбільш відповідальних рішень.

Як правило, у результаті автоматизації технологічного процесу створюється АСКТП (автоматизована система керування технологічним процесом), а також може застосовуватися часткова, комплексна або повна автоматизація.

Частковою або локальною автоматизацією називається автоматизація окремих апаратів, машин, технологічних операцій. Застосовується вона, коли керування процесами внаслідок їх складності або швидкоплинності практично недоступно людині, а також стосовно діючого обладнання. Локальна автоматизація широко здійснюється практично на всіх підприємствах різних галузей промисловості.

Комплексна автоматизація передбачає автоматизацію технологічної ділянки, цеху або підприємства, що функціонують як єдиний автоматизований комплекс. При комплексній автоматизації підприємства система керування переходить у категорію АСКП (автоматизована система керування підприємством).

Повна автоматизація – це найвищий ступінь рівня автоматизації, при якій усі функції контролю й керування виробництвом (на рівні підприємства) передаються технічним засобам. На сучасному рівні розвитку повна автоматизація практично не застосовується, оскільки функції контролю залишаються за людиною.

Таким чином, у даному виданні будемо розглядати технічні засоби, що застосовуються в першу чергу для створення локальних систем автоматизації і в другу – для безпосереднього об'єднання локальних систем в АСКТП.

1 СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

1.1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

Цілеспрямовані процеси, що виконує людина з метою задоволення всіляких потреб, являють собою організовану сукупність дій – операцій. Їх можна розподілити на робочі операції та операції керування.

Робочі операції – це дії, які безпосередньо необхідні для виконання процесу згідно з природними законами, наприклад, зняття стружки при обробці деталі, обертання вала двигуна та ін.

Для правильного та високоякісного виконання робочих операцій їх необхідно направляти діями другого роду – **операціями керування**, які забезпечують у необхідні моменти часу початок, порядок проходження та припинення робочих операцій. Сукупність таких операцій складає **процес керування**, який може здійснювати безпосередньо людина або спеціальні технічні засоби. Заміну праці людини в операціях керування називають **автоматизацією**.

Під **автоматизацією** розуміють проведення тих чи інших операцій без участі людини або з обмеженою її участю. У першому випадку процеси називають **автоматичними**, а в другому – **автоматизованими**.

Кожний процес керування передбачає наявність мети керування, об'єкта керування та керуючого ним пристрою.

Мета керування – це результат, який повинен бути досягнутий у процесі керування або після його закінчення. Метою керування в промисловості може бути підтримання значення будь-якої фізичної величини із заданою точністю (швидкість прокату, тиск пару в котлі, температура нагрівання заготовок у печі, завантаження двигуна видобувного гірничого комбайна) або зміна цієї величини за заданим законом (переміщення робота, частота обертання двигуна прокатного стана, швидкість переміщення кліті шахтної підіймальної машини).

Об'єкт керування – це об'єкт (обладнання), що реалізує технічний (технологічний) процес, при керуванні яким може бути досягнута мета керування. У промисловості об'єктами керування можуть бути, наприклад, прокатний стан, його складові частини, нагрівальна піч, робот, конвеєр, металообробний верстат.

Пристрій керування – це пристрій, що здійснює вплив на об'єкт керування для досягнення певної мети.

Сукупність пристрою керування разом із засобами керування та об'єктом керування утворюють **систему керування**.

Процес керування складається з одержання інформації про об'єкт, аналізу отриманої інформації відповідно до закону керування та вироблення керуючих впливів на виконавчі механізми з метою отримання бажаних значень якості роботи об'єкта.

Науковою основою автоматизації є **кібернетика** – наука про керування і зв'язок у живих організмах, машинах та суспільстві. Загальні закони керування та зв'язку в машинах вивчає технічна кібернетика, складовими частинами якої є

теорія інформаційних пристроїв, що пов'язана із збиранням та переробкою інформації, і теорія автоматичного керування. Вона займається правилами побудови автоматичних систем та розробкою методів їх аналізу та синтезу.

Будь-який технічний процес характеризується сукупністю фізичних величин, які називаються показниками або координатами процесу. При автоматизації того чи іншого процесу необхідно так побудувати систему керування, щоб вона забезпечила виконання його необхідних показників.

Це буде можливим тільки у тому випадку, коли система забезпечує необхідну якість керування.

Для здійснення якісного керування і побудови автоматичних систем необхідні знання двоякого виду: по-перше, конкретні знання даного технічного процесу, його технології і, по-друге, знання принципів і методів керування, які є загальними для різноманітних об'єктів і процесів. Конкретні спеціальні знання дають можливість визначити, що і як слід змінювати для одержання необхідного результату.

Під час автоматизації виникає необхідність у виконанні різних видів інформації керування. До одного з них належать початок (включення), припинення (відключення) даної операції та перехід від однієї операції до іншої (переключення). Різноманітні аспекти цих видів операцій є предметом теорії перемикальних пристроїв.

Друга група операцій пов'язана з контролем за координатами з метою установити, чи не вийшли вони за дозволені межі. Ця група пов'язана з виміром значень координат та видаванням результатів виміру в зручній для людини-оператора формі. Операції цієї групи вивчають у спеціальних дисциплінах.

Для правильного та високоякісного виконання процесу деякі з його координат – координати керування – повинні підтримуватися на заданому рівні або ж змінюватися за певним законом. Тому третю групу операцій керування – операції з підтриманням заданого закону зміни координат – вивчають у теорії автоматичного керування.

Необхідність в керування значеннями координат виникає в тому випадку, коли нормальний хід процесу порушується через різного роду збурення, тобто коливання навантаження, вплив зовнішнього середовища або внутрішніх перешкод. Процес керування полягає в тому, щоб знайти та реалізувати керуючі впливи, які б забезпечили досягнення мети керування.

Дуже важливими поняттями, що лежать в основі всієї автоматики, є «алгоритми функціонування» та «алгоритм керування».

Алгоритмом називають усяке правило або припис, що встановлює порядок виконання тих чи інших операцій. Ці операції можуть виконуватися або людиною, або засобами автоматики. В автоматичній термін «алгоритм» використовують у поєднанні зі словами «функціонування» та «керування».

Алгоритм функціонування системи – це сукупність приписів (правил), що забезпечують правильне виконання того чи іншого процесу. Згідно з цими правилами проходить зміна показників (координат) для нормального необхідного проведення процесу. Алгоритм функціонування складається на

основі технологічних, економічних та інших вимог до виконання того чи іншого процесу.

Будь-який об'єкт керування в процесі свого функціонування зазнає впливу зовнішнього середовища. Цей вплив частіше за все має збурюючий характер, тобто середовище є перешкодою для правильного функціонування об'єкта. Тому до об'єкта прикладають спеціальні впливи, які спрямовані на усунення або компенсацію негативного впливу середовища та виконання алгоритму функціонування. Сукупність правил, що визначають характер впливів на об'єкт керування з метою виконання його алгоритму функціонування називають **алгоритмом керування** (програмним алгоритмом).

Звичайно, керування не може повністю компенсувати вплив збурень, тому алгоритм функціонування об'єкта керування виконується лише приблизно. Якість роботи автоматичної системи буде залежати від того, наскільки грамотно вона побудована та які принципи керування в неї закладені. До недавнього часу в автоматичці найбільш поширеними були неперервні системи автоматичного керування, у яких керуючі величини (координати) є неперервними функціями від керуючих величин. На сучасному етапі розвитку виробництва такі системи не можуть забезпечити досить високі показники якості роботи. Тому широке розповсюдження зараз набувають дискретні (цифрові) автоматичні системи, побудовані на базі мікропроцесорних засобів керування. Ці системи мають значні переваги перед неперервними.

Сучасні системи керування будуються на базі **технічних засобів автоматизації**, які на сучасному етапі є комплексом апаратних і програмних засобів.

Автоматизація, за винятком найпростіших випадків, вимагає комплексного, системного підходу до вирішення поставленого завдання. **Апаратними засобами** для реалізації завдань автоматизації є датчики, виконавчі пристрої, пристрої вводу/виводу, пристрої керування, комп'ютери, засоби передачі інформації та багато іншого. **Програмними засобами** є методи обробки інформації, методи обчислень, алгоритмізація керуючих функцій і т. ін. Увесь цей комплекс засобів зазвичай називають системами або системами керування.

Розрізняють керування ручне, автоматичне й автоматизоване. За видом керування розрізняють системи автоматичного керування і системи автоматизованого керування.

Автоматичне керування – це процес керування, який відбувається без втручання людини безпосередньо в процес керування. Автоматична система керування включає в себе комплекс апаратних і програмних засобів, що здійснюють збір інформації, її обробку та формування відповідно заданому алгоритму функціонування керуючих сигналів безпосередньо на виконавчі пристрої. Людська участь у таких системах потрібна тільки для обслуговування системи і контролю її функціонування.

Автоматизоване керування – це процес керування, у якому людина бере участь як елемент системи керування. Як правило, за людиною залишається загальне керування та вибір режимів і параметрів роботи системи або

керування процесами, що не піддаються автоматизації. Але при всьому цьому безліч функцій і операцій системою відпрацьовуються в автоматичному режимі, особливо це реалізація функцій безпеки, захисних відключень і блокувань. Загалом, автоматизована система керування за складом апаратних і програмних засобів, а також функціям, що вона реалізує, відповідає автоматичній системі, яка розширена на апаратному та програмному рівнях у напрямку людино-машинного інтерфейсу (органи керування і відображення інформації). Людська участь у таких системах має безпосереднє відношення до процесу керування, а не тільки стосовно обслуговування системи і контролю її функціонування.

Залежно від функцій, що реалізує система автоматичного або система автоматизованого керування, часто використовують термінологію, що їх відрізняє, а в ряді випадків застосовують узагальнене поняття «система керування».

Системи, що реалізують керування у вигляді функцій регулювання або стабілізації, називаються «**системами регулювання**».

Системи, що реалізують керування у вигляді логічних функцій, називаються «**системами логічного керування**», «**системами дискретного керування**» і просто «**системами керування**», підкреслюючи тим самим, що мова йде не про регулювання.

Але слід зазначити, що існують системи, які реалізують і функції логічного керування, і функції регулювання. І до цих систем застосовують загальний термін «**системи керування**».

1.2 СТРУКТУРА СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Як вже відмічалось, за функціональною ознакою системи керування можна розділити власне на системи керування і системи регулювання. У ряді випадків системи керування включають у себе функції системи керування і функції системи регулювання, а в ряді випадків системи регулювання входять до складу систем керування (тобто знаходяться під загальним керуванням системи керування). Структури таких систем дещо відрізняються.

Структура систем керування

У загальному випадку систему керування (що реалізує функції логічного керування) деяким технологічним об'єктом можна уявити структурою, що складається з об'єкта керування (ОК) і системи керування (СК) (рис. 1.1).

У системі керування можна виділити такі елементи, як пристрій керування (ПК), датчики (Д1 ... Дn) і виконавчі пристрої (ВП1 ... ВПn).

Технологічні параметри об'єкта керування перетворюються датчиками в електричні сигнали, які передають інформацію на входи пристрою керування. Ці сигнали прийнято називати вхідними сигналами, інформаційними сигналами або вхідною інформацією.

Пристрій керування, обробляючи вхідні сигнали, відповідно до заданого алгоритму керування (закону керування) формує керуючі сигнали на виконавчі

пристрої, які впливають на об'єкт керування. Ці сигнали прийнято називати вихідними сигналами, керуючими сигналами або вихідною інформацією.

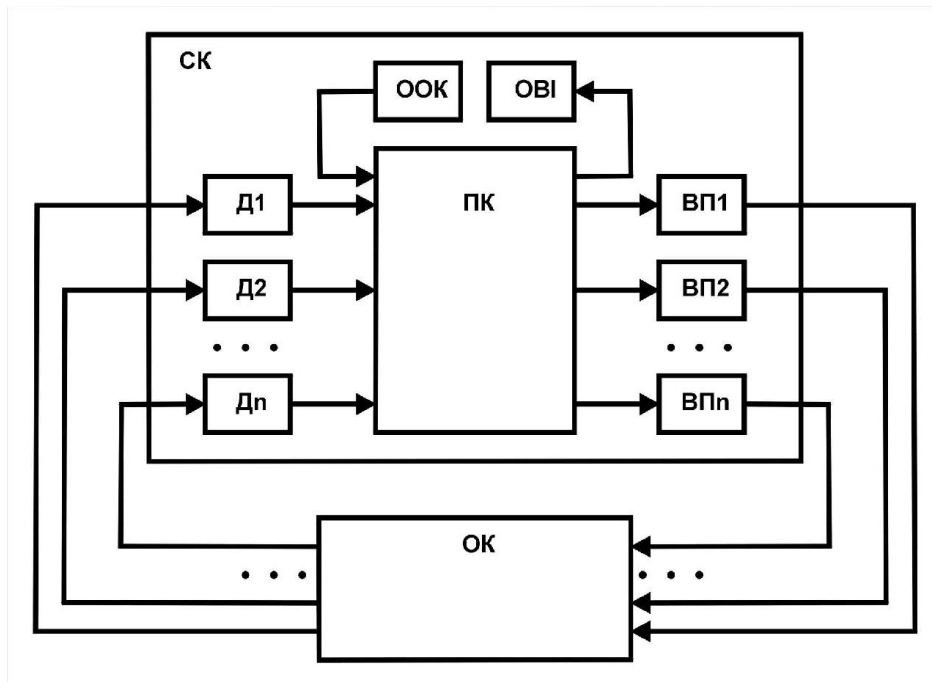


Рис. 1.1. Узагальнена структура системи керування

Невід'ємною частиною системи керування є органи оперативного керування (ООК) та органи відображення інформації (ОВІ), які конструктивно часто є єдиним цілим з пристроєм керування (ПК). Але в будь-якому випадку сигнали від органів керування є вхідними сигналами для пристрою керування, а сигнали для органів відображення інформації є вихідними для пристрою керування.

У системах керування органи керування та органи відображення інформації призначені для оперативного керування технологічним процесом і відображення поточного стану об'єкта і технологічних параметрів у процесі роботи системи керування, а також завдання технологічних параметрів і режимів роботи системи керування.

З точки зору поняття системи керування датчики і виконавчі пристрої – це технічні засоби системи керування, що є також структурними елементами системи керування. Але з точки зору керування та автоматизації можна сказати, що датчики та виконавчі пристрої є складовими частинами об'єкта керування, що пов'язаний із пристроєм керування потоками вхідної та вихідної інформації.

Структура систем регулювання

У загальному випадку систему регулювання деякого технологічного параметра об'єкта керування можна подати структурою, що складається з об'єкта керування (ОК) і системи регулювання (СР) (рис. 1.2). Для простоти показана одноконтурна система регулювання (регулювання одного параметра).

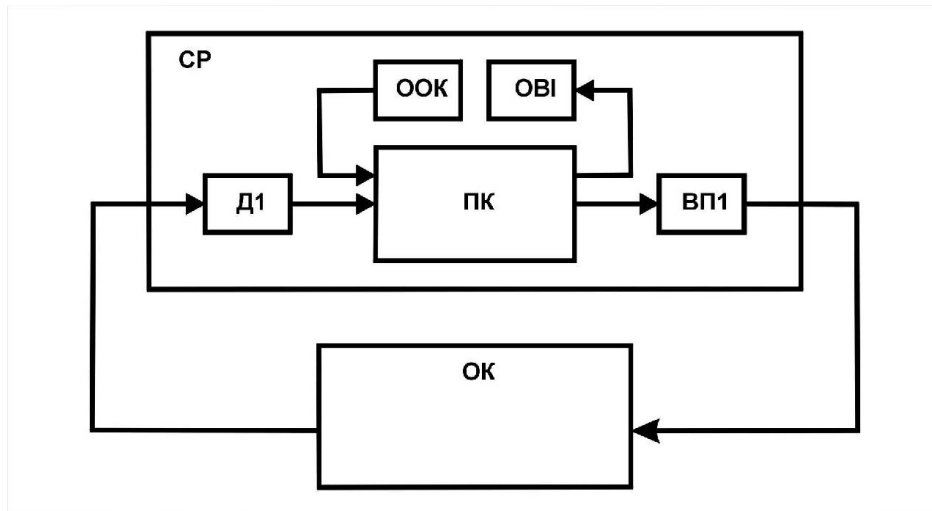


Рис. 1.2. Узагальнена структура системи регулювання

Загалом структура системи регулювання відповідає структурі системи керування, що реалізує функції логічного керування і складається з таких же структурних елементів. Відмінністю системи керування і системи регулювання є набір функцій, які реалізує пристрій керування. У першому випадку – функції логічного керування, а в другому – функції регулювання. Фактично пристрій керування в системі регулювання реалізує необхідний закон регулювання (P, PI, PD, PID).

У таких системах регулювання органи керування та органи відображення інформації в основному призначені для завдання параметрів регулятора і відображення поточного значення технологічного параметра в процесі роботи системи регулювання.

Структура систем керування та регулювання

Система керування та регулювання може бути реалізована двома способами. Перший – це система керування, що одночасно реалізує функції керування і функції регулювання. Другий – це система керування, до складу якої входить система регулювання (у вигляді підсистеми, що реалізує функції регулювання).

По суті структура системи керування, що поєднує функції керування і функції регулювання, відповідає структурі системи керування (рис. 1.3).

Просто частина технічних засобів задіяна в контурі керування, а частина технічних засобів (позначена на рисунку *) – в контурі регулювання. У пристрої керування функції керування і функції регулювання реалізуються на програмному або апаратному рівні.

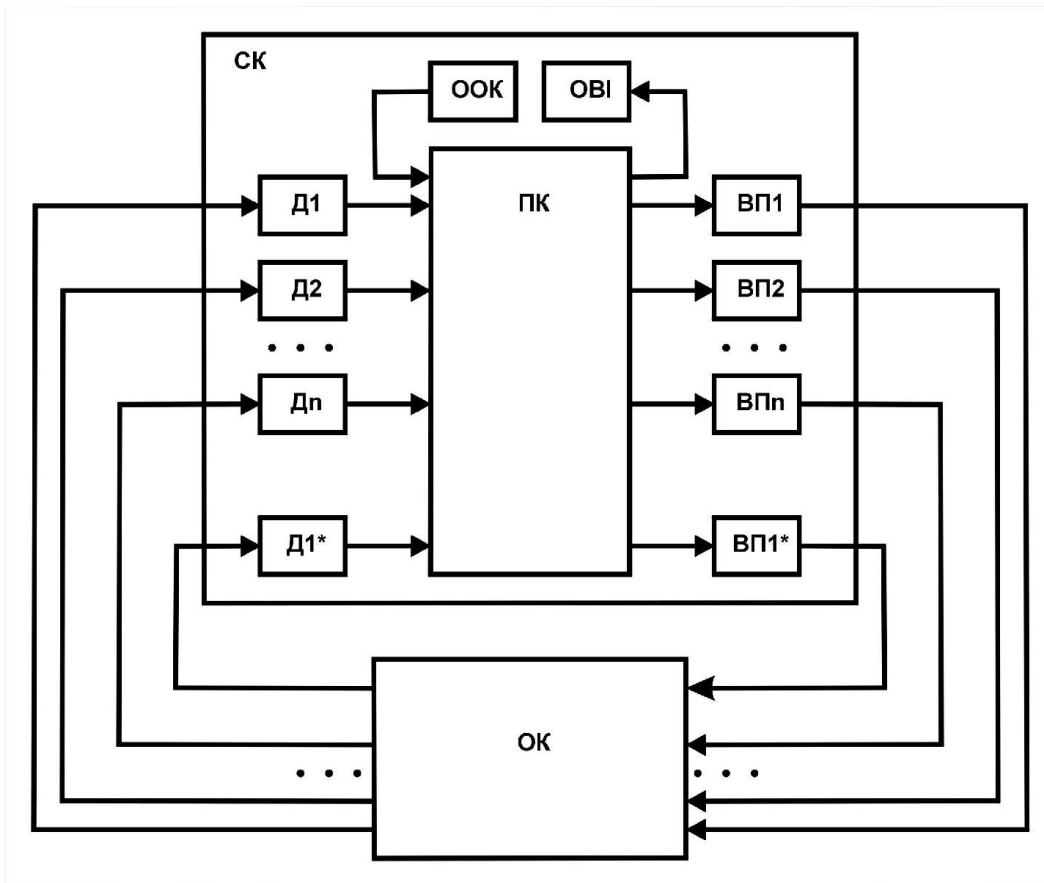


Рис. 1.3. Узагальнена структура системи керування з функціями керування і регулювання

Структура системи керування з підсистемою регулювання являє собою розглянуті раніше системи керування і регулювання, причому система керування здійснює керування не тільки безпосередньо об'єктом керування (ОК), але і системою регулювання (СР) (рис. 1.4).

У такій структурі система керування (СК) для системи регулювання (СР) формує керуючі сигнали (увімкнуті / вимкнуті), передачу інформації у вигляді параметрів регулювання, режиму роботи регулятора і т. д. Система регулювання в свою чергу для системи керування передає інформацію про поточне значення регульованого технологічного параметра об'єкта керування (ОК).

Слід зазначити, що в разі регулювання декількох технологічних параметрів така структура може містити декілька підсистем регулювання.

Побудова системи керування за такою структурою порівняно зі структурою, що поєднує функції керування та регулювання, значно спрощує розробку програмного забезпечення за рахунок розподілу керуючих функцій між системою керування і системою регулювання.

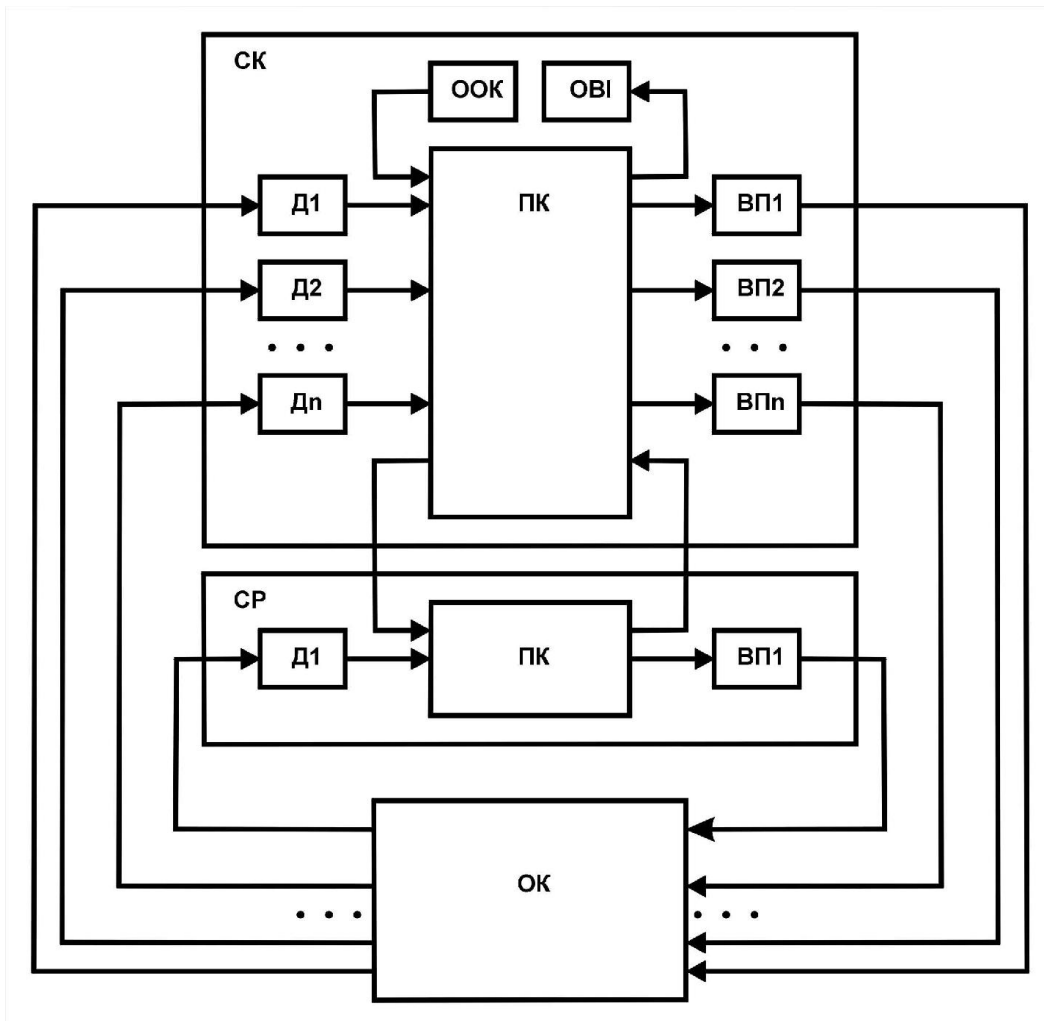


Рис. 1.4. Узагальнена структура системи керування з підсистемою регулювання

Аналіз розглянутих структур систем керування показує, що вони в більшій частині практично мають однакові складові компоненти. Різницею в цих структурах є зв'язки між складовими системи керування та функції, що реалізують пристрої керування.

1.3 ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ПРИНЦИПИ КЕРУВАННЯ

Основою побудови систем автоматичного керування є деякі фундаментальні принципи керування, що визначають, як здійснюється погодженість між алгоритмами функціонування й керування та фактичним функціонуванням або причинами відхилення функціонування від заданого. У техніці відомі та використовуються три фундаментальних принципи: розімкнутого керування (керування за керуючим впливом), компенсації (керування за збуренням) та зворотного зв'язку (керування за відхиленням).

Принцип розімкнутого керування. Сутність принципу полягає в тому, що алгоритм керування розробляється на основі заданого алгоритму функціонування, але його виконання не контролюється за рахунок інших факторів: збурення або вихідних координат процесу (рис. 1.5).

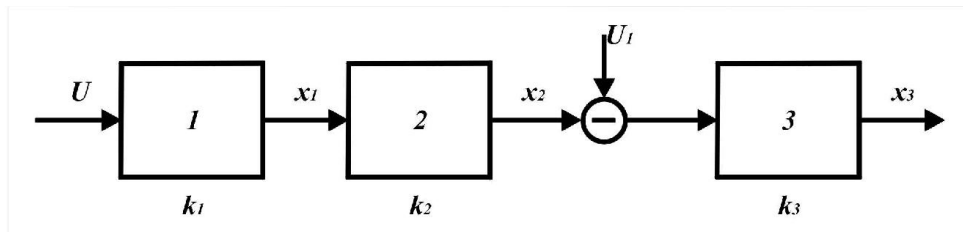


Рис. 1.5. Структура розімкнутого керування

Заданий режим керування U формується задавальним елементом 1, подається до елемента керування 2, а потім до об'єкта керування 3. Як бачимо, в автоматичних системах, побудованих за цим принципом, інформація про результати дії заданого алгоритму не використовується і не контролюється. Так, керована величина X_3 ні з чим не порівнюється. Схема має вигляд розімкнутого контуру, у якому вхідний (керуючий) вплив передається від вхідного елемента 1 до вихідного елемента 3. Близькість величини керування X_3 до заданого значення забезпечується тільки конструкцією та заданими фізичними закономірностями, що діють у всіх елементах системи. При зміні ж збурення U_1 такий принцип побудови автоматичної системи не дозволяє визначити, як це впливає на зміну величини керування. Неможливо при цьому втрутитися в роботу системи та внести необхідні корективи в керовану величину, якщо вона виходить за допустимі межі.

Значення величини керування можна визначити за співвідношенням:

$$X_3 = kU - k_3 U_1, \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт підсилення системи, який у даному випадку визначається як добуток від коефіцієнтів підсилення елементів системи k_1, k_2, k_3 , тобто:

$$k = k_1 k_2 k_3, \quad (1.2)$$

Як бачимо, згідно з (1.1) зміна збурення U_1 приводить до зміни величини керування X_3 , а принцип розімкнутого керування не дозволяє цьому запобігти.

Слід сказати, що можливість виникнення значних похибок у керуванні при наявності непередбачених перешкод є основним недоліком принципу розімкнутого керування. Проте в ряді випадків, де не потрібне занадто точне виконання заданого алгоритму, принцип розімкнутого керування внаслідок своєї простоти досить широко використовується в гірничій та металургійній галузях промисловості, наприклад, при автоматизації насосних та вентиляторних установок.

Принцип компенсації (керування за збуренням) використовується в тому випадку, коли розімкнутий ланцюг керування не забезпечує потрібної точності виконання заданого алгоритму. Інколи для підвищення точності керування можна виміряти збурення, а потім за результатами вимірювання ввести в заданий алгоритм такі корективи, які б компенсували викликані збуренням відхилення від заданого алгоритму керування (рис. 1.6).

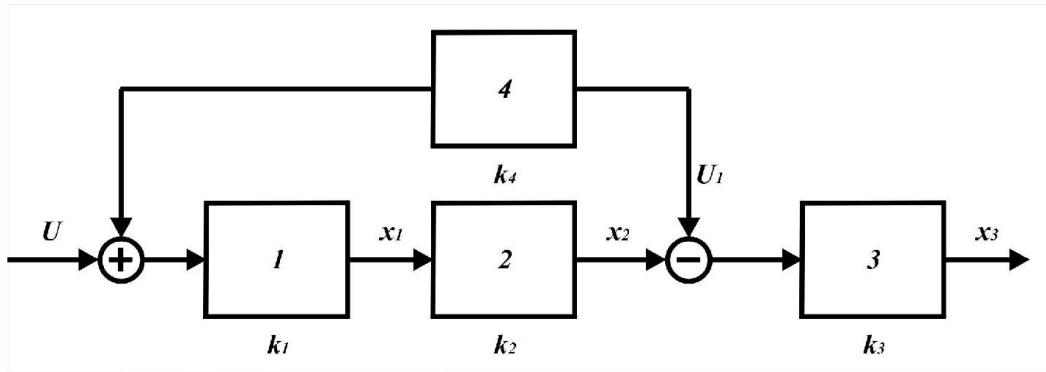


Рис. 1.6. Структура керування за збуренням

На структурі блоком 4 позначено вимірювач збурення. Величину керуючого впливу X_3 можна визначити як:

$$X_3 = kU - (k_3 - k_1 k_4)U_1, \quad (1.3)$$

Як видно з виразу (1.3), ступінь компенсації впливу збурення може бути різним, його величина залежить від коефіцієнта k_4 підсилення вимірювача збурення 4. У разі необхідності можна навіть повністю компенсувати негативний вплив збурення на роботу автоматичної системи. Але на практиці компенсувати дію всіх збурюючих впливів неможливо, тому що значна частина збурень не піддається вимірюванню. У реальних системах компенсуються, як правило, лише основні збурюючі впливи, які найбільш різко впливають на керуючу величину.

Прикладами систем, що реалізують принцип компенсації, може бути відома з фізики біметалева система пластин з різними коефіцієнтами теплового розширення в маятнику хронометра, яка забезпечує постійну довжину маятника при коливаннях температури. Можна також нагадати про схему компенсації генератора постійного струму, яка забезпечує постійну напругу при коливаннях струму навантаження.

Система, побудована за принципом розімкнутого керування або компенсації, є розімкнутою системою. У ній процес керування не залежить від результатів (керована величина не вимірюється і не проводяться ніякі дії, якщо ця величина не відповідає заданому значенню). Тому використання принципів розімкнутого керування та компенсації обмежується об'єктами, характеристики яких визначені з високою точністю.

Принципи зворотного зв'язку (керування за відхиленням, принцип замкнутого керування)

Автоматичну систему також можна побудувати так, щоб точність виконання заданого алгоритму була забезпечена і без вимірювання збурення. Така система реалізується за допомогою структури автоматичної системи, у якій корективи в алгоритм керування вносяться за фактичним значенням керованої величини X_3 безпосередньо системи керування (рис. 1.7).

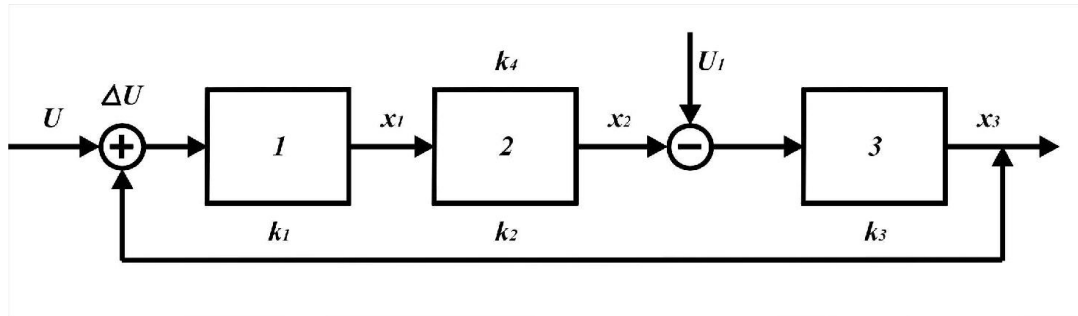


Рис. 1.7. Структура керування за відхиленням

Для цього в систему введено зворотний зв'язок, який пов'язує вихід системи з її входом. Схема системи має вигляд замкнутого кола, що дало підставу назвати реалізований у ній принцип керування за відхиленням. У замкнутих автоматичних системах зменшується відхилення керуючої величини від потрібного значення незалежно від причин його появи. Це дозволяє реалізувати керування з високою точністю.

Значення керуючої величини для схеми, що реалізує принцип замкнутого керування, визначається виразом

$$X_3 = \frac{kU}{1+k} - \frac{k_3 U_1}{1+k} \quad (1.4)$$

Співвідношення (1.4) показує, що точність керування в таких системах залежить від коефіцієнта підсилення системи k і підвищується при його збільшенні.

В автоматичних системах, що побудовані за принципом замкнутого керування, керуючий вплив формується в результаті перетворення відхилення ΔU (рис. 1.7), яке може бути викликане різними факторами. Тому в цих системах зменшується відхилення незалежно від того, якими з факторів воно викликане.

Оскільки в системах з принципом керування за відхиленням зменшуються відхилення, що виникають також при зміні параметрів елементів системи, то замкнуті автоматичні системи менш відчутні до зміни параметрів її елементів порівняно з розімкнутими системами, де відхилення, що є результатом зміни параметрів їх елементів, не компенсуються.

Слід пам'ятати, що в автоматичних системах з принципом керування за відхиленням керуючий вплив виникає в результаті перетворення сигналу відхилення, а не самого фактора, що викликав відхилення, наприклад, збурюючого впливу. Тому такий керуючий вплив не може впливати на об'єкт без запізнення відносно до збурюючого впливу. Отже, принцип керування за відхиленням не дозволяє цілком усунути відхилення, тобто не дає можливості повністю компенсувати збурюючий вплив.

Принцип зворотного зв'язку знаходить саме широке розповсюдження не тільки в техніці (керування тиском, швидкістю, тепловими процесами, прокатним виробництвом та ін.), але й у процесах керування, що здійснюються

в живих організмах (системи регуляції різноманітних функцій – температури, ритму кровообігу та ін.). В керуванні суспільними організаціями цей принцип реалізується, наприклад, у вигляді перевірки виконання прийнятих рішень і розпоряджень, що відіграють роль керуючих впливів.

Комбіноване керування (керування за збуренням та відхиленням) у ряді випадків використання є дуже ефективним (рис. 1.8).

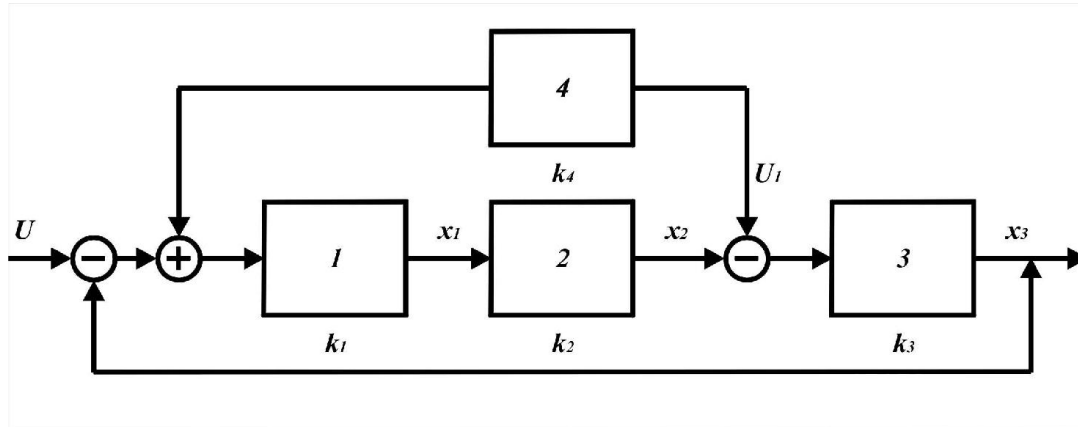


Рис. 1.8. Структура керування за збуренням та відхиленням

Комбіновані системи поєднують переваги принципів: швидкість реакції на зміну збурення та точне регулювання незалежно від того, яка причина викликала відхилення. Для комбінованої автоматичної системи керована величина знаходиться за виразом:

$$X_3 = \frac{kU}{1+k} - \frac{(k_3 - kk_4)U_1}{1+k} \quad (1.5)$$

У комбінованих системах принцип керування за відхиленням реалізується за допомогою головного зворотного зв'язку, а принцип керування за збуренням – за допомогою компенсаційного зв'язку. Як бачимо з (1.5), принцип комбінованого керування дозволяє реалізувати принцип інваріантності: повну або часткову незалежність керуючої величини та закону зміни збурень, які діють на автоматичну систему.

1.4 ВИДИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

На початку реалізації техніки керування використовувався лише один вид автоматичного керування – підтримання заданого постійного значення керованої величини. Досить довгий час під системами автоматичного керування розуміли саме цей вид. Пізніше кількість видів керування збільшувалася, цілком вірогідно, що наведені далі основні їх види не вичерпують не тільки можливі види в майбутньому, але й існуючі сьогодні.

Стабілізація. Системи підтримання керованої величини на заданому постійному рівні називають системами стабілізації. Бажаний закон у них має вигляд $U = const$

Відома важлива особливість систем керування за відхиленням: якщо в них використовувати регулятори, що складаються тільки з елементів, які здійснюють звичайні аналітичні перетворення, то керування за відхиленням може зменшити, але не позбавити від похибки. Рівняння усталеного режиму в таких системах має вигляд (1.4).

Із цього співвідношення видно, що в усталеному режимі керована величина визначається величиною коефіцієнта підсилення та величиною збурення (навантаження). Ясно також, що керована величина завжди буде меншою за керуючу, тобто така система працюватиме з похибкою, яка називається усталеною або статичною. Керування у цьому випадку також буде **статичним**.

Але при автоматизації деяких об'єктів (двигунів прокатних станів, шахтних піднімальних машин) статична похибка є небажаною. У цьому випадку переходять до керування, за яким завдяки структурі системи статична похибка буде зведеною до нуля. Таке керування називається **астатичним**.

Програмне керування. При такому керуванні закон зміни керованої величини відомий заздалегідь, а спеціальний датчик виробляє задану програму зміни керованої величини. Слід мати на увазі, що програмне керування можна здійснити за будь-яким з фундаментальних принципів або ж за допомогою їх комбінації.

На практиці використовують два види систем програмного керування. Це системи керування з часовою програмою та системи керування з просторовою програмою.

У системах керування з часовою програмою керуючий вплив формується в функції часу. До таких пристроїв належать пристрої, що реалізують програми для зміни температури, тиску, частоти обертання та ін.

У системах керування з просторовою програмою керуючий вплив формується в функції координат. Наприклад пристрої, що реалізують програми керування металообробними верстатами. У цих системах переміщення виконавчого органа (інструмента) відбувається за заданою в просторі траєкторією. Закон же переміщення за траєкторією в функції часу може бути при цьому довільним.

Системи програмного керування за своєю структурою можуть бути статичними та астатичними і їх реалізація можлива на базі будь-якого з розглянутих фундаментальних принципів.

Слідкуюче керування забезпечує роботу автоматичної системи, якщо алгоритм її функціонування наперед невідомий. Керована величина у таких системах повинна відтворювати зміну деякого зовнішнього впливу. Цей вплив у слідкуючій системі змінюється не за раніше заданою програмою, а довільно. Керуючі впливи та керуючі величини в слідкуючих системах можуть бути різноманітними за своєю фізичною природою. При цьому керована величина за своєю фізичною природою може відрізнитися від керуючого впливу. Наприклад, керуючим впливом може бути змінювана напруга, а керованою величиною – напруга, кутове або лінійне переміщення, частота обертання, частота напруги та ін.

Широко використовуються слідкуючі системи просторового слідкування. Вони відтворюють керуючий вплив у вигляді механічного переміщення. До них належать синхронно слідкуючі системи (синхронно слідкуючі приводи, силові слідкуючі приводи), які забезпечують синхронне та синфазне обертання механічно не зв'язаних між собою валів.

Слідкуюча система може бути побудована за будь-яким фундаментальним принципом керування і буде відрізнятися від відповідної системи програмного керування тільки тим, що замість датчика програм у ній буде пристрій слідкування за зміною зовнішнього впливу.

За розглянутими видами автоматичного керування створюються так звані непристосовані системи. Структура та настройка таких систем визначаються на етапі проектування та налагодження і далі не змінюються. Приклади таких систем: система стабілізації заданого витрачання природного газу при роботі сталеплавильної печі; система програмної зміни температури в термічній печі за визначеним графіком, що є необхідним при термообробці (наприклад, зростання температури із заданою швидкістю, витримка при постійній температурі та ін.); слідкуюча система керування співвідношенням «паливо – повітря» при керуванні згорянням палива.

Залежно від способу вироблення керуючого впливу автоматичне керування буває *пошуковим* та *безпошуковим*.

У безпошукових системах керуючий вплив виробляється за результатами порівняння істинного та заданого значень керованої величини.

У пошукових він формується за допомогою пробних керуючих впливів та шляхом аналізу результатів дії пробних впливів. Таку процедуру пошуку правильних керуючих впливів доводиться використовувати в тих випадках, коли характеристики об'єкта керування змінюються або відомі не в повній мірі. Принцип автоматичного пошуку використовують для керування об'єктами, характеристики яких мають екстремальний характер. Метою керування при цьому є пошук та підтримання керуючих впливів, що відповідають екстремальному (мінімальному або максимальному) значенню керованої величини. Такі автоматичні системи називаються екстремальними або самонастроювальними.

Прикладом об'єкта з екстремальною характеристикою може бути паровий котел на теплових електростанціях.

У топку котла подається повітря, кількість якого дещо перевищує ту кількість, яка теоретично необхідна для повного згоряння палива. Відношення цих кількостей називається коефіцієнтом надлишку повітря. Правильність вибору цього коефіцієнта визначає економічність використання палива. Основним збуренням для котла є змінювання споживання пари. Залежність коефіцієнта корисної дії (ККД) котла від коефіцієнта надлишку повітря має екстремум для різних витрат пари. Завданням системи автоматичного керування є змінювання подачі повітря в топку таким чином, щоб ККД котла мав би максимально можливе в даних умовах значення.

Системи автоматичного керування створюють, виходячи з вимог забезпечення тих чи інших показників якості. Найкращі результати у

розв'язанні задачі покращення показників якості роботи автоматичних систем можна одержати, використовуючи способи *оптимального керування*. Слово оптимальний у широкому розумінні означає «найкращий» відповідно до всякого критерію ефективності. Система автоматичного керування вважається оптимальною, якщо в ній тим чи іншим способом забезпечується найкраще значення основного показника якості роботи. Цей показник називається критерієм оптимальності. Як критерій оптимальності можуть бути вибрані різні технічні або економічні показники процесу керування. В оптимальних системах забезпечується не просто деяке покращення того чи іншого техніко-економічного показника якості, а досягнення мінімально або максимально можливого його значення.

Якщо критерій оптимальності визначає техніко-економічні втрати (похибки системи, час перехідного процесу, витрати енергії, засобів, вартість), то оптимальним буде таке автоматичне керування, яке забезпечує мінімум критерію оптимальності. Якщо він визначає рентабельність (ККД, продуктивність, прибуток, дальність польоту ракети), то оптимальне керування повинне забезпечити максимум критерію оптимальності.

Створення оптимальних систем являє собою досить складну проблему. Але розробка та впровадження оптимального керування сприяє підвищенню ефективності використання виробничих агрегатів, збільшенню продуктивності праці, покращенню якості продукції, економії електроенергії, палива, сировини.

Адаптивними або такими, що самі пристосовуються, називають такі системи керування, які в умовах непередбачуваної зміни властивостей керованого об'єкта, зовнішніх впливів або мети керування автоматично змінюють структуру або параметри свого керуючого пристрою, забезпечуючи при цьому необхідну якість керування. Для здійснення адаптації (автоматичної зміни алгоритму керування) ці системи мають додатковий керуючий пристрій (пристрій адаптації), який за результатами виміру сигналів у головному контурі керування виявляє зміни властивостей зовнішніх впливів та об'єкта і виконує необхідні зміни у керуючому пристрої.

Необхідність використання адаптивних систем керування виникає тоді, коли умови функціонування й властивості керованого об'єкта змінюються в широких межах і за раніше невідомими законами. Об'єктами зі змінними властивостями й умовами функціонування можуть бути, наприклад, шахтні піднімальні установки, видобувні комплекси, кульові млини, прохідна нагрівальна піч з корекцією завдань та настройок регуляторів у зонах за темпом видачі заготовок, нагрівальна піч, коли завдання та настройки всіх локальних регуляторів визначаються за умовами максимальної продуктивності печі або мінімальних сумарних затрат на нагрів та прокатку металу на основі поточної інформації про хід процесу.

1.5 РЕЖИМИ РОБОТИ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ

Будь-яка система автоматичного керування є неконсервативною системою, запас енергії якої змінюється за рахунок витрат і надходжень через

окремі її елементи (підсилювачі, об'єкт та ін.). При відхиленні від стану рівноваги в надходженні та витратах енергії у системі виникає відхилення керованої величини від заданого значення. Це приводить до включення в роботу регулятора, який намагається зменшити (а в ідеальному випадку звести до нуля) відхилення керованої величини від заданого значення, через що в системі автоматичного керування виникає перехідний (динамічний) процес. Головним завданням дослідника є визначення при цьому стійкості та якості роботи автоматичної системи. Проте для визначення працездатності системи недостатньо того, щоб вона була стійкою і мала достатні показники якості в перехідних процесах (тривалість перехідного процесу, його характер тощо).

Важливим також є дослідження поведінки автоматичної системи у стані рівноваги, тобто в статичному режимі. У статисти вивчаються питання статичної (усталеної) точності – відхилень керованої величини від заданого значення після закінчення перехідного процесу, а також статичні характеристики системи.

Вимоги до систем автоматичного керування з позиції статички й динаміки є протилежними. Тому для їх задоволення потрібно досліджувати питання динаміки та статички в тісному взаємозв'язку, приймаючи при необхідності компромісні рішення. Наприклад, підвищення точності системи після закінчення перехідного процесу потребує збільшення коефіцієнта підсилення (передачі) розімкнутої системи. Водночас зростання цього коефіцієнта негативно впливає на динамічні характеристики системи. При досить великих його значеннях система може стати взагалі непрацездатною. Тому вибір цього коефіцієнта слід робити так, щоб задовольнити суперечливі вимоги статички й динаміки на основі компромісного рішення.

Для ефективного керування виробничими процесами або дослідження систем автоматичного керування необхідно мати адекватний математичний опис процесів, що проходять як у самій системі, так і в її елементах. Під математичним описом (математичною моделлю) розуміють сукупність рівнянь та обмежувальних умов, які в кількісній формі визначають залежність керованих (вихідних) величин від керуючих (вхідних) в усталеному і перехідному режимах. У зв'язку з цим виділяють два різновиди рівнянь систем автоматичного керування: рівняння усталених режимів (рівняння статички) та рівняння перехідних режимів (рівняння динаміки).

Рівняння, яке описує зміну в часі вихідної величини автоматичної системи залежно від зміни вхідної, називається рівнянням динаміки. Воно визначає динамічний режим системи, який виникає кожного разу, коли на систему діє зовнішній вплив. Перехід системи від одного усталеного режиму до другого під дією зовнішнього впливу називається перехідним режимом (процесом). У загальному випадку рівняння динаміки є диференціальними (або різницевиими) і повністю описують поведінку системи в перехідному режимі. За усталений режим найчастіше приймають стан рівноваги (спокою), який називають усталеним. Рівняння статички відображають функціональний зв'язок між вихідними і вхідними величинами в усталеному стані. Рівняння в усталеному стані – це алгебраїчне рівняння. Його можна одержати з

диференціального рівняння, якщо прирівняти всі похідні за часом до нуля. Статичною характеристикою системи автоматичного керування називають залежність вихідної величини від вхідної в усталеному режимі.

Основна задача системи автоматичного керування полягає в забезпеченні необхідної якості виконання автоматизованого виробничого процесу незалежно від діючих при цьому несприятливих збурень. Для цього автоматична система повинна бути побудованою відповідним чином і виконувати необхідний закон керування.

Під законом керування розуміють правило (алгоритм) перетворення інформації про стан системи в сигнали керування. Закон керування в будь-якій автоматичній системі реалізується за допомогою відповідних засобів, які є її складовими елементами.

1.6 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

На промислових підприємствах, а також вугільних шахтах і рудниках широко розповсюджені дискретні системи керування, їх вхідні змінні зазвичай являють собою стани різноманітних дискретних датчиків і органів керування, з яких знімається інформація. Стан виконавчих пристроїв (реле, клапанів, перемикачів і т. п.) з двома стійкими положеннями відповідає внутрішнім змінним. Сукупність цих виконавчих пристроїв утворює своєрідну «пам'ять» системи. В системі є також датчики, що контролюють стан виконавчих механізмів. Сигнали з них надходять з кола зворотного зв'язку й визначають хід подальших подій у системі. Вихідні змінні відбивають стан вихідних елементів системи, які не здатні запам'ятовувати сигнали. До даного класу дискретних систем можна віднести системи керування конвеєрним, електровозним транспортом, водовідливом, вентиляторами головного й місцевого провітрювання й ін. У таких системах сигнали мають усього два стани, еквівалентні двійковим цифрам 0 і 1, тому їх прийнято називати цифровими.

Характерна риса сучасних систем автоматики – високе насичення їх обчислювальними пристроями, інтегральними мікросхемами малого, середнього й великого ступеня інтеграції, а також розвиненою логічною структурою. Розробка й експлуатація таких систем вимагає від фахівців знань як традиційних методів побудови цифрових керуючих пристроїв, так і методів програмування систем, реалізованих на програмованих логічних контролерах або мікропроцесорах.

Процес проектування складних цифрових пристроїв керування складається з таких етапів:

- розробка алгоритму роботи пристрою керування (технічне завдання, з якого починається проектування, не містить усієї необхідної інформації для написання алгоритму функціонування: перехід від технічного завдання до алгоритму функціонування вимагає цілого ряду уточнень);

- блоковий синтез (розробляється структурна схема пристрою; увесь пристрій розбивається на окремі функціональні блоки, визначаються розв'язувані кожним блоком завдання, намічається загальний план обміну інформацією між блоками; уточнюються алгоритми функціонування кожним блоком; якщо пристрій керування нескладний, етап блокового синтезу не проводиться, а якщо складний – то можливо кількаразове повернення до цього етапу);
- логічне проектування (здійснюється розробка функціональних та принципових схем пристрою керування в цілому і його блоків); прийнято логічне проектування розділяти на два етапи: абстрактного синтезу (записуються на обраній формальній мові умови функціонування кожного блоку, встановлюються вхідні й вихідні сигнали, визначається мінімальна кількість внутрішніх станів і обсяг пам'яті) і структурного синтезу (вибирається тип елементів пам'яті, отримують рівняння, що відбивають логічну залежність вихідних змінних від вхідних, і за цими рівняннями складається функціональна схема, на якій показано графічне зображення структури пристрою керування, що містить умовне зображення блоків і елементів структури, канали передачі впливів між ними).

Технічне проектування включає розробку основних видів технічної документації для виготовлення, налагодження й випробування дослідного зразка. На цьому етапі компонуються функціональні елементи в різних конструктивних одиницях, трасуються друковані плати, складаються монтажні схеми.

Будь-яка теорія, ідеалізуючи реальний мир, використовує моделі. При створенні дискретних систем керування на всіх етапах синтезу також доводиться мати справу з різними моделями, яких існує велика кількість. Однак базовою моделлю є модель кінцевого автомата, що запропонована Стівеном Кліні (Stephen Cole Kleene), у якій поведінка будь-якого дискретного пристрою керування визначається зміною в часі деяких фізичних величин на його вході, виході й усередині самого пристрою. Для електричних пристроїв керування такими величинами є потенціали на вхідних і вихідних полюсах, а також на внутрішніх вузлах схеми.

Особливість функціонування дискретних пристроїв керування полягає в тому, що на осі часу можуть бути виділені інтервали, на яких вхідні, вихідні й внутрішні змінні зберігають постійне значення. Ці інтервали називаються тактами роботи. Таким чином, у кожний момент автоматного часу (такту) вхідні, вихідні й внутрішні змінні мають цілком певні значення. Набір вхідних (вихідних) змінних у деякий момент автоматного часу називають станом входу (виходу) пристрою керування або буквою вхідного (вихідного) алфавіту.

Вхідний (вихідний) алфавіт пристрою керування – сукупність усіх можливих вхідних (вихідних) станів. Набір внутрішніх змінних у деякому такті називається внутрішнім станом пристрою керування, а сукупність усіх внутрішніх станів становить безліч внутрішніх станів пристрою керування.

Найбільш загальна модель пристрою керування – абстрактний автомат, який можна задати шістьма об'єктами:

- безліччю вхідних станів (вхідний алфавіт)

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}; \quad (1.6)$$

- безліччю вихідних станів (вихідний алфавіт)

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}; \quad (1.7)$$

- безліччю внутрішніх станів

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_k\}; \quad (1.8)$$

- функцією переходів δ , що визначає залежність наступного значення внутрішньої змінної a_{t+1} від поточних значень вхідної змінної x та внутрішньої змінної $a(t)$;
- функцією виходів σ , що визначає залежність вихідної змінної Y від поточних значень вхідної змінної x і внутрішньої змінної $a(t)$;
- початкового стану автомата $a_1 \in A$.

Абстрактний автомат зображується у вигляді «чорного ящика» з одним входом і одним виходом (рис. 1.9).

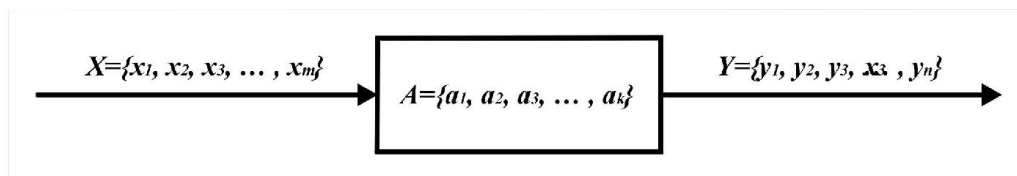


Рис. 1.9. Структура абстрактного автомата

У кожний момент автоматного часу t на вхід автомата, що перебуває в стані $a(t)$, надходить буква вхідного алфавіту $x(t)$. У цей же момент на виході перебуває буква вихідного алфавіту $y(t)$. У наступному такті автомат перейде в новий стан a_{t+1} , який обумовлено функцією переходів.

Розрізняють дві моделі автоматів: автомат Мілі та автомат Мура, які відрізняються один від одного функціями виходів.

Поведінка автомата Мілі якісно описується рівняннями:

$$a(t+1) = \delta[a(t)x(t)]; \quad (1.9)$$

$$y(t) = \sigma[a(t)x(t)]. \quad (1.10)$$

В автоматі Мура функція виходу не залежить від вхідних змінних, і його поведінка описується рівняннями:

$$a(t+1) = \delta[a(t)x(t)]; \quad (1.11)$$

$$y(t) = \sigma[a(t)]. \quad (1.12)$$

Таким чином, у моделі автомата Мілі функція виходів залежить як від стану входів, так і від внутрішнього стану автомата. У той час як в автоматі Мура функція виходів повністю визначається внутрішнім станом автомата.

Для автомата джерелом вхідних сигналів є зовнішнє середовище і його стан сприймається автоматом через стан його входів. У моменти зміни такту

внутрішній стан автомата й стан його входів повинні бути незмінними, тобто моменти зміни станів зовнішнього середовища повинні бути погоджені з моментами зміни станів автомата.

Коли такт формується зовнішнім сигналом від спеціального пристрою (генератора), загального як для зовнішнього середовища, так і для автомата, автомат називається синхронним.

Якщо ж такт формується зовнішнім середовищем і його тривалість визначається часом, протягом якого залишається незмінним стан входу, автомат називається асинхронним.

Якщо такт для зовнішнього середовища формується автоматом, а такт для автомата – зовнішнім середовищем, автомат називається погодженим.

У загальному випадку джерело синхросигналів може розглядатися як складова частина зовнішнього середовища. Тоді в синхронному автоматі зміна такту настає щораз, коли відбувається зміна стану входів автомата, тобто автомат стає асинхронним. Тому будь-який синхронний автомат можна розглядати як асинхронний; зворотне в загальному випадку неправильно, тому що в довільному асинхронному автоматі не завжди можна виділити вхідні сигнали, що формують зміну такту.

Задати автомат – значить записати умови його роботи мовою, що дозволяє виконувати операції аналізу і синтезу, використовуючи формальні правила. Вихідні дані – звичайно описова форма завдання автомата, яка не є цілком математичним поняттям. При створенні автомата необхідно вибрати якусь формальну мову, що дозволяє подати кінцевою множиною відповідності між вхідними і вихідними сигналами, формулами або таблицями.

Структурна схема системи керування відбиває з одного боку – зв'язок джерел інформації з керуючим пристроєм, з іншого – зв'язок керуючого пристрою з виконавчими пристроями. Для пояснення функціонування об'єкта найбільш часто використовується поняття «стан об'єкта». Виходячи з технології, принципу дії і призначення об'єкта, виділяються й перелічуються всі стани, які й становлять простір станів об'єкта.

Щоб задати алгоритми функціонування автомата, необхідно задати його функції переходів і виходів з одного стану в інші. Задати функцію переходів – значить задати певний перехід із внутрішнього стану a_i у внутрішній a_j при впливі набору вхідних сигналів $x_1 x_2 x_3 \dots x_m$. Задати функцію виходів означає, що кожній парі $(x_m a_i)$ відповідає стан виходу $y_i \in Y$.

Мови, що дозволяють у такий спосіб задавати функції переходів і виходів, називають стандартними. До них належать таблиці переходів, матриці переходів, графи переходів, граф-схеми алгоритмів, логічні схеми алгоритмів.

На сьогодні частіше для пояснення принципу дії об'єкта й системи керування використовуються графи переходів.

Функціонування автомата зображується у вигляді спрямованого графа, що складається з вершин і спрямованих ребер або дуг. Кожному стану об'єкта керування відповідає вершина графа. Переходи між станами зображуються дугами, які позначаються кон'юнкціями вхідних змінних. Число вершин графа дорівнює числу станів об'єкта керування.

В автоматі Мура (рис. 1.10, а) кожній вершині приписується відповідний вихідний сигнал, а дуги позначаються входними змінними й показують на напрямок переходів, здійснюваних в автоматі під дією входних змінних.

Граф автомата Мілі (рис. 1.10, б) відрізняється від графа автомата Мура тим, що його вершини позначено однією буквою, а ребра двома, перша з яких позначає входний сигнал, під дією якого здійснюється перехід. Друга буква позначає вихідний сигнал, який виробляє автомат при відповідному переході. Петля (перехід у той самий стан) на графові відповідає стійкому стану за цією змінною.

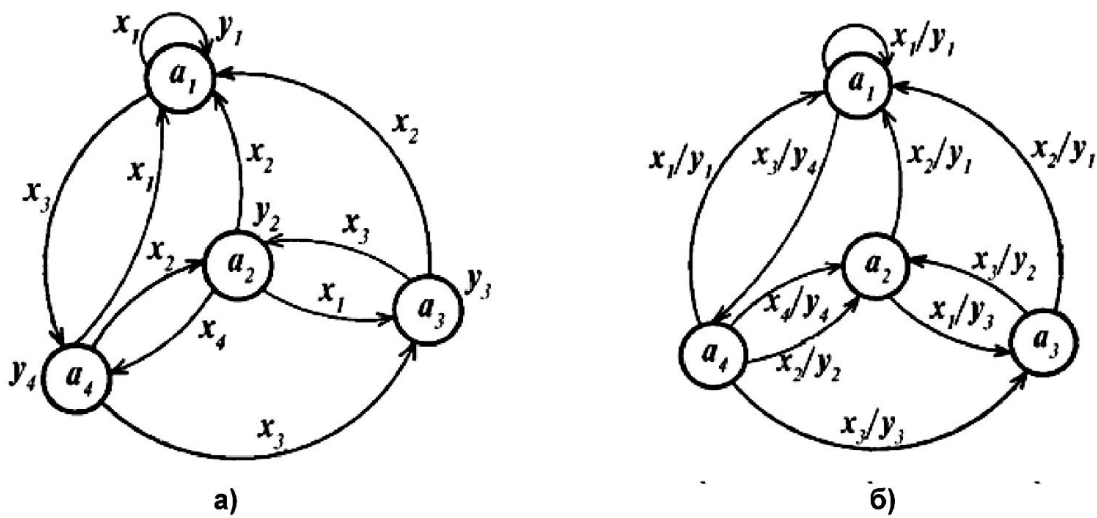


Рис. 1.10. Граф-схема:
а – автомата Мура; б – автомата Мілі

Більшість об'єктів промислових виробництв, у тому числі гірничої промисловості, мають логічні закони керування, при цьому всі сигнали в системі керування мають дискретний (логічний) характер. Отже, закони керування являють собою рівняння логічних функцій, які на сучасному етапі в основному реалізуються програмно.

Алгоритм функціонування у вигляді графа буде зрозумілим як розробнику, так і проектувальнику та експлуатаційнику, враховуючи, що кожному стану об'єкта є відповідний стан автомата, які на графі подані відповідними вершинами.

Формалізацію процесу написання програм для таких систем найбільш доцільно здійснити за допомогою методів опису об'єктів керування, які розроблені в теорії цифрових автоматів. Фактично завдання дискретного керування об'єктами з використанням програмувальних контролерів полягає у введенні входних сигналів, обчисленні логічної функції, що поєднує входні та вихідні сигнали, та виводі результату обчислення на виходи пристрою керування (контролера керування). Завдання дискретного керування може бути записане у вигляді комбінаційних або послідовних автоматів, тобто автоматів з пам'яттю. Якщо функція керування задана у вигляді комбінаційного автомата, то її зручно подати у вигляді таблиці істинності. Якщо функція керування являє

собою реалізацію автомата з пам'яттю, то алгоритм функціонування зручно записувати у вигляді спрямованого графа.

Методика написання програм дискретного керування передбачає, що вершини графа – це стани системи дискретного керування, дуги між вершинами – переходи з одного стану в інший. Над дугами записуються умови переходу (логічна функція) та функції (вихідні сигнали), що формуються при цьому переході. Умови переходу та функції, що формуються розділяють знаком «/». Функція керування в цьому випадку обчислюється у вигляді логічного рівняння, у якому до вхідних сигналів додані ще змінні стани, що визначають об'єкт.

Програмний спосіб реалізації автомата з пам'яттю значно розширює перелік типів вхідних і вихідних змінних. Крім звичних логічних змінних можна використовувати чисельні змінні, лічильники, часові інтервали, цифрові значення і т. ін. Причому часові інтервали є звичайними виходами при їхньому запуску і входами при контролі закінчення часового інтервалу. Двійкові змінні, які керують елементами затримки й сигналізують про закінчення затримок, є звичайними вихідними та вхідними логічними функціями. Над чисельною вхідною змінною можна застосовувати операції присвоєння значення, скидання в нуль, арифметичні дії, операції порівняння (на рівність, більше, менше, перевірка на нуль). Як приклад чисельної змінної може бути змінна, яка зберігає стан об'єкта.

Лічильники можуть працювати як з вхідними, так і з вихідними змінними. Над лічильниками – вихідними змінними можна виконувати операції інкременту, декременту, скидання в нуль, установку в задане значення. Над лічильниками – вхідними змінними можна виконувати операції порівняння на більше, менше й на нуль або потрібне значення. Таймери фактично є лічильниками, у яких лічба відбувається за відмітником часу. Як вихідний сигнал, таймер можна запустити, зупинити або установити на заданий час. При використанні значення таймера як вхідний сигнал можна здійснювати контроль на нуль.

Програмна реалізація функцій керування значно розширює можливості при синтезі керуючого автомата і дозволяє створення функцій, що здійснюють будь-яке перетворення сигналів, цифрових величин, кодів та іншого в логічні змінні, які будуть використані в функціях переходів з формальним підходом як до звичайних логічних змінних.

Контрольні питання і завдання до розділу 1

1. Дайте характеристику автоматизованого й автоматичного керування.
2. У чому полягає мета автоматичного керування?
3. Що розуміють під об'єктом керування, керуючим пристроєм і автоматичною системою?
4. Що відображає структурна схема системи керування?
5. Як можна характеризувати алгоритм функціонування та алгоритм керування?

6. Назвіть фундаментальні принципи керування й дайте їх характеристику.
7. Як впливає коефіцієнт підсилення автоматичної системи на точність керування?
8. Дайте визначення основних видів автоматичного керування.
9. Назвіть режими роботи автоматичних систем. У чому полягає їх сутність?
10. Дайте характеристику засобів реалізації автоматичних систем.
11. Яким чином здійснюється побудова пристроїв керування, що реалізують функції логічного керування?
12. У чому полягає різниця комбінаційного та кінцевого автоматів?
13. Чим відрізняються автомат Мілі від автомата Мура?
14. Які існують способи формального опису автоматів?
15. Переваги програмної реалізації при проектуванні пристрою логічного керування?

2 ДАТЧИКИ

Технологічні датчики належать до технічних засобів автоматизації. Без них неможлива побудова сучасних систем керування різними технологічними лініями та автоматизація різноманітних технологічних процесів. Технологічні датчики ще називають просто «датчики» або «сенсори».

Датчики призначені для перетворення будь-якої фізичної величини в електричний сигнал, за допомогою якого здійснюється передача інформації про значення фізичної величини в пристрій керування. В даному випадку фізичною величиною можуть виступати температура, тиск, вологість, положення, швидкість, освітленість, вага і т. д. Електричний сигнал може характеризуватися такими параметрами, як напруга, сила струму, тимчасові параметри (імпульсного або періодичного сигналу) і т. д.

2.1 СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДАТЧИКІВ

У загальному випадку структуру технологічного датчика (рис. 2.1) можна зобразити такими структурними елементами:

- первинний перетворювач (ПП);
- електричний перетворювач (ЕП);
- нормуючий перетворювач (НП).

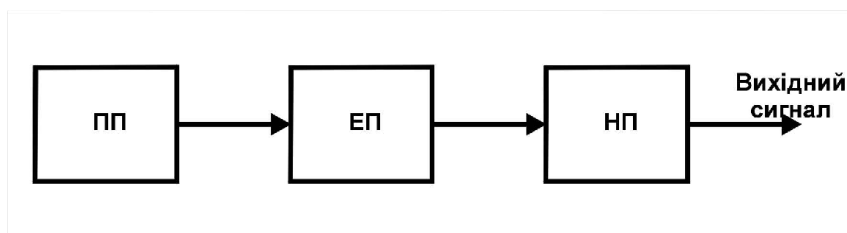


Рис. 2.1. Узагальнена структура технологічного датчика

Невід'ємною частиною будь-якого технологічного датчика є первинний перетворювач, його ще часто називають чутливим елементом. Саме чутливий елемент дозволяє здійснити перетворення фізичної величини в електричний сигнал. У структурі деяких датчиків можлива відсутність таких елементів, як електричний і нормуючий перетворювачі.

Електричний перетворювач являє собою якесь схемне рішення, яке дозволяє отримати електричний сигнал з чутливого елемента і перетворити його певним чином. В електричному перетворювачі можна виділити два компоненти: перший – вимірювальна схема, другий – перетворювач сигналу. Перетворювач сигналу може здійснювати перетворення сигналу за різними параметрами (напруга, струм, частота, рівень та ін.).

Прикладом перетворювача сигналу за рівнем може бути звичайний масштабуючий підсилювач, який дозволяє збільшити величину сигналу, а перетворювача сигналу за інформаційним параметром – перетворювач «частота – напруга».

Нормуючий перетворювач являє собою якість схемне рішення, яке дозволяє отримати вихідний електричний сигнал, який відповідає одному із стандартних діапазонів для інформаційних сигналів, визначених в ДСТУ 26.011-80.

2.2 ТИПИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ

Вихідний електричний сигнал датчика несе інформацію про поточне значення фізичної величини або про її зміну.

У загальному випадку інформація може бути подана двома формами повідомлень. Стосовно датчиків це можна сформулювати таким чином: інформація на виході датчика може бути подана електричним сигналом у вигляді однієї з різновидів форм електричних сигналів.

Перша форма подання інформації називається аналоговою. Характерним для неї є те, що кількість значень, які може набувати при цьому деяка величина, нескінченно велика. Таких значень нескінченно багато навіть тоді, коли величина змінюється в обмеженому діапазоні.

Друга форма подання інформації називається дискретною. Характерним для неї є те, що величини набувають не будь-які, а лише цілком певні значення і кількість цих значень може бути досить великою, але завжди кінцевою.

Незалежно від форми подання інформації, вона передається у вигляді електричних сигналів – струмів або напруг, які являють собою функції часу. Параметри електричних сигналів, за допомогою яких передається інформація, називаються інформаційними. Такими параметрами є амплітуда, частота, фаза, тривалість імпульсів, просторовий розподіл серій імпульсів на одній або декількох паралельних лініях і т. д.

За формою повідомлень, що передаються, розрізняють:

- безперервні сигнали (інформаційні параметри можуть змінюватися в будь-які моменти часу);
- переривчасті сигнали (інформаційні параметри можуть змінюватися лише в певні моменти часу).

За характером зміни значень інформаційних параметрів розрізняють:

- аналогові сигнали (інформаційні параметри всередині заданого діапазону можуть набувати будь-яких значень);
- дискретні сигнали (інформаційні параметри можуть набувати лише певних дискретних значень).

На сьогодні різноманітність видів вихідних сигналів сучасних датчиків досить велика. Далі будуть розглянуті основні найбільш поширені види.

2.2.1 Амплітудно-безперервні сигнали

Інформаційним параметром амплітудно-безперервних сигналів можуть бути амплітуда напруги або амплітуда струму. Тому дані сигнали часто називають амплітудно-безперервними сигналами за напругою і амплітудно-безперервними сигналами за струмом.

Розглянемо амплітудно-безперервні сигнали на прикладі амплітудно-безперервних сигналів по напрузі. Інформаційним параметром амплітудно-безперервних сигналів є амплітуда напруги сигналу U . Сигнали даного виду можуть мати аналоговий або дискретний характер (рис. 2.2). Амплітуда напруги сигналу може набувати в першому випадку – будь-якого значення, у другому – тільки значення, що визначаються кроком дискретизації ΔU .

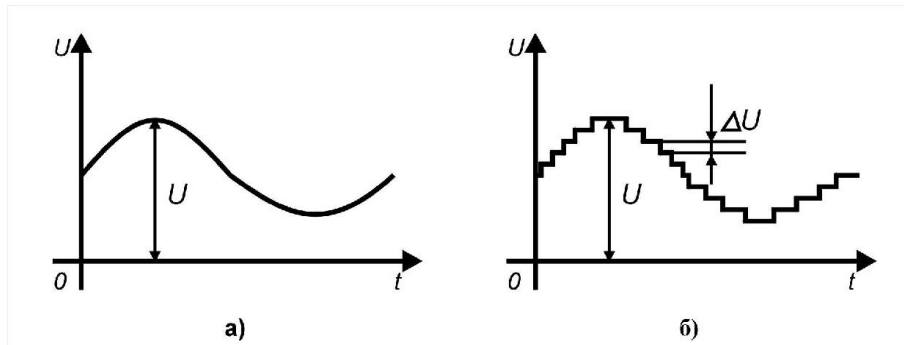


Рис. 2.2. Амплітудно-безперервний сигнал:
а – аналоговий; б – дискретний

2.2.2 Амплітудно-імпульсні сигнали

Інформаційним параметром амплітудно-імпульсних сигналів є амплітуда напруги імпульсу U . Сигнали даного виду можуть мати аналоговий або дискретний характер (рис. 2.3). Амплітуда напруги імпульсу може набувати в першому випадку – будь-якого значення, у другому – тільки значення, що визначаються кроком дискретизації ΔU .

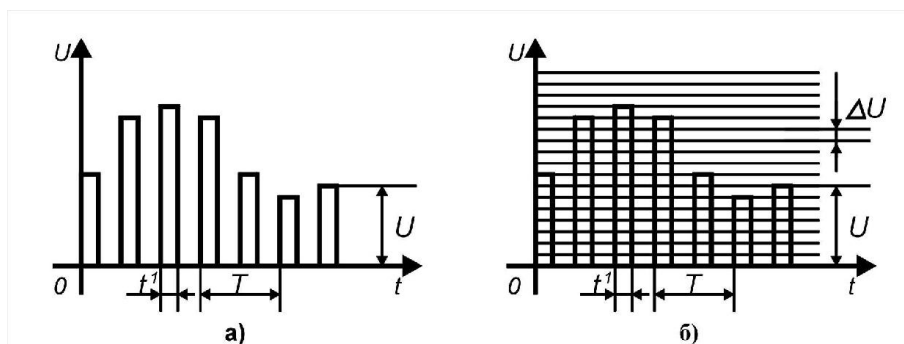


Рис. 2.3. Амплітудно-імпульсний сигнал:
а – аналоговий; б – дискретний

Такі параметри, як тривалість імпульсу t^1 , тривалість паузи t^0 і тривалість періоду проходження імпульсів T (частота проходження імпульсів) в амплітудно-імпульсних сигналах, як правило, є величинами постійними.

2.2.3 Частотно-безперервні сигнали

Інформаційним параметром частотно-безперервних сигналів є частота $f = 1/T$ або період сигналу T . Сигнали даного виду можуть мати аналоговий або дискретний характер (рис. 2.4). Частота сигналу може набувати в першому випадку будь-якого значення, у другому – тільки значення, що визначаються кроком дискретизації Δt .

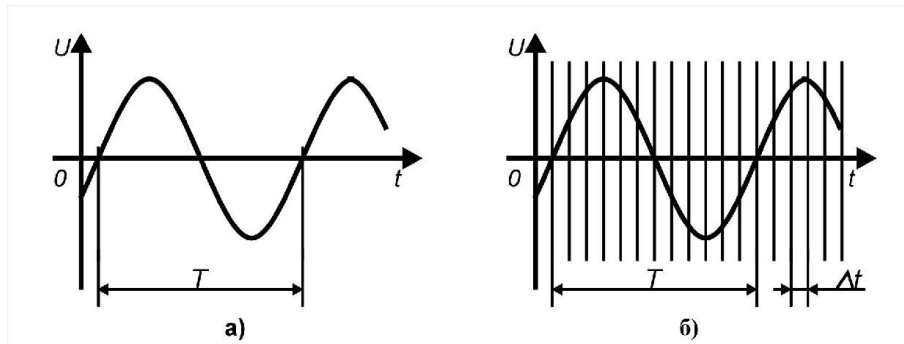


Рис. 2.4. Частотно-безперервний сигнал:
а – аналоговий; б – дискретний

Амплітуда напруги сигналу U в частотно-безперервних сигналах, як правило, є величиною постійною.

Слід зазначити, що форма сигналу може бути відмінною від синусоїдальної, наприклад, прямокутною, трикутною, пилкоподібною.

2.2.4 Частотно-імпульсні сигнали

Інформаційним параметром частотно-імпульсних сигналів є частота $f = 1/T$ або період сигналу T . Сигнали даного виду можуть мати аналоговий або дискретний характер (рис. 2.5). Частота сигналу може набувати в першому випадку будь-якого значення, у другому – тільки значення, що визначаються кроком дискретизації Δt .

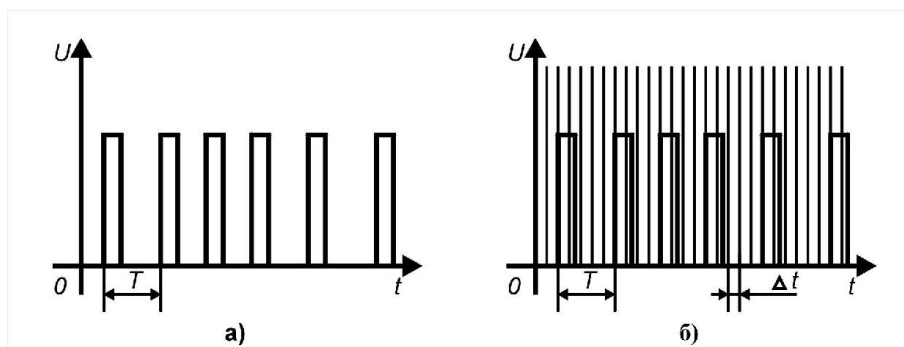


Рис. 2.5. Частотно-імпульсний сигнал:
а – аналоговий; б – дискретний

Такі параметри, як амплітуда імпульсу U , тривалість імпульсу t^1 , тривалість паузи t^0 в частотно-імпульсних сигналах, як правило, є величинами постійними.

Слід зазначити, що в даному випадку форма сигналу може бути різною, наприклад, прямокутною, трикутною, пилкоподібною.

2.2.5 Фазово-безперервний сигнал

Інформаційним параметром фазово-безперервних сигналів є зсув фаз φ між сигналами F_1 і F_2 . Сигнали даного виду можуть мати аналоговий або дискретний характер (рис. 2.6). Зсув фаз сигналів може набувати в першому випадку – будь-якого значення, у другому – тільки значення, що визначаються кроком дискретизації $\Delta\varphi$.

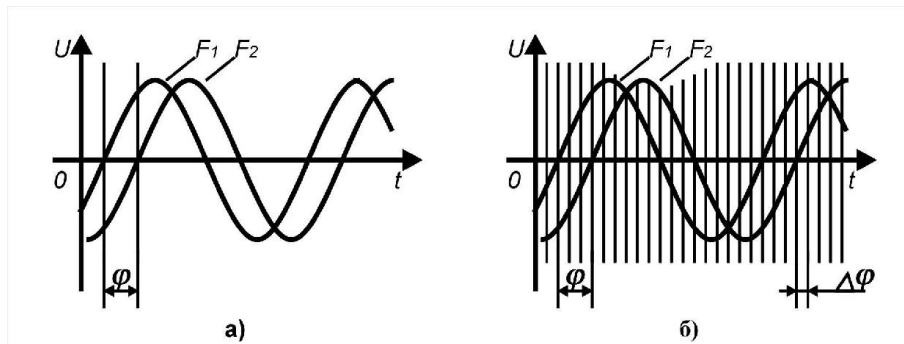


Рис. 2.6. Фазово-безперервний сигнал:
а – аналоговий; б – дискретний

Такі параметри, як амплітуда сигналу U , частота сигналів f_1 і f_2 в фазово-безперервних сигналах, як правило, є величинами постійними. Причому частота сигналів однакова.

Слід зазначити, що в даному випадку форма сигналу може бути різною, наприклад, прямокутною, трикутною, пилкоподібною.

2.2.6 Фазово-імпульсні сигнали

Інформаційним параметром фазово-імпульсних сигналів є зсув фаз φ між сигналами F_1 і F_2 . Сигнали даного виду можуть мати аналоговий або дискретний характер (рис. 2.7). Зсув фаз сигналів може набувати в першому випадку будь-якого значення, у другому – тільки значення, що визначаються кроком дискретизації $\Delta\varphi$.

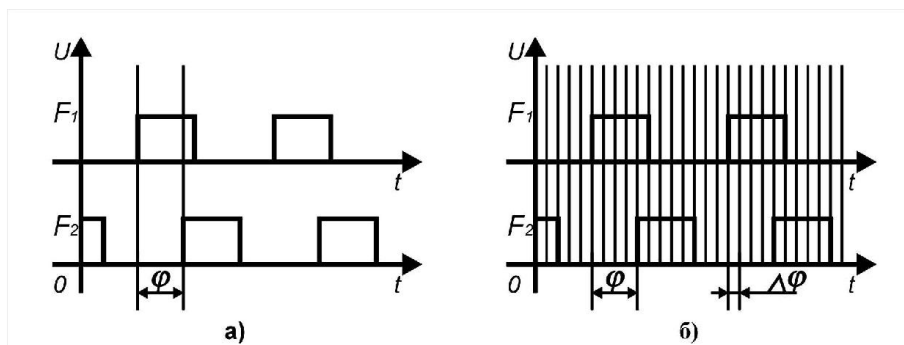


Рис. 2.7. Фазово-імпульсний сигнал:
а – аналоговий; б – дискретний

Такі параметри, як амплітуда сигналу U , тривалість імпульсів сигналів t_1^1 і t_2^1 , а також частота сигналів f_1 і f_2 у фазово-імпульсних сигналах, як правило, є величинами постійними. Причому частота сигналів однакова.

2.2.7 Широтно-імпульсні сигнали

Інформаційним параметром широтно-імпульсних сигналів є або тривалість імпульсу t^1 , або тривалість паузи t^0 , або скважність сигналу S . Сигнали даного виду можуть мати аналоговий або дискретний характер (рис. 2.8). Інформаційний параметр сигналу може набувати в першому випадку будь-якого значення, у другому – тільки значення, що визначаються кроком дискретизації Δt .

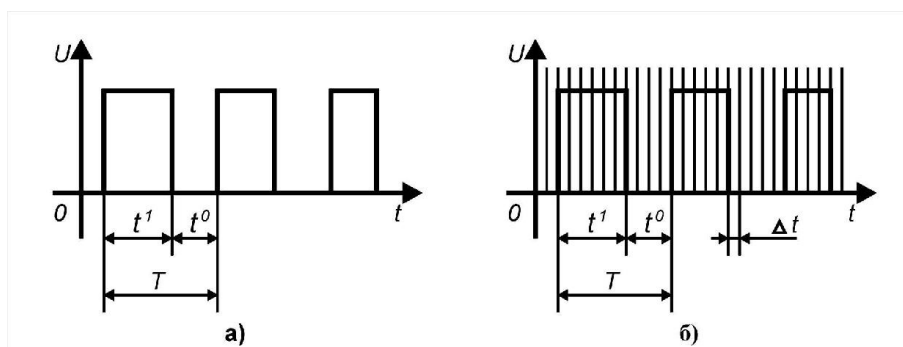


Рис. 2.8. Широтно-імпульсний сигнал:
а – аналоговий; б – дискретний

Такі параметри, як амплітуда імпульсу U і частота сигналу f в широтно-імпульсних сигналах, як правило, є величинами постійними.

Скважність – безрозмірна величина, одна з класифікаційних ознак імпульсних систем, що визначає відношення тривалості періоду сигналу до тривалості імпульсу:

$$S = \frac{T}{t^1} \quad (2.1)$$

де T – тривалість періоду сигналу, t^1 – тривалість імпульсу сигналу.

Часто використовується величина, зворотна скважності, яка називається коефіцієнтом заповнення:

$$D = \frac{1}{S} = \frac{t^1}{T} \quad (2.2)$$

де S – скважність сигналу.

Скважність і коефіцієнт заповнення – безрозмірні величини, проте коефіцієнт заповнення часто подають у відсотках. Коефіцієнт заповнення в ряді застосувань більш зручний, оскільки його відносна зміна відбувається в інтервалі від нуля до одиниці, тоді як відповідна скважність змінюється від нескінченності до одиниці.

2.3 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКІВ

Основною характеристикою датчика є характеристика вхід – вихід – залежність вихідної величини від вхідної, тобто залежність величини вихідного сигналу від фізичної величини, яку перетворює датчик.

Розрізняють статичну і динамічну характеристики датчика. Під статичною характеристикою датчика розуміють залежність між усталеними значеннями вхідної і вихідної величин, під динамічною – поведінку вихідної величини під час перехідного процесу у відповідь на миттєву (ступеневу) зміну вхідної величини. Якщо в статичній характеристиці датчика будується залежність тільки між значенням вихідної величини Y у відповідь на зміну вхідної величини X , то в динамічній характеристиці датчика бере участь параметр часу t і така характеристика являє собою залежність виду $U = Y(t)$. Очевидно, що сталі значення вихідної величини датчика – це значення, якого набуває його вихідна величина після закінчення всіх перехідних процесів, тобто коли t прагне до нескінченності. Залежність між усталеними значеннями вхідної і вихідної величин стосовно датчикам називається тарувальною кривою.

2.3.1 Статична характеристика вхід – вихід

Режим роботи, при якому вхідний і вихідний сигнали постійні, називають статичним або сталим режимом. Характеристики, які визначаються в цьому режимі, називаються статичними.

Таким чином, статична характеристика датчика (вхід – вихід) відображає функціональну залежність вихідного сигналу від вхідного параметра в сталому режимі. Статична характеристика може задаватися: аналітичним, графічним чи табличним способом.

За цією характеристикою визначаються такі параметри датчика, як чутливість (коефіцієнт перетворення), поріг чутливості, лінійність, величина дрейфу; діапазон виміру (робочий діапазон), параметри гістерезису і т. д.

У загальному випадку ідеалізовану статичну характеристику можна уявити залежністю, яка описується рівнянням прямої

$$y = ax + b. \quad (2.3)$$

В абсолютно ідеалізованій характеристиці значення $b = 0$, таким чином, пряма описується рівнянням

$$y = ax \quad (2.4)$$

і відповідно проходить через початок координат (рис. 2.9, а).

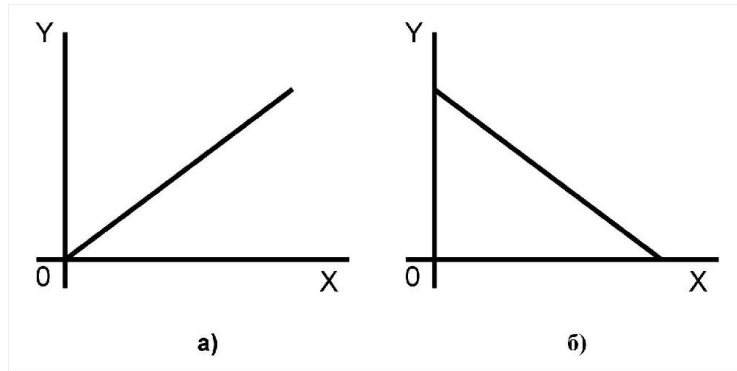


Рис. 2.9. Ідеалізована статична характеристика вхід – вихід:
а – позитивна; б – негативна

Слід зазначити, що дана характеристика може бути «прямою» (позитивною) або «зворотною» (негативною). Пряма характеристика – це коли збільшення значення фізичної величини призводить до збільшення вихідного сигналу (рис. 2.9, а). Зворотна характеристика – це коли збільшення значення фізичної величини призводить до зменшення вихідного сигналу (рис. 2.9, б). У рівнянні (2.3) коефіцієнт a в першому випадку – позитивний, у другому – негативний. Подальший розгляд статичної характеристики буде приводитися на прикладі прямої характеристики, але все що буде розглядатися справедливо і для зворотної.

Чутливість датчика характеризується коефіцієнтом перетворення. Коефіцієнт перетворення або коефіцієнт передачі – це відношення вихідної величини y_i до вхідної величини x_i або відношення приросту вихідної величини Δy до приросту вхідної величини Δx (рис. 2.10).

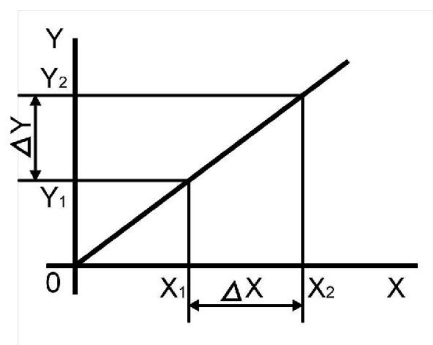


Рис. 2.10. Визначення коефіцієнта передачі на статичній характеристиці

Таким чином, коефіцієнт перетворення визначається виразом

$$k = \frac{y}{x} \quad (2.5)$$

або

$$k' = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}. \quad (2.6)$$

У реальній практиці статична характеристика може мати «зону нечутливості», «зону насичення» і «початковий зсув сигналу» (рис. 2.11).

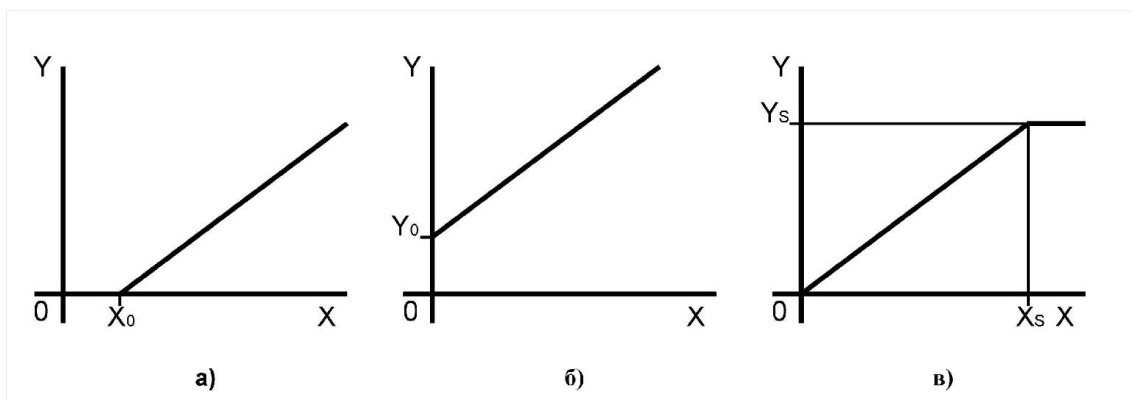


Рис. 2.11. Статична характеристика вхід – вихід:

а – із зоною нечутливості; б – з початковим зміщенням; в – із зоною насичення сигналу

Порогом чутливості називається мінімальна величина на вході елемента, яка викликає зміну вихідної величини. При зміні вхідної величини X від нуля до порога чутливості X_0 вихідна величина Y не змінюється і дорівнює нулю. Цей діапазон вхідної величини називається зоною нечутливості.

Початковим зміщенням сигналу називається наявність на виході елемента вихідного сигналу величини, відмінної від нуля, при вхідній величині, що дорівнює нулю, тобто при вхідній величині X , що дорівнює нулю, вихідна величина Y набуває деякого відмінного від нуля значення Y_0 . Ще це називають значенням «холостого ходу».

Насиченням сигналу називається відсутність зміни сигналу на виході елемента при подальшому збільшенні вхідної величини. При збільшенні вхідної величини X від порога насичення X_s і до нескінченості вихідна величина Y не змінюється (рис. 2.11, в). Цей діапазон вхідної величини називається зоною насичення.

Лінійність оцінюється величиною різниці між фактичною і лінійною залежністю вихідної величини від вхідної у відсотках від максимального значення вимірюваної величини в заданому діапазоні вимірювань (рис. 2.12).

Характеристика лінійна в певному діапазоні, якщо її чутливість (коефіцієнт перетворення) не залежить від вхідної величини, тобто залишається постійною.

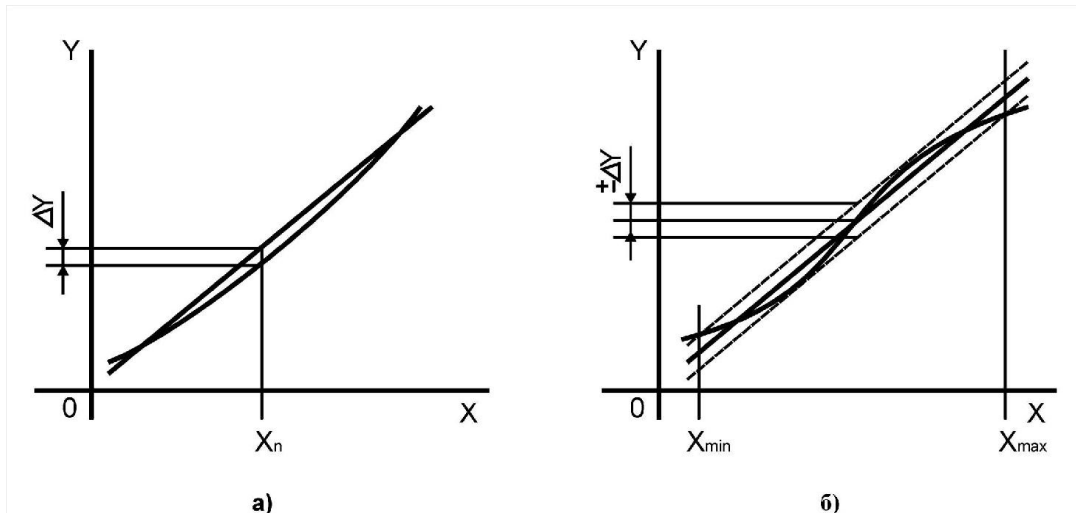


Рис. 2.12. Визначення лінійності характеристики вхід-вихід:
а – лінійність при значенні X_n ; б – лінійність в діапазоні від X_{\min} до X_{\max}

Обробка сигналу в разі лінійності його характеристики значно спрощується. Перетворення нелінійної характеристики датчика в лінійну називають лінеаризацією. Цей процес спрямований на те, щоб зробити сигнал пропорційним зміні вимірюваної величини.

Практично на будь-якій нелінійній статистичній характеристиці при заданому значенні лінійності можна вибрати певний діапазон, у якому характеристика буде відповідати лінійній (рис. 2.13, а).

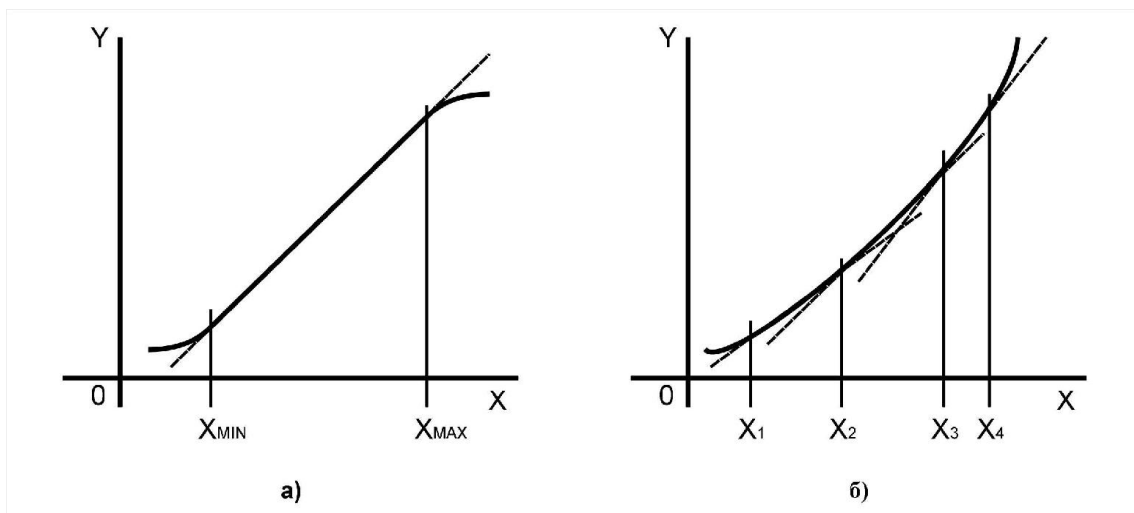


Рис. 2.13. Приклади нелінійних статичних характеристик вхід – вихід з лінійними ділянками

Теоретично на будь-якій нелінійній характеристиці при заданому значенні лінійності можна вибрати нескінченну кількість лінійних ділянок (рис. 2.13, б).

Діапазон вимірювань – область значень вхідної величини, для якої нормовані похибки вихідної величини. Ця область обмежена двома межами вхідної величини – мінімальним X_{min} і максимальним X_{max} значеннями. Цим величинам відповідають мінімальне Y_{min} і максимальне Y_{max} значення вихідного сигналу, які визначають діапазон вихідного сигналу (рис. 2.14).

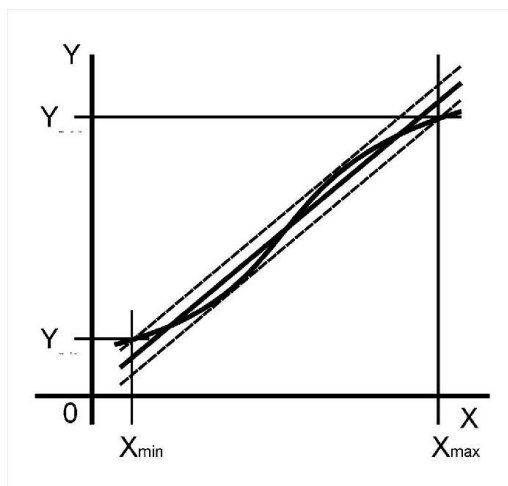


Рис. 2.14. Діапазон вимірювання і діапазон вихідного сигналу

Такі величини, як діапазон вимірювань, діапазон вихідного сигналу і лінійність статичної характеристики, є взаємопов'язаними величинами. Якщо завдати значення однієї величини, то за статичною характеристикою можна визначити значення інших величин.

2.3.2 Динамічна характеристика вхід – вихід

Перехід системи з одного сталого режиму в інший (з іншими значеннями вхідної і вихідної величини) називають динамічним режимом або перехідним процесом.

Динамічними називають характеристики, які проявляються лише в динамічному режимі роботи, тобто коли величина, що перетворюється, є функцією часу (процесом).

У динамічному режимі відношення вихідного сигналу до вхідного може не дорівнювати коефіцієнту перетворення. Поведінка елемента або системи автоматики в перехідному процесі може бути описана за допомогою перехідних характеристик. Перехідною характеристикою називають залежність вихідного сигналу від часу $y(t)$ при стрибкоподібній зміні вхідного сигналу (східчастому впливі).

Ідеальна перехідна характеристика відповідає функції $Y = KX$ (рис. 2.15, а). Момент подачі одиничного ступеневого впливу відповідає моменту часу t_0 . Перехідна характеристика реальних датчиків може носити або аперіодичний характер (рис. 2.15, б), або коливальний характер (рис. 2.15, в).

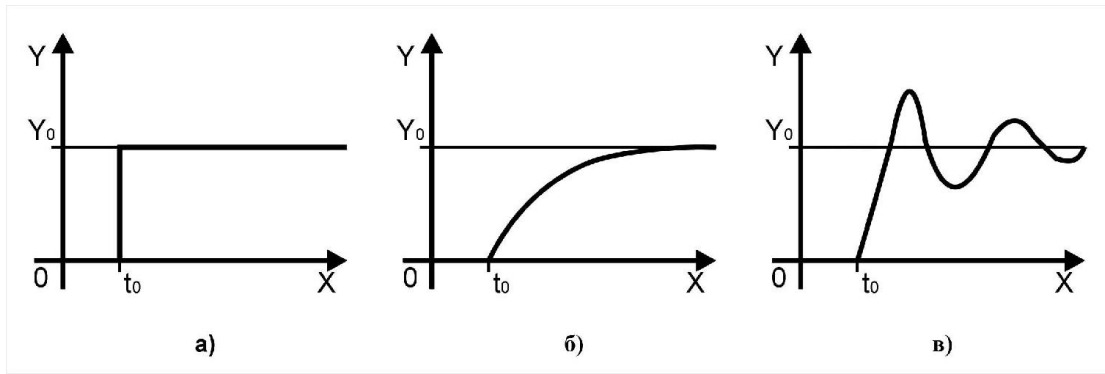


Рис. 2.15. Перехідна характеристика:
а – ідеальна; б – аперіодична; в – коливальна

Диференціальне рівняння динамічної системи є її вичерпною характеристикою, але його коефіцієнти важко піддаються експериментальному визначенню. Тому як характеристика перетворення в часовій області використовуються імпульсна (вагова) $q(t)$ і перехідна $h(t)$ функції лінійної динамічної системи.

Імпульсна функція $q(t) = Ld(t)$ (рис. 2.16) є відгуком (реакцією) динамічної системи на вхідне обурення у вигляді δ -функції.

Перехідна функція $h(t) = L1(t)$ (рис. 2.17) є відгуком лінійної динамічної системи на вхідний вплив у вигляді одиничної функції $1(t)$.

Імпульсна і перехідна характеристики вичерпно описують динамічні властивості лінійної динамічної системи. Вони порівняно легко можуть бути експериментально визначені. Використовуючи інформацію, яку вони містять, можна знайти значення коефіцієнтів диференціального рівняння, які по-іншому складно ідентифікувати.

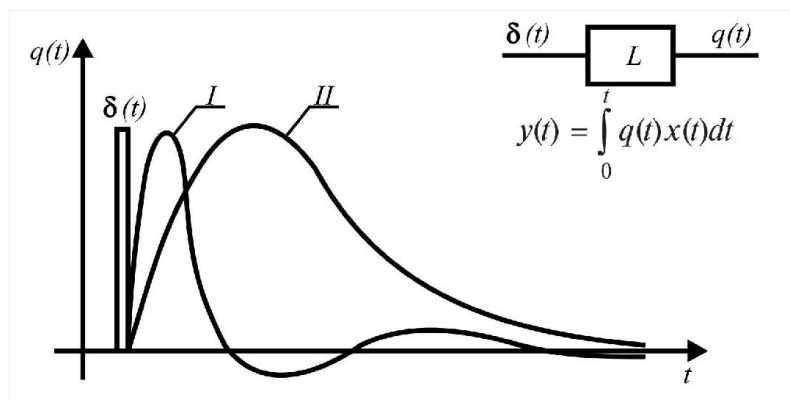


Рис. 2.16. Суміщений графік імпульсної функції $q(t)$:
I – коливальний характер; II – аперіодичний характер

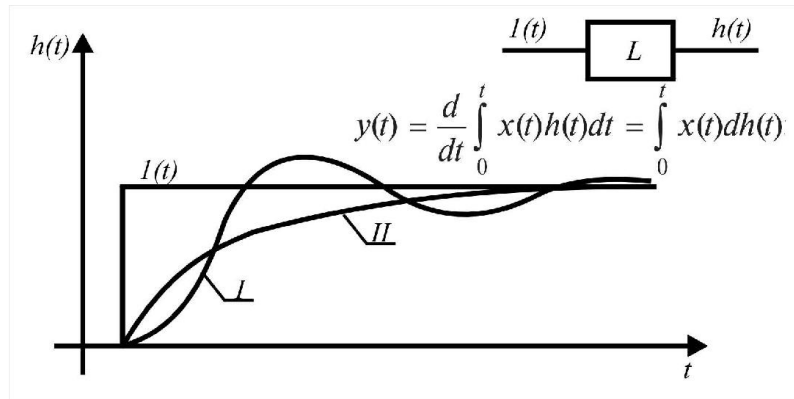


Рис. 2.17. Суміщений графік перехідної функції $h(t)$:
 I – коливальний характер; II – аперіодичний характер

2.3.3 Похибки перетворення датчиків

У процесі перетворення датчиком вхідної величини в вихідну вносяться похибки як самими складовими компонентами датчика, так і зовнішніми чинниками. Датчики є не тільки засобами автоматизації, але компонентами вимірювальної техніки. Тому стосовно датчиків терміни «якість перетворення» і «якість вимірювання» тотожні.

Точність вимірювання – це якісна характеристика вимірювання, яка визначає близькість результату вимірювання до дійсного (істинного) значення вимірюваної величини. Чим ближче результат вимірювання до істинного значення, тим точніше вимірювання. І навпаки.

Традиційно для кількісного оцінювання якості вимірювань використовують негативну характеристику – похибка вимірювання.

Похибка вимірювання – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини.

Похибки датчиків (перетворювачів), як і похибки інших засобів вимірювань, можуть бути класифіковані за різними ознаками: за способом вираження, за характером змін, залежно від впливу характеру зміни вимірюваної величини.

За способом вираження похибки підрозділяють на абсолютні, відносні й приведені.

Абсолютна похибка (помилка) – різниця між дійсним значенням вихідної величини Y' і його номінальним значенням Y . Таким чином:

$$\Delta = Y' - Y. \quad (2.7)$$

Особливістю визначення абсолютної похибки датчиків є те, що як справжнє значення фізичної величини (вхідної або вихідної) береться значення цієї величини на номінальній статичній функції перетворення (градууювальній характеристиці).

Абсолютна похибка не дає повного уявлення про якість вимірювання. Наприклад, абсолютна похибка 0,1 кг при вимірюванні маси 100 кг – це цілком

хороший результат. Але абсолютна похибка 0,1 кг при вимірюванні маси 1 кг – це дуже низька точність вимірювання. Для кількісної характеристики якості вимірювань у цьому випадку зручніше використовувати відносну похибку.

Відносна похибка – відношення абсолютної похибки Δ до дійсного значення вихідної величини Y :

$$\delta = \frac{\Delta}{Y} \quad (2.8)$$

З виразу (2.8) випливає, що відносна похибка – величина безрозмірна і її часто виражають у відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta}{Y} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

Наведена похибка – це відносна похибка Δ , яка виражена відношенням абсолютної похибки засобу вимірювань до нормуючого значення Y_{norm} . Таким чином:

$$\gamma = \frac{\Delta}{Y_{norm}} \cdot 100\% \quad (2.10)$$

Вибір нормуючого значення здійснюється відповідно до ДСТУ-8.009-84. Це може бути верхня межа засобу вимірювання, діапазон вимірювань, довжина шкали і т. д.

Стосовно датчиків, керуючись поняттям «діапазон вимірювань», нормуючим значенням може виступати найбільше значення вихідної величини Y_{max} або найбільше значення вхідної величини X_{max} . Тоді наведена похибка датчика буде визначатися виразом

$$\gamma = \frac{\Delta}{Y_{max}} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Для безлічі засобів вимірювань відповідно до значення наведеної похибки встановлюють клас точності. Наведена похибка вводиться тому, що відносна характеризує похибку тільки в даній точці характеристики і залежить від значення вимірюваної величини.

За характером змін похибки можуть мати систематичний і випадковий характер.

Систематичні похибки є складовою частиною похибки, що залишається постійною або змінюється за певною закономірністю у весь час проведення вимірювань. Така похибка може бути виключена з результатів вимірювання шляхом регулювання, калібрування або введенням поправок.

Приклади систематичних похибок: постійних – похибка, що викликана впливом навколишнього середовища (температура, вологість і т. ін.), змінних – похибка, що обумовлена нестабільністю джерела живлення.

Випадкові похибки є складовою частиною похибки, вони змінюються випадковим чином і причини цих змін не можна точно визначити, а значить, й усунути їх неможливо. Ці похибки призводять до неоднозначності показань.

Зменшення їх можливо при багаторазових вимірах і подальшій статистичній обробці результатів.

Залежно від впливу характеру зміни вимірюваної величини розрізняють статичні й динамічні похибки.

Статична похибка – це похибка, що виникає при вимірі незмінної величини або величини, яка змінюється повільно.

Динамічна похибка – це похибка, що виникає при вимірі мінливої в часі фізичної величини. Вона є наслідком інерційності засобів вимірювальної техніки (засобів перетворення).

2.4 ВИМІРЮВАЛЬНІ СХЕМИ ДАТЧИКІВ

Параметричні первинні перетворювачі – це перетворювачі, у яких зміна вимірюваної фізичної величини супроводжується зміною опору (активного, ємнісного, індуктивного) безпосередньо самого первинного перетворювача. Для отримання електричного сигналу необхідно підключення первинного перетворювача в вимірювальну схему і наявність джерела живлення.

Як правило, датчик є проміжною ланкою між джерелом живлення (напруги або струму) і відповідною входною схемою вимірювального пристрою (навантаженням). Тому датчик характеризують входним і вихідним імпедансом Z . Імпеданс для резистивних перетворювачів визначається як $Z = R$ для індуктивних – $Z = \omega L$, для ємнісних – $Z = 1/(\omega C)$. Існує потенційна і струмова схема включення.

На еквівалентних електричних схемах включення резистора вихідного імпедансу датчика і резистора входного імпедансу вимірювального пристрою у потенційній схемі – послідовне, а при струмовій схемі – паралельне (рис. 2.18).

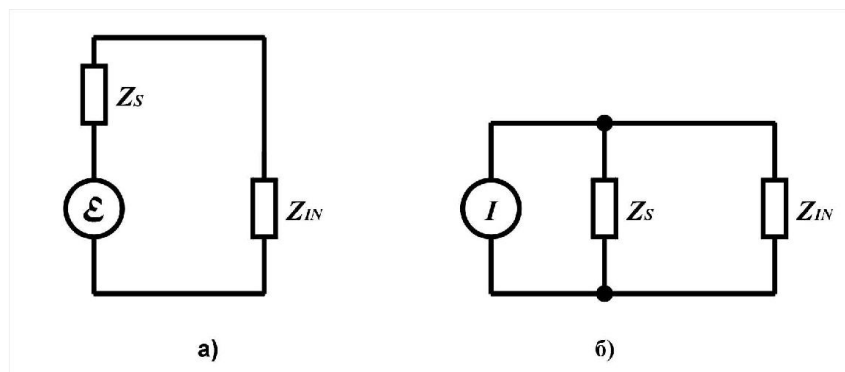


Рис. 2.18. Еквівалентна схема з'єднання первинного перетворювача з вимірювальним пристроєм:
а – потенційна схема; б – струмова схема

На схемах первинний перетворювач датчика зображено резистором Z_S , входний опір вимірювального пристрою – резистором Z_{IN} , а джерело живлення – джерелом напруги ε або струму I .

Величина спотворення сигналу залежить від імпедансу джерела живлення, датчика і схеми вимірювального пристрою. Для зменшення

спотворень сигналу при струмовому включенні вихідний імпеданс датчика повинен бути високим, а імпеданс вимірювального пристрою – низьким. У разі потенційного включення – навпаки, вихідний імпеданс датчика має бути низьким, а імпеданс вимірювального пристрою – високим.

У загальному випадку варіації вихідного імпедансу Z_S первинного перетворювача, які пов'язані зі змінами вимірюваної величини x , можуть бути перетворені в електричний сигнал шляхом включення первинного перетворювача в вимірювальну схему, яка живиться від джерела ЕРС ε або струму I .

У разі параметричних перетворювачів функція перетворення вимірювальної схеми описується виразом:

$$U_{out}(x) = \varepsilon F(Z_S, Z_{IN}), \quad (2.12)$$

де Z_S – вихідний імпеданс датчика, Z_{IN} – вхідний імпеданс вимірювального пристрою, ε – ЕРС джерела живлення.

Потенціометричну схему в вимірювальних колах датчиків використовують найбільш часто. У цій схемі первинний перетворювач підключають послідовно з додатковим елементом, що утворює подільник напруги. Основна перевага потенціометричної схеми – її простота, основний недолік – чутливість до зовнішніх факторів. У мостовій схемі, яка є модифікацією потенціометричної і містить два диференційно включених подільника напруги, вдається істотно знизити вплив зовнішніх факторів.

Чутливість датчика S_S у параметричних схемах визначається виразом:

$$S_S = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta x} = \left(\frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta Z_S} \right) \cdot \left(\frac{\Delta Z_S}{\Delta x} \right) = S_{IN} S_S \quad (2.13)$$

де S_{IN} – чутливість схеми вимірювального пристрою, S_S – чутливість первинного перетворювача датчика.

Для параметричних первинних перетворювачів найбільше застосування знайшли потенціометричні та мостові вимірювальні схеми. Як уже зазначалося, параметричні первинні перетворювачі характеризуються зміною активного, ємнісного або індуктивного опору самого перетворювача. Розглянуті нижче вимірювальні схеми однаково справедливі для перетворювачів опору будь-якого характеру. Єдиною відмінністю є те, що для перетворювачів, у яких змінюється реактивний опір, необхідне застосування джерела живлення змінної напруги. Розгляд схем наводиться на базі резистивних (зміна активного опору) первинних перетворювачів.

2.4.1 Потенціометрична схема

У потенціометричній схемі (рис. 2.19) первинний перетворювач, опір якого R_S , підключений послідовно з резистором постійного опору R_1 , а живлення здійснюється від джерела ЕРС ε з внутрішнім опором R_e .

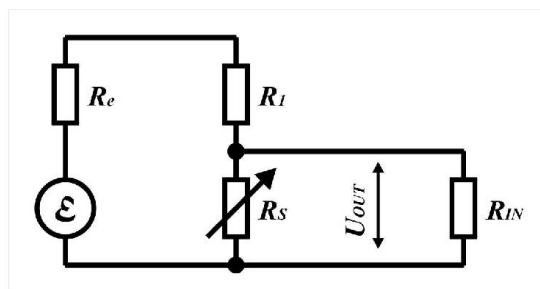


Рис. 2.19. Потенціометрична вимірювальна схема

По суті, вхідний опір вимірювального пристрою (вольтметр, вимірювальний підсилювач, аналогово-цифровий перетворювач) є опором навантаження вихідного кола вимірювальної схеми датчика.

Вихідна напруга даної схеми буде визначатися як:

$$U_{OUT} = \varepsilon \frac{R_S R_{IN}}{R_S(R_e + R_1) + R_{IN}(R_e + R_1 + R_S)} \quad (2.14)$$

За умови, що $R_{IN} \gg R_S$, вихідна напруга U_{OUT} практично не залежить від навантаження R_{IN} . Вона залежить тільки від величини опору первинного перетворювача R_S і є нелінійною функцією:

$$U_{OUT} = \varepsilon \frac{R_S}{R_e + R_1 + R_S} \quad (2.15)$$

Цей вираз являє собою функцію перетворення потенціометричної схеми. Виходячи з того, що зазвичай внутрішній опір джерела живлення $R_e \ll R_S$, напруга живлення U_0 практично дорівнює величині ЕРС ε , статичну характеристику потенціометричної вимірювальної схеми можна уявити відносною залежністю U_{OUT}/U_0 від зміни опору первинного перетворювача R_S (рис. 2.20).

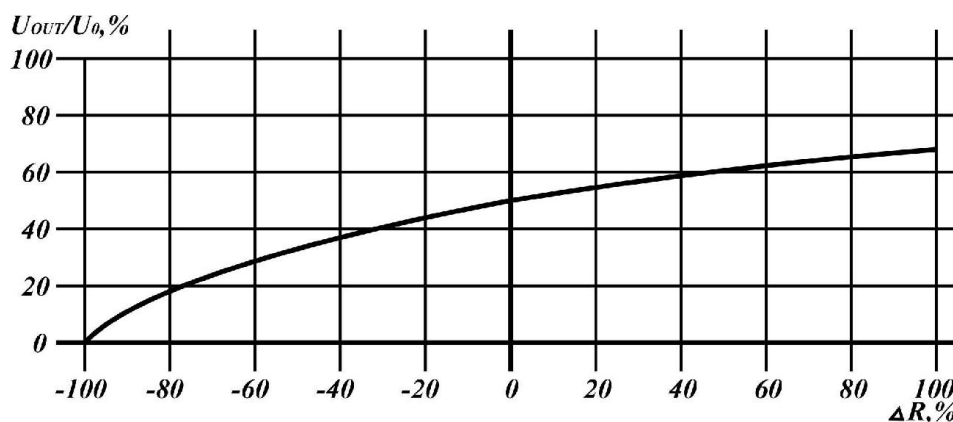


Рис. 2.20. Статична характеристика потенціометричної вимірювальної схеми

У більшості випадків потрібно, щоб зміна напруги U_{OUT} була пропорційна зміні опору R_S первинного перетворювача. Лінеаризація функції

перетворення досягається двома основними способами: роботою в лінійній зоні характеристики і диференціальним підключенням первинного перетворювача.

Робота в лінійній зоні передбачає, що опір первинного перетворювача змінюється від R_{S0} до $(R_{S0} + \Delta R_S)$ і викликає зміну вихідної напруги від U_{OUT0} до $(U_{OUT0} + \Delta U_{OUT})$. Це визначається виразом:

$$U_{OUT0} + \Delta U_{OUT} = \varepsilon \frac{R_{S0} + \Delta R_S}{(R_{S0} + R_1 + R_e) \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_S}{R_{S0} + R_1 + R_e}\right)} \quad (2.16)$$

При $\Delta R_S \ll R_{S0} + R_1 + R_e$ з точністю до величин другого порядку малості маємо:

$$\Delta U_{OUT} = \varepsilon \frac{(R_e + R_1)\Delta R_S}{(R_{S0} + R_1 + R_e)^2} \quad (2.17)$$

Чутливість вимірювальної схеми $S_{IN} = \Delta U_{OUT}/\Delta R_S$ максимальна, якщо $R_e + R_1 = R_{S0}$. У цьому випадку функція перетворення буде мати вигляд:

$$\Delta U_{OUT} = \varepsilon \frac{\Delta R_S}{4R_{S0}} \quad (2.18)$$

2.4.2 Диференціальна схема

Диференціальна вимірювальна схема (рис. 2.21) утворюється при заміні в потенціометричній схемі (рис. 2.19) резистора постійного опору R_1 другим первинним перетворювачем $R_{S'}$, таким же як R_S , але з негативним знаком перед ΔR_S .

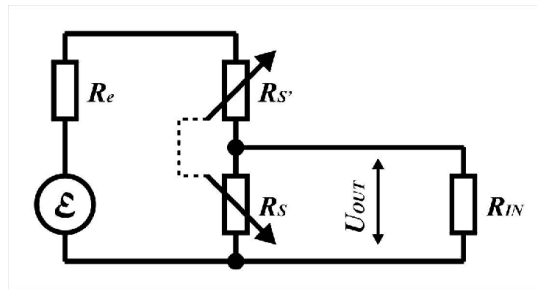


Рис. 2.21. Диференціальна вимірювальна схема

Таким чином, $R_S = R_{S0} + \Delta R_S$, а $R_{S'} = R_{S0} - \Delta R_S$.

Цей спосіб включення первинних перетворювачів називається двотактна схема або диференціальна схема. Наприклад, це можуть бути два однакових тензорезистори, що піддаються рівним за величиною, але протилежним за знаком деформаціям (один на розтягнення, другий на стиск).

Значення вихідного сигналу визначається виразом:

$$U_{OUT0} + \Delta U_{OUT} = \varepsilon \frac{R_{S0} + \Delta R_S}{(R_{S0} + \Delta R_S) + (R_{S0} - \Delta R_S) + R_e} \quad (2.19)$$

Функція перетворення для диференціальної схеми має формулу:

$$\Delta U_{OUT} = \varepsilon \frac{\Delta R_S}{2R_{S0} + R_e} \quad (2.20)$$

Відмінною особливістю диференціальної вимірювальної схеми є лінійність статичної характеристики у всьому діапазоні й практично вдвічі вища чутливість порівняно з потенціометричною вимірювальною схемою (рис. 2.22).

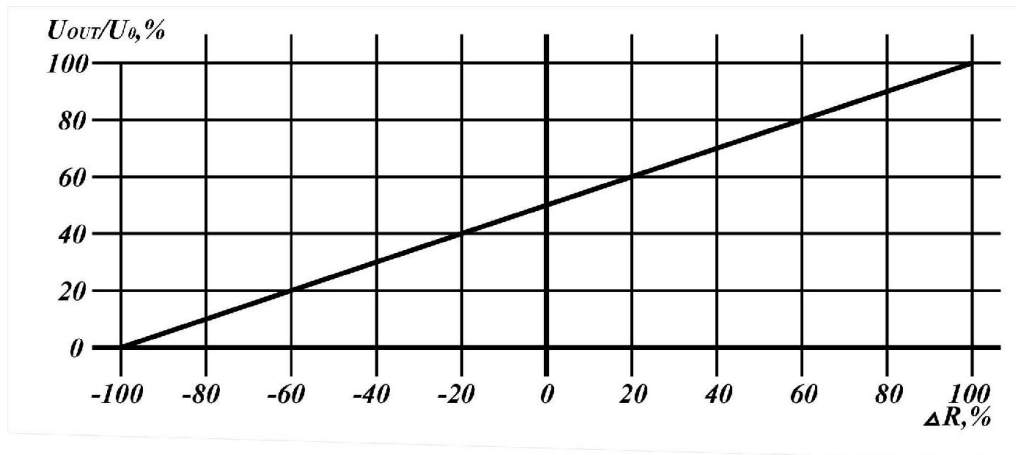


Рис. 2.22. Статична характеристика диференціальної вимірювальної схеми

Диференціальне включення первинних перетворювачів дозволяє компенсувати вплив зовнішніх чинників, які призводять до виникнення похибок. Наприклад, зміна температури навколишнього середовища викликає зміну опору елементів $R_{S'}$ і R_S , але зміна значення опору обох елементів має однакову величину. Таким чином, вихідний сигнал подільника напруги, що утворюється елементами $R_{S'}$ і R_S , залишається незмінним.

2.4.3 Мостова схема

Мостова схема (рис. 2.23) являє собою два подільники напруги (перший – утворений резисторами R_1 і R_2 , другий – резисторами R_3 і R_4), які включені паралельно і живляться від одного джерела живлення U .

Вихідний сигнал U_{OUT} являє собою різницю потенціалів цих подільників напруги, тобто є диференціальним.

Зазвичай внутрішній опір джерела $R_e \ll R_1 R_2 R_3 R_4$, а вхідний опір вимірювального пристрою $R_{IN} \gg R_1 R_2 R_3 R_4$. Це дозволяє опір джерела R_e та опір вимірювального пристрою R_{IN} не враховувати в розрахунках.

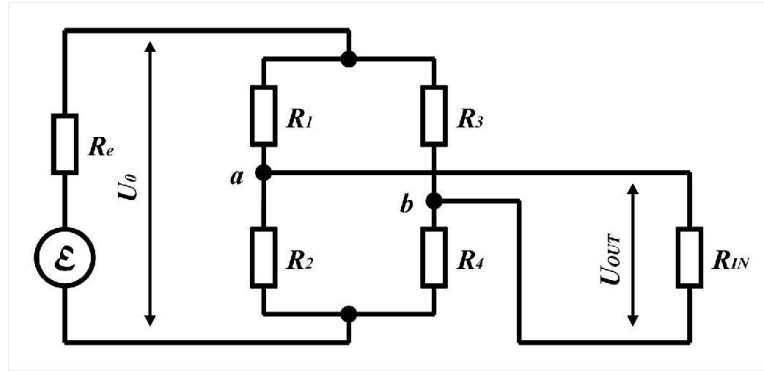


Рис. 2.23. Мостова схема

Відповідно до закону Кірхгофа величина потенціалу першого подільника (у точці **a**) визначається виразом (2.21), а величина потенціалу другого подільника (у точці **b**) – виразом (2.22), тобто:

$$U_a = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad (2.21)$$

$$U_b = U_0 \frac{R_4}{R_3 + R_4}; \quad (2.22)$$

де U_0 – напруга джерела живлення (враховуючи, що внутрішній опір джерела $R_e \rightarrow 0$ можна вважати $U_0 = \varepsilon$).

Загальновідомо, що умова балансу моста визначається виразом:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{або} \quad R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (2.23)$$

Слід зауважити, що умова балансу моста залежить тільки від співвідношення опорів плечей моста й абсолютно не залежить від внутрішнього опору джерела живлення R_e і вхідного опору вимірювального пристрою R_{IN} .

Вихідна напруга визначається як різниця потенціалів у точках **a** і **b**. Цей вислів описує функцію перетворення мостової схеми:

$$U_{OUT} = U_a - U_b = U_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (2.24)$$

Найчастіше для спрощення процедури вимірювань значення опору резисторів моста вибирають однаковими, тобто $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$.

На малій ділянці характеристики та за умови того, що опір резисторів дорівнює значенню R і що збільшення їхнього опору малі, вихідна характеристика буде лінійною з точністю до величин другого порядку і матиме вигляд:

$$U_{OUT} = \frac{U_0}{4} \cdot \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{R} \quad (2.25)$$

За способом включення первинних перетворювачів у мостову схему розрізняють три різновиди мостових схем:

- одноквартний міст (схема 1/4 моста);
- напівміст (схема 1/2 моста);
- повний міст (схема моста).

Схема 1/4 моста

У схемі 1/4 моста замість одного з резисторів включається параметричний первинний перетворювач R_S (рис. 2.24). У даному випадку $R_2 = R_3 = R_4 = R$, а величина $R_1 = R_S = R + \Delta R$

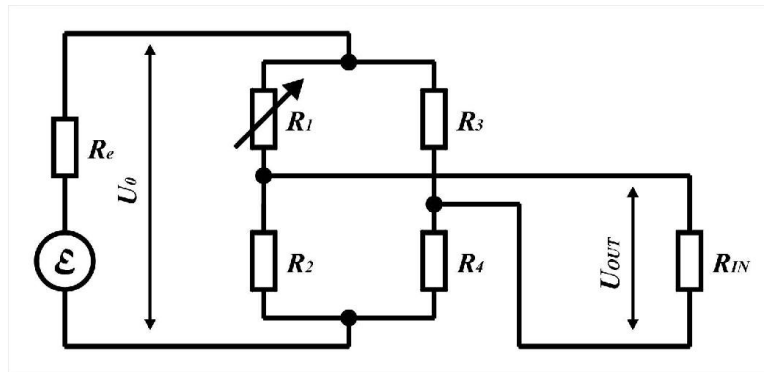


Рис. 2.24. Схема одноквартного моста

Ураховуючи, що $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$, а $\Delta R_1 = \Delta R$, функція перетворення для даної схеми відповідно до виразу (2.25) матиме вигляд:

$$U_{OUT} = U_0 \frac{\Delta R}{4R} \tag{2.26}$$

Схема 1/2 моста

У схемі напівмоста використовується два первинних перетворювачі. Тут можливо два схемних рішення. Одну схему прийнято називати «напівміст», а другу – «квазінапівміст».

Схема напівмоста (рис. 2.25) являє собою схему моста, у якому один з подільників напруги є диференціальною схемою з первинних перетворювачів. Важливо, що дане схемне рішення має на увазі те, що первинні перетворювачі при зміні вимірюваної величини отримують приріст опору різний за знаком.

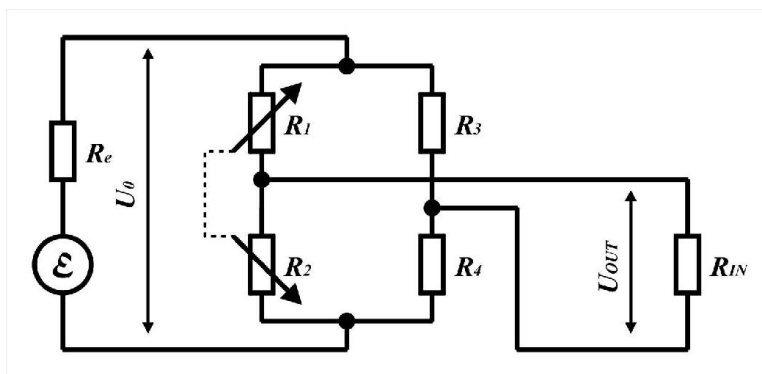


Рис. 2.25. Схема напівмоста

Ураховуючи, що $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$, а $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R$, функція перетворення напівмостової виміральної схеми відповідно до виразу (2.25) матиме вигляд:

$$U_{OUT} = U_0 \frac{2\Delta R}{4R} = U_0 \frac{\Delta R}{2R} \quad (2.27)$$

Схема квазінапівмоста (рис. 2.26) являє собою схему моста, у якому ділянки напруги виконані за потенціометричною схемою. Причому перший діляник містить первинний перетворювач у верхньому плечі, а другий – у нижньому. Важливо, що дане схемне рішення має на увазі те, що первинні перетворювачі при зміні вимірюваної величини отримують приріст опору однаковий за знаком.

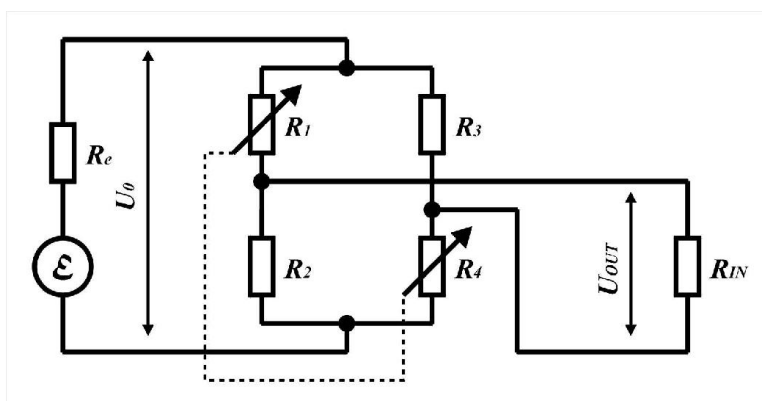


Рис. 2.26. Схема квазінапівмоста

Ураховуючи, що $\Delta R_2 = \Delta R_3 = 0$, а $\Delta R_1 = \Delta R_4 = \Delta R$, функція перетворення квазінапівмостової виміральної схеми відповідно до виразу (2.25) матиме вигляд:

$$U_{OUT} = U_0 \frac{2\Delta R}{4R} = U_0 \frac{\Delta R}{2R} \quad (2.28)$$

Схема повного моста

У схемі повного моста всі чотири резистори є первинні перетворювачі R_S (рис. 2.27). У даному випадку $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_S = R + \Delta R$. Важливо, що дане схемне рішення має на увазі те, що первинні перетворювачі при зміні вимірюваної величини попарно (R_1, R_2 і R_3, R_4) отримують приріст опору різний за знаком.

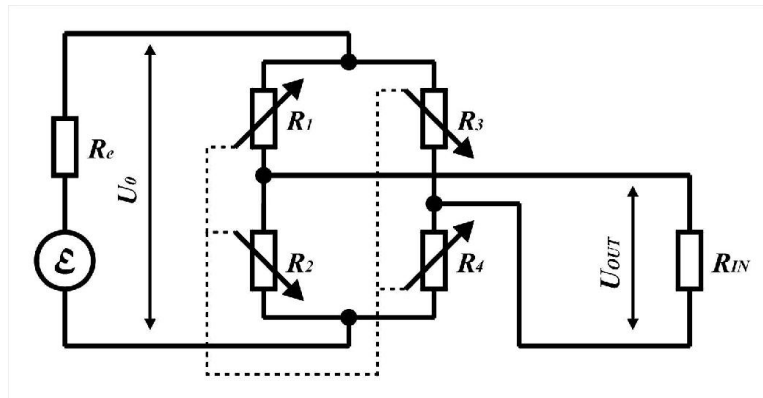


Рис. 2.27. Схема повного моста

Ураховуючи, що $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$, функція перетворення мостової вимірювальної схеми повного моста відповідно до виразу (2.25) матиме вигляд:

$$U_{OUT} = U_0 \frac{4\Delta R}{4R} = U_0 \frac{\Delta R}{R} \quad (2.29)$$

Висновки щодо мостових вимірювальних схем

Аналіз виразів з (2.26) по (2.29) дозволяє зробити висновок, що порівняно зі схемою одночетвертного моста схема повного моста має вищу чутливість в 4 рази, а схема напівмоста (незалежно від типу) – в 2 рази.

Аналіз статичних характеристик мостових вимірювальних схем (рис. 2.28) дозволяє зробити висновок щодо чутливості та лінійності функції перетворення для кожного типу мостових вимірювальних схем.

Одночетвертний міст має найменшу чутливість і явно виражену нелінійність. Лінійність функції може забезпечуватися в вузькому діапазоні зміни опору первинного перетворювача (при відносно невеликому значенні ΔR).

Квазінапівміст має вдвічі вищу чутливість порівняно з одночетвертним мостом, але також, як і одночетвертний міст, має явно виражену нелінійність характеристики.

Напівміст має практично лінійну характеристику в усьому діапазоні та вдвічі вищу чутливість порівняно з одночетвертним мостом (у лінійній частині його характеристики).

Повний міст має практично лінійну характеристику в усьому діапазоні, вдвічі вищу чутливість в порівнянні з напівмостом і вчетверо вищу порівняно з одночетвертним мостом (у лінійній частині його характеристики).

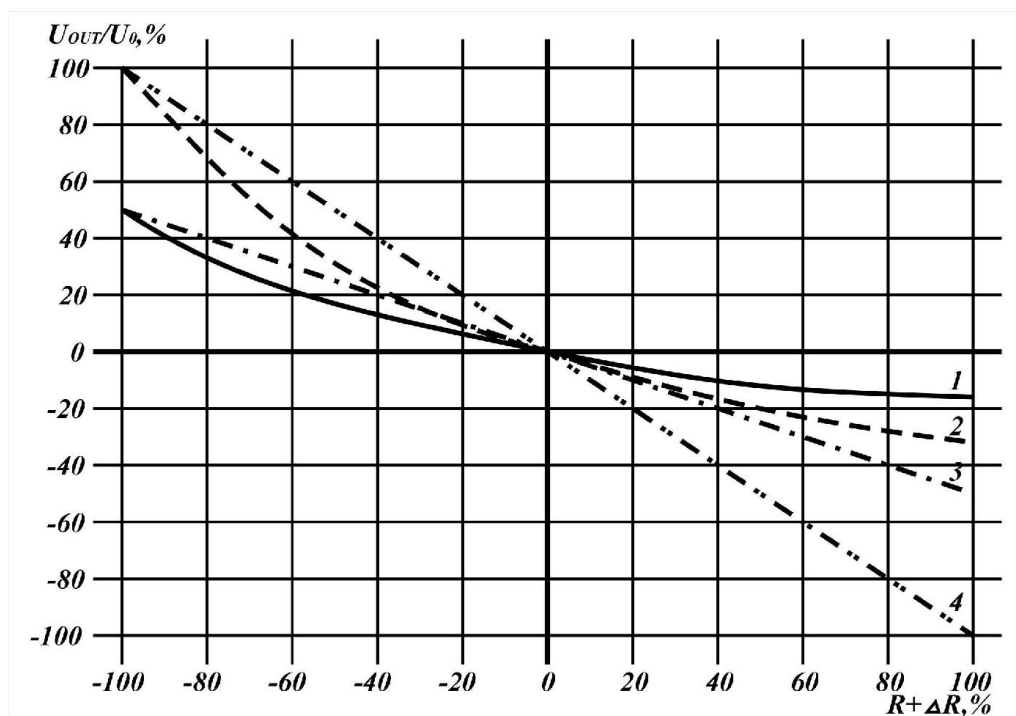


Рис. 2.28. Статична характеристика мостових схем:
1 – одночетвертний міст; 2 – квазінапівміст; 3 – напівміст; 4 – повний міст

Перевагами мостових схем є забезпечення більшої чутливості, мала чутливість до зовнішніх факторів (вплив навколишнього середовища, електромагнітних завад) і досить висока лінійність функції перетворення.

2.5 ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ Й ДАТЧИКИ

Первинні перетворювачі датчиків залежно від того, на якому фізичному явищі заснований принцип дії, можна розділити на два види – параметричні та генераторні.

Параметричні первинні перетворювачі ще називають пасивними первинними перетворювачами. В таких перетворювачах зміна контрольованої фізичної величини супроводжується зміною опору (активного, ємнісного, індуктивного) безпосередньо самого первинного перетворювача. І для отримання електричного сигналу необхідна наявність стороннього джерела енергії.

Генераторні первинні перетворювачі ще називають активними первинними перетворювачами. В таких перетворювачах зміна контрольованої фізичної величини супроводжується зміною ЕРС, що формується безпосередньо самим первинним перетворювачем. Залежно від первинного перетворювача ЕРС може виникати за рахунок термоелектрики, п'єзоефекту

і т. д. Додаткове джерело енергії для таких первинних перетворювачів не потрібно.

Параметричні первинні перетворювачі, у яких зміна контрольованої фізичної величини призводить до зміни:

- активного опору первинного перетворювача – називають резистивними первинними перетворювачами;
- ємнісного опору первинного перетворювача – називають ємнісними первинними перетворювачами;
- індуктивного опору первинного перетворювача – називають індуктивними первинними перетворювачами.

У даний час існує величезна різноманітність параметричних і генераторних первинних перетворювачів. Далі будуть розглянуті перетворювачі, які отримали найбільше поширення в датчиках, що застосовуються в системах автоматизації виробничих процесів.

2.5.1 Потенціометричні перетворювачі

В основі потенціометричного перетворювача лежить змінний резистор, який включений як потенціометр. Змінний резистор можна підключити за схемою потенціометра або за схемою реостата. У першому випадку він буде виконувати функцію подільника напруги (зміна напруги на виході), у другому – функцію обмежувача струму (зміна величини струму в колі). Класичною є схема потенціометра, звідси і назва «потенціометричні перетворювачі».

Основне призначення потенціометричних перетворювачів – це вимір переміщень, положення. Залежно від конструктивного виконання потенціометричні перетворювачі реалізують вимірювання лінійних або кутових переміщень. Якщо первинний перетворювач виконаний у вигляді змінного резистора з поступальним переміщенням повзунка, то вийде перетворювач для вимірювання лінійних переміщень (рис. 2.29, а), а якщо первинний перетворювач виконаний у вигляді поворотного змінного резистора, то вийде перетворювач для вимірювання кутових переміщень (рис. 2.29, б).

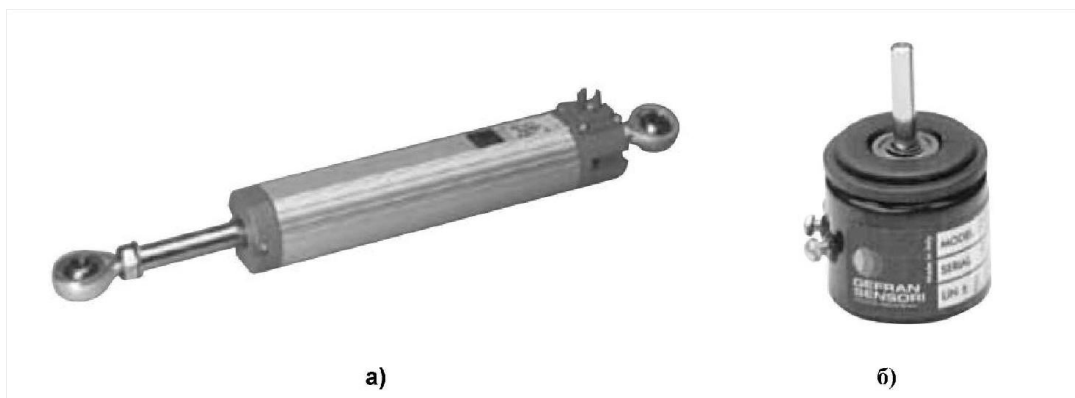


Рис. 2.29. Приклад потенціометричного датчика положення:
а – для вимірювання лінійних переміщень; б – для вимірювання кутових переміщень

Датчики на основі потенціометричних первинних перетворювачів називають датчиками положення, датчиками переміщення, позиційними датчиками, датчиками кутових переміщень, поворотними датчиками положення і т. д. В основі всіх цих датчиків лежить змінний резистор і положення повзунка резистора перетворюється в відношення опорів частин резистора (відношення опору резистора з одного боку від повзунка до опору резистора з другого боку від повзунка). Включення змінного резистора за потенціометричною схемою призводить до того, що напруга на повзунці визначається відношенням опорів частин резистора (рис. 2.30, а). Таким чином, величина вихідної напруги визначається положенням повзунка потенціометричного перетворювача.

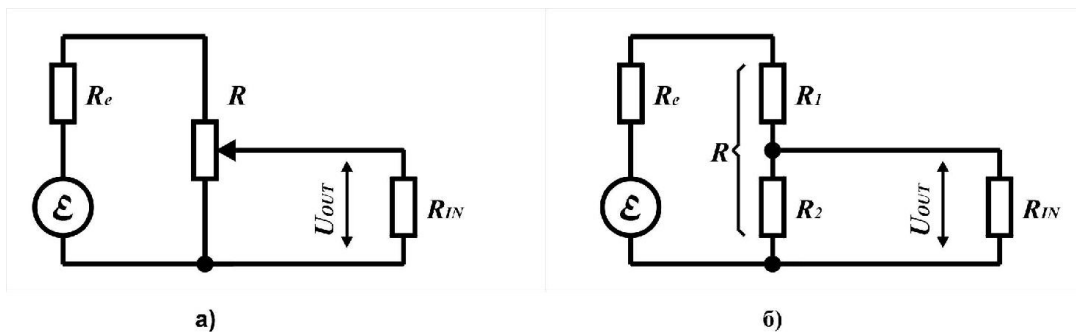


Рис. 2.30. Потенціометричний датчик положення:
а – схема включення; б – еквівалентна схема заміщення

Для отримання електричного сигналу резистивного первинного перетворювача (змінного резистора R) необхідно підключення джерела живлення ε . Вихідний сигнал у вигляді напруги виділяється на навантаженні R_{IN} (вхідний опір вимірювального пристрою). На практиці опір джерела живлення $R_e \ll R$ а вхідний опір вимірювального пристрою $R_{IN} \gg R$

Як видно з еквівалентної схеми заміщення (рис. 2.30, б), загальний опір потенціометра R визначається як $R = R_1 + R_2$, а положення повзунка резистора R можна позначити величиною α , яка змінюється від 0 (початкове положення) до 1 (кінцеве положення). Таким чином, величину резисторів R_1 і R_2 можна виразити як:

$$R_2 = R\alpha, \quad (2.30)$$

$$R_1 = R(1 - \alpha). \quad (2.31)$$

Вихідна напруга визначається виразом:

$$U_{OUT} = U_0 \frac{R_2}{R_2 + R_1} = U_0 \frac{R\alpha}{R\alpha + R(1 - \alpha)} = U_0\alpha. \quad (2.32)$$

З виразу (2.32) випливає, що вихідна напруга потенціометра буде прямо пропорційною величині α , тобто пропорційною положенню рухомої частини потенціометра.

Виходячи з виразу (2.32), статичну характеристику потенціометричного перетворювача можна подати залежністю відношення R_2/R від положення повзунка резистора α (рис. 2.31, б) або залежністю вихідної напруги U_{OUT}/U_0 від положення повзунка резистора α (рис. 2.31, а).

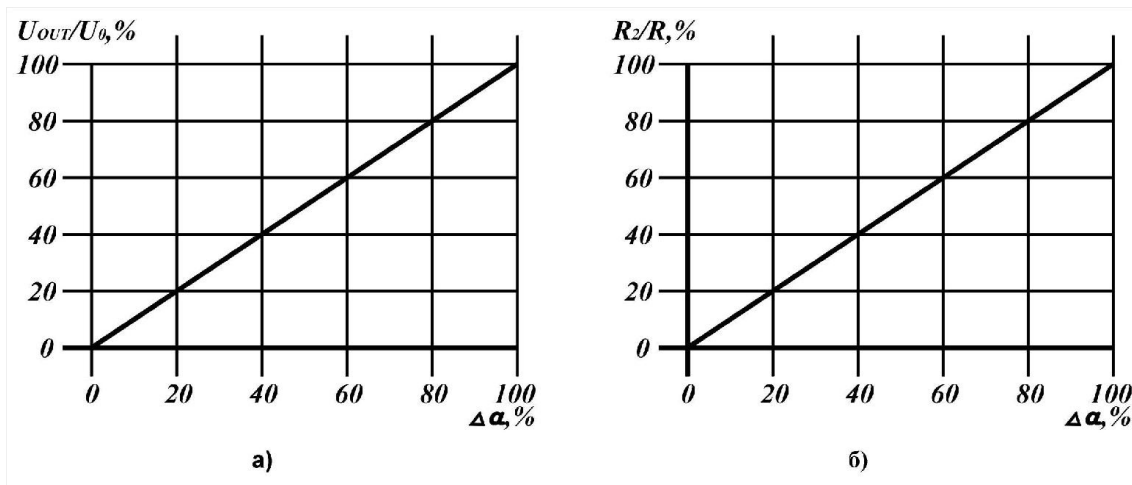


Рис. 2.31. Статична характеристика потенціометричного перетворювача положення: а – у відносному вираженні напруги; б – у відносному вираженні опору

Статична характеристика потенціометричного перетворювача лінійна за умови, що опір від початку до кінця резистора розподіляється рівномірно (лінійно). Змінні резистори виготовляються з різними характеристиками функції перетворення, які реалізують відповідну функцію статичної характеристики (рис. 2.32). Відповідність графіків: 1 – лінійна; 2 – логарифмічна; 3 – експоненціальна; 4 – S-подібна; 5 – зворотна логарифмічна; 6 – зворотна експоненціальна.

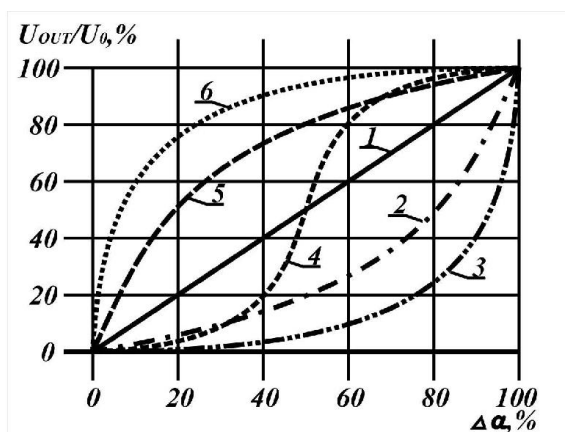


Рис. 2.32. Статична характеристика потенціометричного перетворювача положення для змінних резисторів з різною функцією перетворення

Найбільш поширеними є змінні резистори з характеристиками, що позначаються так: А – лінійна, Б – логарифмічна, В – експоненціальна, Г – S-подібна. Характеристики зворотні логарифмічній та експоненціальній можуть

бути отримані зворотним включенням змінного резистора з відповідною характеристикою (зміна напрямку включення).

Для вимірювання положення відносно базової (середньої) точки використовують напівмостову схему включення потенціометричного перетворювача (рис. 2.33, а) або застосовують потенціометричні перетворювачі з наявністю додаткового виводу посередині резистора (рис. 2.33, б).

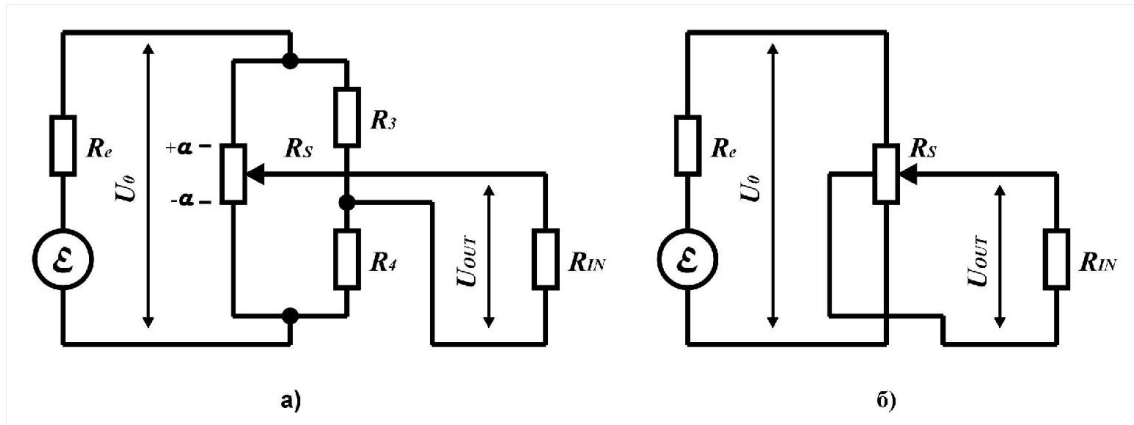


Рис. 2.33. Диференціальна схема підключення потенціометричного датчика положення: а – звичайного; б – спеціального

В обох випадках вихідний сигнал є диференціальним. Базовим положенням – нульовою позицією – вважається середнє положення повзунка на резисторі ($\alpha = 0$), при цьому вихідний сигнал дорівнює нулю.

Величина вихідного сигналу визначає положення (величину переміщення від базової позиції), а полярність сигналу – напрямок переміщення від базової точки (рис. 2.34).

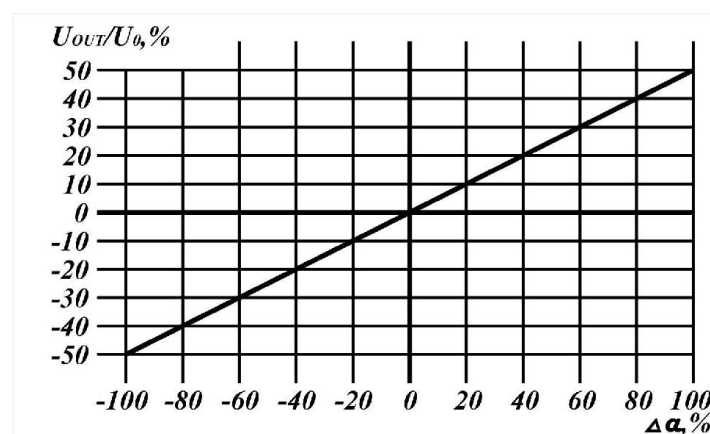


Рис. 2.34. Статична характеристика потенціометричного датчика положення при диференціальній схемі підключення

Слід зауважити, що спочатку міст повинен бути збалансований. У першому випадку для забезпечення балансу моста необхідно, щоб опір резисторів відповідав умові $R_3 = R_4 = R_S/2$, у другому – дана умова

виконується природним чином, оскільки функцію подільника напруги (резистори R_3 і R_4) виконує безпосередньо резистор потенціометричного перетворювача R_5 (додатковий вивід від середньої точки резистора).

Найбільшого поширення набули три основні технології виготовлення потенціометричних перетворювачів:

- дротяні, що являють собою дротяний реохорд або спіралеподібну конструкцію, яка забезпечує вимірювання кутових або лінійні переміщень;
- на основі товстоплівкових резистивних покриттів, які наносяться на робочі поверхні (друковані плати) резистивною пастою або вугле-волокнистою саженою, по якій переміщається рухливий контакт;
- гібридні, у яких резистивна паста наноситься на дротяну або спіралеподібну конструкцію.

Плівковий потенціометр складається з тонкої резистивної металевої або вугільної плівки, яка наноситься на жорстку пластмасову або скляну основу. Щоб отримати необхідну величину опору, товщина металевої плівки має бути дуже малою, що лімітує термін її служби і надійність. Вуглецеві плівки можуть бути набагато товщі, оскільки вуглець має високий питомий опір. Крім того, вони характеризуються низьким рівнем шумів, автоматичним змашуванням і стійкістю проти корозії.

В останні роки були розроблені потенціометри з металокерамічним резистивним елементом і з плівками на основі провідних пластиків.

У металоплівкових потенціометрах шар високоомного металу родію, товщиною 2 – 3 мкм, наноситься на скляну пластинку. Опір металоплівкового покриття, на відміну від дротяного, не має ступеневого характеру, що усуває ступінчастість статичної характеристики і забезпечує необмежену роздільну здатність плівкових потенціометрів. При цьому рухливий контакт має нескінченне число положень на робочій ділянці потенціометричного перетворювача. При цьому металоплівкові потенціометри мають менший, ніж у дротяних, момент обертання. Величина опору цих потенціометрів знаходиться в межах від 100 Ом до 1 МОм, а похибка не перевищує 0,5 %.

Металоплівкові потенціометри використовуються при підвищених вимогах до точності контролю та в пристроях з дистанційним передаванням результатів вимірювання.

Переваги потенціометричних перетворювачів:

- простота конструкції;
- стабільність характеристик;
- широкий діапазон робочих температур;
- висока точність;
- широкий діапазон виміру;
- простота регулювання;
- гнучкі параметричні криві;
- відносно невелика вартість.

Недоліки:

- механічне замикання, знос;

- помилки вимірювання, що обумовлюються зносом;
- люфт у механічній частині резистора;
- шуми.

Слід зазначити, що на базі потенціометричних первинних перетворювачів можлива побудова різноманітних (за вимірювальною величиною) датчиків, вимірювальна величина яких буде попередньо перетворена в переміщення (положення).

Приклади:

1. Побудова датчика рівня рідини в місткості, якщо поплавок буде механічно з'єднаний з повзунком потенціометричного перетворювача. Зміна рівня рідини буде приводити до зміни положення поплавка і, як наслідок, до зміни положення повзунка потенціометричного перетворювача.

2. Побудова датчика тиску в магістралі, якщо мембрана буде механічно з'єднана з повзунком потенціометричного перетворювача. Зміна тиску в системі буде приводити до деформації мембрани і, як наслідок, до зміни положення повзунка потенціометричного перетворювача.

3. Побудова датчика ваги, якщо підпружинена ваговимірювальна платформа буде механічно пов'язана з повзунком потенціометричного перетворювача. Положення ваговимірювальної платформи буде визначатися вагою предмета, що призведе до відповідного переміщення повзунка потенціометричного перетворювача.

2.5.2 Терморезистивні перетворювачі

Терморезистивні перетворювачі є параметричними резистивними перетворювачами і їх часто називають терморезисторами. Принцип дії таких перетворювачів заснований на зміні електричного опору матеріалів, з яких вони виготовляються, при зміні температури навколишнього середовища. Основне призначення терморезистивних перетворювачів – вимір температури.

Електричний опір провідника визначається виразом

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

де ρ – питомий опір матеріалу, L – довжина провідника, S – площа поперечного перерізу.

Зміна температури матеріалу призводить до зміни величини питомого опору ρ і згідно з виразом (2.33) – до зміни опору провідника R .

Для оцінки відносної зміни питомого опору речовини використовується ТКО – температурний коефіцієнт опору. Температурний коефіцієнт опору – величина, що дорівнює відносній зміні електричного опору ділянки електричного кола або питомого опору матеріалу при зміні температури на одиницю:

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \quad (2.34)$$

Температурний коефіцієнт опору характеризує залежність питомого електричного опору від температури і вимірюється в кельвінах в мінус першому степені (K^{-1}) або в градусах Цельсія в мінус першому ступені ($^{\circ}C^{-1}$).

Температурний коефіцієнт опору в загальному вигляді описується виразом (2.34), а до термоперетворювачів згідно з ДСТУ-6651-2009 «Термоперетворювачі опору з платини, міді і нікелю. Загальні технічні вимоги та методи випробувань» він визначається формулою

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100^{\circ}C} \quad (2.35)$$

де R_{100} – опір терморезистора при температурі $100^{\circ}C$, R_0 – опір терморезистора при температурі $0^{\circ}C$.

За типом залежності опору від температури розрізняють терморезистори з негативним і позитивним ТКО. Терморезистори з негативним ТКО називають термісторами (європейська аббревіатура NTC – від слів «Negative Temperature Coefficient»), терморезистори з позитивним ТКО називають позисторами (європейська аббревіатура PTC – від слів «Positive Temperature Coefficient»). Таким чином, при збільшенні температури опір для позисторов – збільшується, а для термісторів – зменшується.

Сучасні терморезистори виготовляють з металів, сплавів металів та напівпровідників. ТКО для більшості терморезисторів з металів і їх сплавів, а також чистих напівпровідників – позитивний, а для терморезисторів, які виготовлені на основі титанату барію (з'єднання оксидів барію і титану), – негативний.

Зміну опору провідника при зміні температури можливо визначити за виразом:

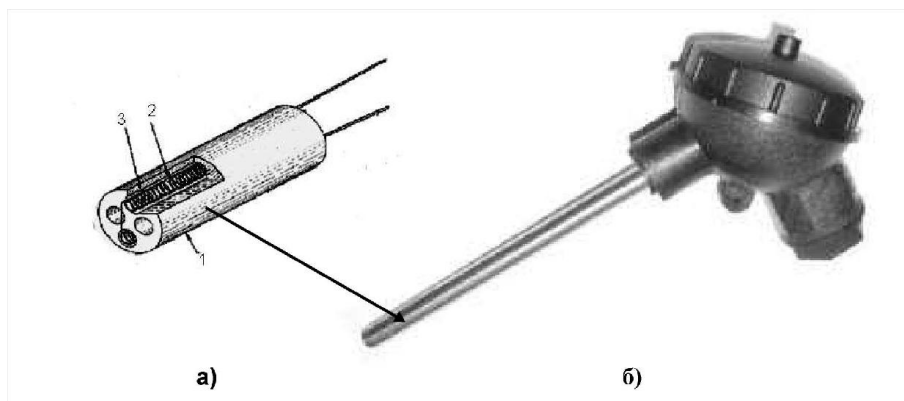
$$R_{t1} = R_{t0}(1 + \alpha (t_1 - t_0)) \quad (2.36)$$

де R_{t0} – опір провідника при температурі t_0 ; R_{t1} – опір провідника при температурі t_1 ; α – температурний коефіцієнт опору.

Терморезистори характеризуються значенням опору R_0 при температурі $0^{\circ}C$ і температурним коефіцієнтом опору α . Знайти значення опору терморезистора з урахуванням (2.36) для будь-якого значення температури t можливо за виразом:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t^{\circ}). \quad (2.37)$$

Типова конструкція датчика температури складається з двох частин. Перша – вимірювальна частина, друга – приєднувальна камера (рис. 2.35, б). Вимірювальна частина являє собою металеву трубку, у якій розташований первинний перетворювач температури, у даному випадку – терморезистивний перетворювач. У приєднувальній камері є клемник для підключення з'єднувального кабелю. У ряді випадків у даній камері розташовується електричний перетворювач і нормуючий перетворювач.



**Рис. 2.35. Приклад терморезистивного датчика температури:
а – конструкція терморезистивного перетворювача; б – зовнішній вигляд
терморезистивного датчика**

Конструкція терморезистивного перетворювача (рис. 2.35, а) на прикладі терморезистора з металу являє собою корпус 1 у вигляді трубки з оксиду алюмінію, у чотири отвори якого укладається провідник 2 – металева спіраль. Пустоти засипаються дрібнодисперсним порошком 3 з оксиду алюмінію високої чистоти. Таким чином, забезпечується ізоляція витків спіралі один від одного, амортизація спіралі при термічному розширенні, а також покращується теплопровідність від корпусу до провідника.

Завдяки лінійності статичної характеристики в широкому діапазоні температур і відносно низькій вартості, найбільшого поширення набули термоперетворювачі з чистих металів. Розповсюдженими матеріалами для їх виготовлення є мідь, платина та нікель. Технічні вимоги до цих термоперетворювачів сформульовані в міжнародному ДСТУ-6651-2009 «Термоперетворювачі опору з платини, міді і нікелю. Загальні технічні вимоги та методи випробувань».

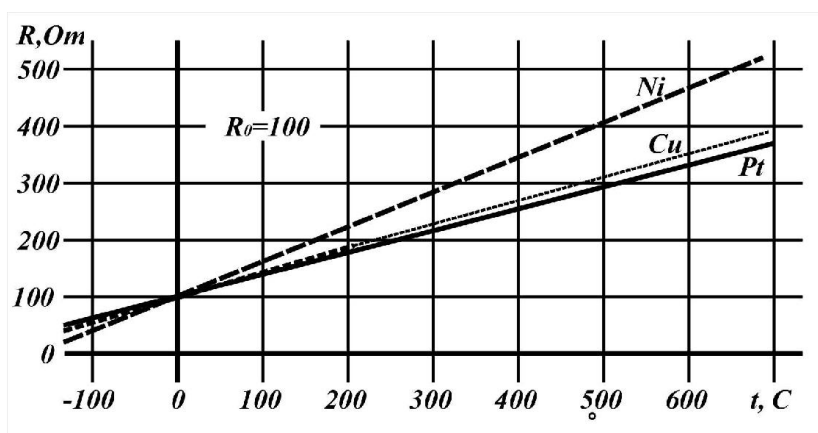


Рис. 2.36. Статичні характеристики для терморезистивних перетворювачів з металів і початковим опором 100 Ом

Статична характеристика для терморезистивних перетворювачів відображає залежність опору термочутливого елемента від температури. Як приклад наведені статичні характеристики для терморезистивних перетворювачів з платини, міді та нікелю для елементів з початковим опором величиною 100 Ом (рис. 2.36).

Мідні терморезистори використовуються в діапазоні температур від мінус 100 до 200°C. Вони мають хорошу лінійність статичної характеристики і невисоку ціну. До недоліків слід віднести досить низький питомий опір, що призводить до необхідності виготовляти чутливу частину у вигляді котушки. З одного боку, це збільшує інерційність, аж до декількох хвилин, а з іншого – з'являється паразитна індуктивність, яка здійснює вплив на вихідний сигнал при роботі на змінному струмі. Для зменшення впливу індуктивності застосовують безіндуктивні котушки, наприклад, намотані біфілярним чином, здвоєним проводом із зустрічно-послідовним включенням обох частин котушки.

Платинові термочутливі елементи мають декілька меншу чутливість й вищу вартість порівняно з мідними, але у них значно більший діапазон вимірюваних температур – від мінус 200 до 1100°C. Ще однією перевагою є висока точність та стабільність характеристик.

Нікелеві терморезистори мають більшу чутливість (практично вдвічі) порівняно з мідними та платиновими, але більшу розбіжність характеристик від одного екземпляра до іншого.

Загальним недоліком є невисока швидкодія. Значення постійної часу таких елементів знаходиться в межах від десятків секунд до декількох хвилин.

Напівпровідникові термоперетворювачі опору зазвичай використовуються для вимірювання або контролю температури в інтервалі від мінус 100 до 300°C. Статичні характеристики (рис. 2.37) найчастіше нелінійні з позитивним або негативним ТКО.

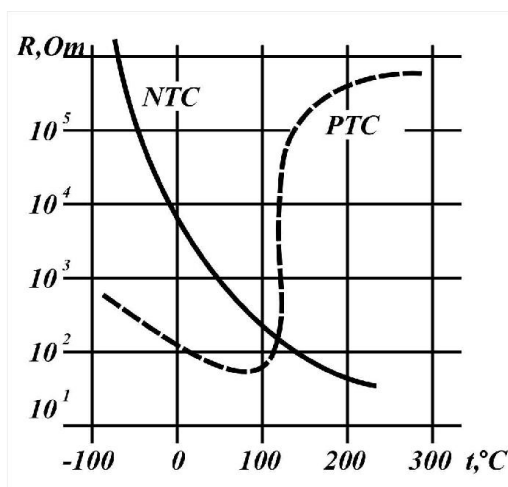


Рис. 2.37. Приклад типових статичних характеристик для терморезистивних перетворювачів з напівпровідників

Перевагами напівпровідникових термоперетворювачів опору є мала теплова інерція, високий початковий опір і ТКО (практично на порядок більший, ніж у металів). До недоліків відносять нелінійність статичних характеристик, слабку взаємозамінність через велику розбіжність номінального опору і ТКО. У зв'язку з цим напівпровідникові термоперетворювачі зазвичай використовуються в колах температурної компенсації і сигналізації, де не висуваються високі вимоги до точності вимірювання температури.

Термістори виготовляють із сумішей полікристалічних напівпровідникових оксидів металів магнію, марганцю, кобальту, нікелю. Суміші оксидів спікаються під тиском. Термістори випускаються у вигляді кілець, кульок, дисків. Технологія виготовлення дозволяє отримати високі значення питомого опору при малих розмірах, що забезпечує малу теплоємність і, як наслідок, малу інерційність термістора. Значення струму, що протікає через термістор, на порядок менше, ніж у металевих терморезисторах, що знижує похибку, викликану перегріванням термістора.

Для визначення параметрів і властивостей терморезисторів важливою є вольт-амперна характеристика, яка визначає залежність струму, що протікає через терморезистор, від прикладеної напруги до терморезистора за умови рівності тепла, що виділяється самим терморезистором від протікання струму і відводиться теплом у навколишній простір.

Оскільки питомий опір провідників прямо пропорційний температурі, а струм в електричному колі визначається законом Ома, то і вольт-амперна характеристика металевих терморезисторів буде лінійною.

Для напівпровідникових терморезисторів вольт-амперна характеристика нелінійна (рис. 2.38) і може мати декілька точок перегину.

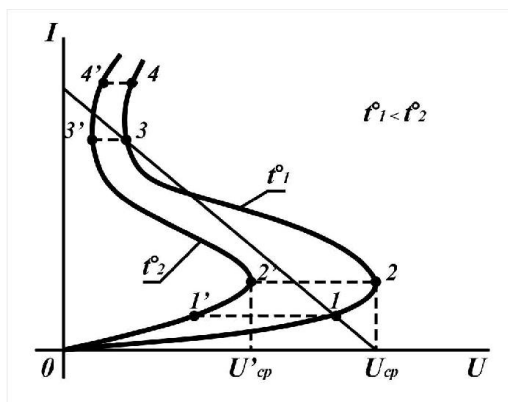


Рис. 2.38. Вольт-амперна характеристика напівпровідникового терморезистора

На початковій ділянці $0 - 1$ при малих значеннях напруги на терморезисторі дотримується тепловий баланс між виділеним і відведеним теплом, характеристика близька до лінійного закону. При подальшому збільшенні напруги виділення теплової енергії на терморезисторі збільшується, напівпровідник нагрівається, що призводить до зменшення опору і збільшення струму (ділянка $1 - 2$ на характеристиці), у точці 2 відбувається

лавиноподібний перехід з точки 2 в точку 3. Таким чином, це ділянка з негативним опором. Напруга, при якій відбувається такий перехід, називається напругою спрацьовування $U_{сп}$. При подальшому збільшенні напруги струм продовжує рости, але при цьому збільшується і падіння напруги на терморезисторі (ділянка 3 – 4).

При збільшенні температури навколишнього середовища відбувається зсув вольт-амперної характеристики до осі ординат. Таким чином, точки 1...4 зсуваються і перетворюються відповідно в точки 1'...4' при тих же значеннях струму через терморезистор. При цьому напруга спрацьовування $U'_{сп}$ зменшується.

Аналіз вольт-амперної характеристики напівпровідників показує, що можливе використання двох режимів роботи терморезистора. На ділянці 0 – 1 опір залежить тільки від температури навколишнього середовища, тобто як у терморезисторів з позитивним ТКО. Якщо вибрати режим роботи в точці 1, то при збільшенні температури навколишнього середовища вольт-амперна характеристика зміститься до осі ординат і відбудеться стрибок струму з точки 1 в точку 1'. При зниженні температури навколишнього середовища точка 1' повернеться в точку 1.

Для підключення терморезистивних первинних перетворювачів застосовують потенціометричну, чвертьмостову і квізінапівмостову вимірювальні схеми. Тип вимірювальної схеми безпосередньо впливає на чутливість, лінійність статичної характеристики, на величину похибки, яка виникає під впливом зовнішніх факторів. Подробиці викладені в розділі 2.4.

Слід зазначити, що на базі терморезистивних первинних перетворювачів можлива побудова різноманітних (за вимірювальною величиною) датчиків, вимірювальна величина яких буде попередньо перетворена в зміну температури.

Приклади:

1. Побудова швидкості потоку повітря або будь-якої рідини. Якщо терморезистор розмістити в трубопроводі й через нього пропустити достатньо великий струм, то терморезистор нагріється до певної температури. Швидкість потоку повітря (або рідини) визначатиме ступінь охолодження терморезистора, що, в свою чергу, буде приводити до відповідної зміни його опору.

2. Побудова датчика тиску в вакуумметрах. Якщо терморезистор розмістити в камері, у якій відбувається розрідження, і через нього пропустити достатньо великий струм, то він розігріється до певної температури. Від ступеня розрідження в камері буде залежати ступінь охолодження терморезистора, що, в свою чергу, буде приводити до відповідної зміни його опору.

2.5.3 Тензорезистивні перетворювачі

Первинні тензорезистивні перетворювачі є параметричними резистивними перетворювачами. Принцип дії таких перетворювачів заснований на тензоефекті й полягає в зміні активного опору чутливого елемента в

результаті його деформації під впливом зовнішньої сили. Основне призначення тензорезистивних перетворювачів – вимірювання деформацій і зусиль.

Опір провідника визначається виразом:

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (2.38)$$

де ρ – питомий опір матеріалу провідника; l – довжина провідника; S – площа поперечного перерізу провідника.

Вплив механічного зусилля на провідник призводить до його деформації – зміни його геометричних розмірів. На прикладі провідника круглого перетину (рис. 2.39) прикладена зусилля F призводить до зміни його довжини Δl і його діаметра Δd (на рисунку показано радіус Δr).

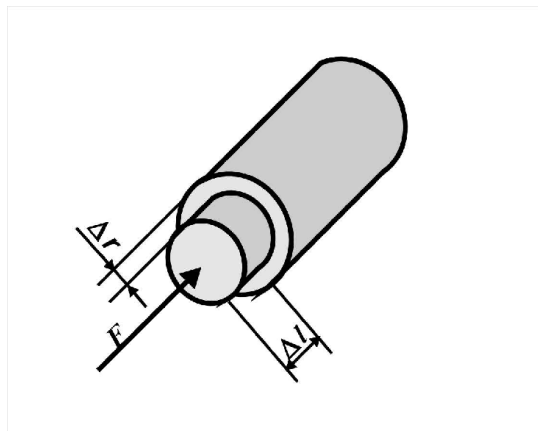


Рис. 2.39. Деформація провідника під впливом зовнішньої сили

Таким чином, з урахуванням виразу (2.38) очевидно, що вплив зовнішньої сили, прикладеної до провідника, приводить до зміни його активного опору.

Тензометричні перетворювачі характеризуються коефіцієнтом тензочутливості.

Коефіцієнт тензочутливості K_T – відношення відносної зміни опору провідника dR/R до його відносної деформації dl/l , тобто

$$K_T = \frac{dR/R}{dl/l} = m + 1 + 2\mu \quad (2.39)$$

де dR/R – відносний опір провідника; dl/l – відносна деформація провідника; μ – коефіцієнт Пуассона (відношення поперечної деформації до поздовжньої); m – величина, що характеризує зміну питомого опору матеріалу провідника від відносного подовження.

Статична характеристика тензорезистора (рис. 2.40) відображає залежність відносного опору тензорезистивного елемента від його відносної деформації.

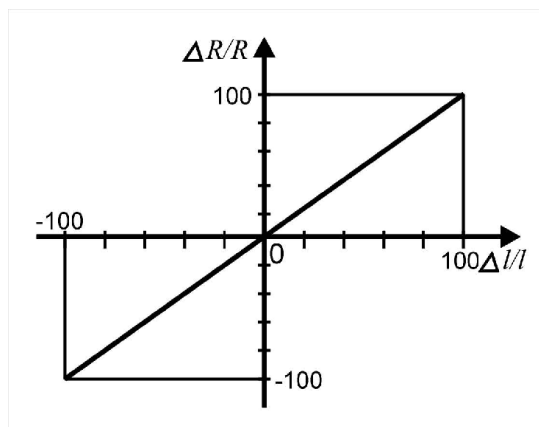


Рис. 2.40. Статична характеристика тензочутливого елемента

Величини на статичній характеристиці відносні (безрозмірні) і найчастіше вони виражаються в процентах.

Відповідно до ДСТУ21616-91 «Тензорезистори. Загальні технічні умови» для тензорезисторів встановлюють таку класифікацію:

- за матеріалом чутливого елемента:
 - металеві (провідникові), які залежно від виду (дріт, фольга) матеріалу чутливого елемента поділяють на дротяні та фольгові;
 - напівпровідникові;
- за кількістю чутливих елементів, їх формою і розташуванням на підкладці:
 - поодинокі тензорезистори;
 - тензорезисторні розетки;
 - мембранні тензорезисторні розетки;
 - тензорезисторні ланцюжки;
- за наявністю або відсутністю підкладки і матеріалу підкладки:
 - на паперовій основі;
 - на плівковій (клейовій, лаковій) підкладці;
 - на склотканинній підкладці;
 - на металевій підкладці;
 - з вільним чутливим елементом (без підкладки);
- за способом установлення на поверхню об'єкта:
 - приклеювані;
 - приварювані;
 - установлювані методом газоплазмового або плазмового напилення жаростійких оксидів;
- за діапазоном вимірюваних деформацій:
 - для вимірювання пружних деформацій (гранична вимірювана деформація в межах діапазону $\pm 3000 \text{ млн}^{-1}$);
 - для вимірювання пружно-пластичних деформацій (гранична вимірювана деформація за межами діапазону $\pm 3000 \text{ млн}^{-1}$);

- за наявності або відсутності термокомпенсації:
 - термокомпенсовані;
 - частково термокомпенсовані;
 - нетермокомпенсовані.

Конструктивно більшість тензорезисторів (рис. 2.41) являють собою підкладку 1, на якій розташована решітка тензочутливого елемента 2, матеріалом якої є метал (у вигляді дроту або фольги) або напівпровідник. Зверху решітка тензочутливого елемента покрита захисним шаром 3, з якого назовні виведені провідники для підключення 4.

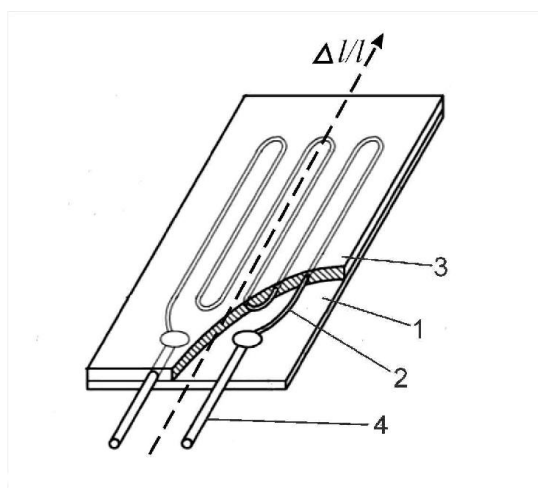


Рис. 2.41. Конструкція тензочутливого елемента

Основною конструктивною відмінністю є матеріал і спосіб виготовлення решітки тензочутливого елемента.

У дровому тензорезисторі тензочутливий елемент виготовлено з металевому дроту діаметром 0,02 ... 0,05 мм.

У фольговому тензорезисторі тензочутливий елемент виконано методом фотолітографії у вигляді металевій фольги товщиною близько 0,0035 мм. Фольгові тензорезистори мають безсумнівні переваги порівняно з дротяними. Перша – метод фотолітографії дозволяє створити решітку практично будь-якої конфігурації. Друга – опір таких тензорезисторів на порядок вище дротяних. Третя – практично відсутня чутливість до поперечної деформації за рахунок виготовлення з'єднань між поздовжніми нитками більшої ширини. Четверта – більш надійне зчеплення тензочутливого елемента з підкладкою.

У напівпровідниковому тензорезисторі тензочутливий елемент виконано з напівпровідникового матеріалу. Напівпровідникові тензорезистори, як і фольгові, мають такі переваги, як можливість створити решітку практично будь-якої конфігурації і відсутність чутливості до поперечної деформації. Основна перевага напівпровідникових тензорезисторів – високе значення коефіцієнта тензочутливості (у межах від 20 до 200). Обумовлено це значною зміною питомого опору матеріалу напівпровідника при деформації. До

недоліків напівпровідникових тензорезисторів слід віднести значну похибку, яка виникає при зміні температури навколишнього середовища.

Матеріалом для виготовлення дротяних і фольгових тензорезисторів є сплави різних металів. Компоненти, що входять до сплаву, і їх кількість визначають коефіцієнт тензочутливості (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Коефіцієнти тензочутливості деяких матеріалів

Матеріал тензорезистора	Хімічний склад, %	K_T
Константан	<i>Ni-45, Cu-55</i>	2,1
Карма	<i>Ni-74, Cr-20, Al-3, Fe-3</i>	2,0
Ізоеластик	<i>Ni-36, Cr-8, Mo-0.5, Fe-55.5</i>	3,6
Ніхром V	<i>Ni-80, Cr-20</i>	2,1
Платиновольфрам	<i>Pt-92, W-8</i>	4,0
Армюр Д	<i>Fe-70, Cr-20, Al-10</i>	2,0

Основними матеріалами для виготовлення напівпровідникових тензорезисторів на сьогодні є кремній і германій, причому кремній унаслідок його меншої чутливості до температури отримав більшого поширення. Застосовуються також напівпровідникові сполуки, наприклад, арсенід галію GaAs та ін.

У даний час промисловістю випускаються тензорезистори з різною формою решітки тензочутливого елемента (рис. 2.42). Форма решітки тензорезистора визначається напрямом і видом деформації (вигин, зсув, кручення, розтягування, стиснення) та вибирається в кожному конкретному випадку застосування тензорезисторів залежно від вирішуваної задачі.

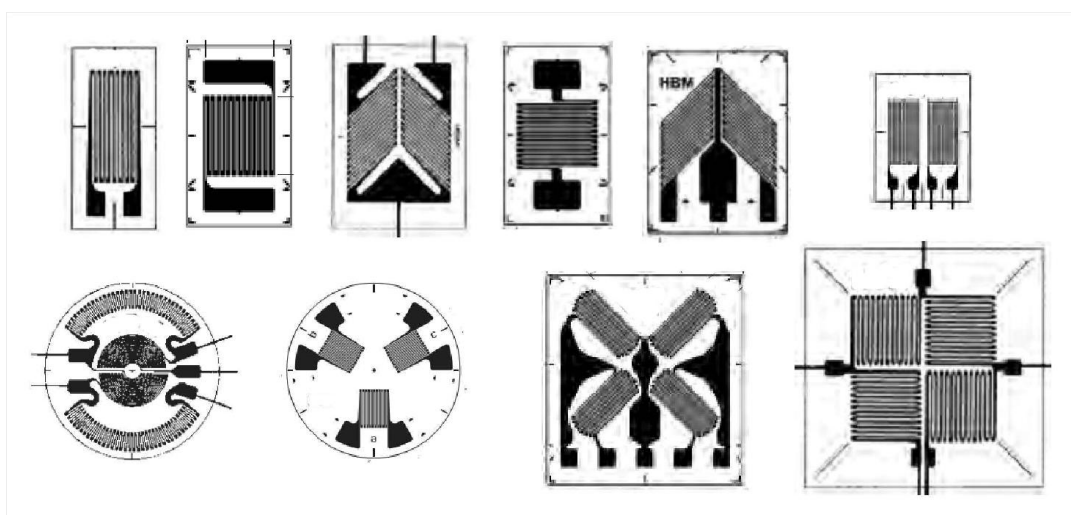


Рис. 2.42. Приклад різновидів решіток тензочутливих елементів

Для підключення тензорезистивних первинних перетворювачів застосовують вимірювальні схеми, такі як потенціометрична, чвертьмостова, напівмостова, квізінапівмостова і схема повного моста. Тип вимірювальної схеми безпосередньо впливає на чутливість, лінійність статичної

характеристики, на величину похибки, яка виникає під впливом зовнішніх факторів. Подробиці викладені в розділі 2.4. Найбільш поширеною вимірювальною схемою для тензометричних перетворювачів є схема повного моста, яка забезпечує найбільшу чутливість, лінійність характеристики в усьому діапазоні вимірювання і практично виключає вплив зовнішніх факторів.

Як уже відмічалось, основне призначення тензорезистивних перетворювачів – вимірювання деформацій і зусиль. Найпоширенішим практичним застосуванням є вимірювання ваги. Але слід зазначити, що на базі тензорезистивних первинних перетворювачів можлива побудова різноманітних (за вимірювальною величиною) датчиків, вимірювальна величина яких буде попередньо перетворена в деформацію або зусилля.

Приклади:

1. Побудова датчиків тиску з використанням гнучкої мембрани або манометричної трубки. Якщо тензорезистор (або декілька їх, розташованих певним чином) розмістити безпосередньо на мембрані або трубці, то при зміні тиску буде відбуватися їх деформація, що, в свою чергу, приведе до відповідної зміни опору тензорезистора.

2. Побудова датчиків вимірювання деформації. Це можуть бути різні матеріали або профілі, які знаходяться під дією певних зусиль. У таких випадках тензорезистори розташовують з двох боків відносно деформації контрольованого профілю.

3. Побудова датчиків силомірів з використанням принципу гнучкої затисненої консолі. Датчики такого типу використовують для вимірювання зусиль від 0 до 200 кН (200 кг).

2.5.4 Магніторезистивні перетворювачі

Первинні магніторезистивні перетворювачі є параметричними перетворювачами і призначені для вимірювання магнітних полів. У таких перетворювачах зміна магнітного поля, що впливає на чутливий елемент, призводить до зміни електричного опору перетворювача.

В основі магніторезистивних перетворювачів лежить магніторезистор і залежно від фізичного ефекту, на якому заснований принцип дії магніторезистора, розрізняють:

- магніторезистивні перетворювачі на ефекті Гаусса;
- анізотропні магніторезистивні перетворювачі;
- гігантські магніторезистивні перетворювачі;
- спін-тунельні магніторезистивні перетворювачі.

Перші два види отримали більш широке розповсюдження.

Магніторезистори на ефекті Гаусса

Ефект Гаусса полягає в зміні електричного опору магніточутливого матеріалу внаслідок викривлення траєкторії руху носіїв заряду під дією зовнішнього магнітного поля. Збільшення величини магнітного поля приводить до збільшення опору матеріалу чутливого елемента.

Як магніточутливий елемент використовуються напівпровідникові матеріали, тому що опір металевих провідників при впливі магнітного поля змінюється незначно. Причиною зміни опору напівпровідника при впливі магнітного поля є зміна траєкторії руху носіїв зарядів і, як наслідок, збільшення відстані, яку проходять заряди, що еквівалентно збільшенню питомого опору напівпровідника за рахунок зниження рухливості зарядів (рис. 2.43).

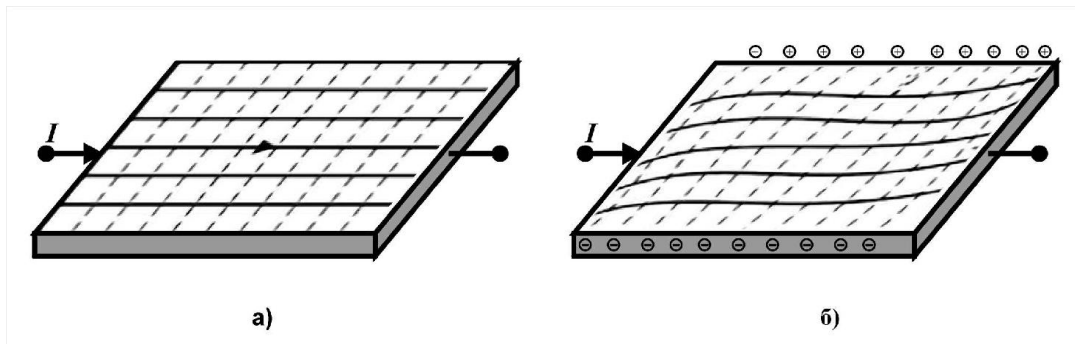


Рис. 2.43. Лінії струму та екіпотенціальні лінії в напівпровідниковому матеріалі: а – при відсутності магнітного поля; б – при наявності магнітного поля

Питомий опір напівпровідникового матеріалу при наявності зарядів двох знаків залежить від величини заряду електрона, а також концентрації та рухливості носіїв заряду (електронів і дірок). І це визначається виразом:

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (2.40)$$

де $n\mu_n$, $p\mu_p$ – концентрація і рухливість електронів і дірок відповідно; e – величина заряду електрона.

Залежність зміни опору напівпровідника від впливу магнітного поля визначається виразом:

$$R_B = R_0(1 + K\mu^2 B^2), \quad (2.41)$$

де R_0 – опір при відсутності впливу магнітного поля; K – константа, що залежить від форми магніторезистивного елемента; μ – рухливість носіїв заряду, значення якої обернено пропорційно питомому електричному опору і концентрації носіїв заряду; B – значення індукції магнітного поля.

З виразу (2.41) видно, що опір магніторезистора залежить від величини індукції за квадратичним законом і визначається властивостями напівпровідника і рухливістю зарядів.

Коефіцієнт K характеризується співвідношенням розмірів сторін магніторезистивного елемента (рис. 2.44). Чутливість магніторезистивного елемента максимальна в разі, коли мінімально відношення його довжини l до ширини w .

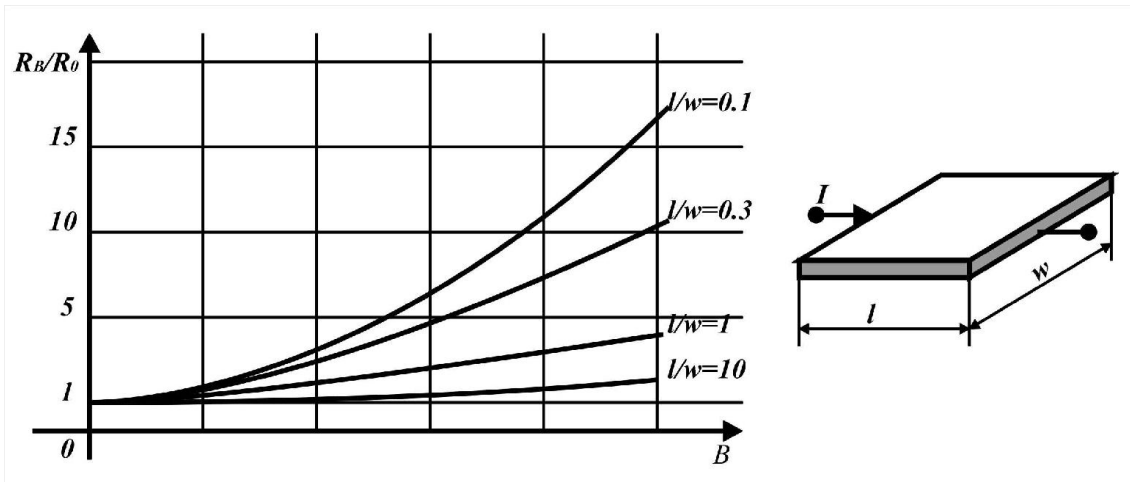


Рис. 2.44. Статична характеристика магніторезистивного перетворювача залежно від співвідношення розмірів сторін магніточутливого елемента

Під впливом зовнішнього магнітного поля в напівпровіднику виникають як ефект Гауса, так і ефект Холла. Однак, якщо ширина напівпровідника більше його довжини, то заряди слабо формують різницю потенціалів на боках пластини, тобто ЕРС Холла слабшає.

Для збільшення опору магніточутливого елемента зі збереженням високої чутливості магніторезистор виготовляють у вигляді послідовно з'єднаних напівпровідникових елементів 1, які розділені струмопровідними шарами 2 (рис. 2.45).

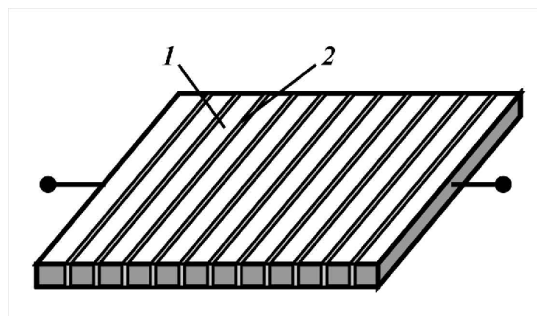


Рис. 2.45. Конструкція магніточутливого елемента підвищеного опору

Дана конструкція дозволяє отримати максимальну чутливість, високий опір і практично звести до нуля ЕРС Холла. Для шунтування ЕРС Холла також додатково застосовується легування напівпровідникових елементів атомами фосфору.

Більшість магніторезисторів на ефекті Гауса дозволяє вимірювати постійні та змінні магнітні поля частотою до 1 МГц в діапазоні від 1 мТл до 1 Тл в діапазоні робочих температур від мінус 40 до 110°C. Температурний коефіцієнт чутливості типового датчика на ефекті Гауса варіюється від 2 до 0,02 %/°C.

Перевагами магніторезисторів на ефекті Гауса є малі габарити і низька вартість. До недоліків відносять – відносно невисоку чутливість, нелінійність характеристики перетворення, високу залежність від температури, зміну чутливості магніторезистивного елемента при зміні кута між вектором магнітної індукції і площиною елемента.

Магніторезистори на анізотропному ефекті

Анізотропні магніточутливі перетворювачі засновані на анізотропному магніторезистивному ефекті, який є прямим наслідком спин-орбітальної взаємодії в феромагнітних провідниках і полягає в зміні електричного опору феромагнітного провідника залежно від зміни кута α між струмом I , що протікає, і вектором намагніченості M (рис. 2.46).

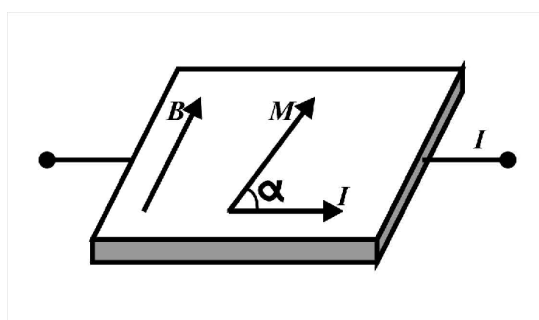


Рис. 2.46. Принцип анізотропного магніторезистивного ефекту

Зовнішнє магнітне поле B повертає вектор намагніченості M на кут α і змінює електричний опір відповідно до формули Фойгта – Томпсона:

$$R_B = R_0 + \Delta R (\cos \alpha)^2, \quad (2.42)$$

де R_0 – опір при відсутності впливу магнітного поля; ΔR – максимальна зміна опору; α – кут повороту вектора намагніченості.

З виразу (2.42) очевидно, що опір не залежить від величини напруженості магнітного поля, а є тільки функцією кута α . Причому куту α величиною 90° відповідає мінімальний опір, а куту α величиною 0° (у відсутність магнітного поля) – максимальне значення опору, що дорівнює базовому опору R_0 (рис. 2.47).

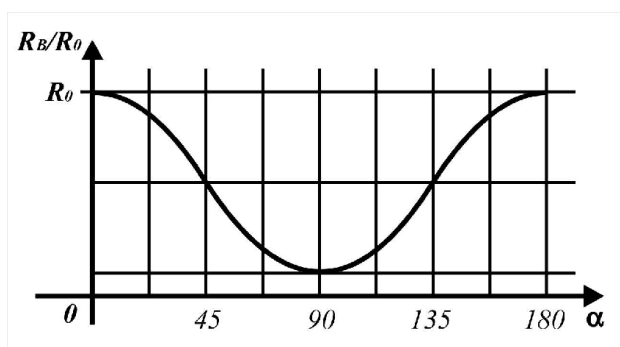


Рис. 2.47. Статична характеристика анізотропного магніторезистора

З виразу (2.42) випливає також, що залежність опору від величини вимірюваного магнітного поля носить нелінійний характер. Для вирішення даної проблеми в анізотропних магніточутливих елементах використовують структуру, у якій алюмінієві смуги напильюють на пермалойові під кутом 45° (рис. 2.48), тим самим змінюючи напрямок струму на 45° і роблячи функцію перетворення близькою до лінійної.

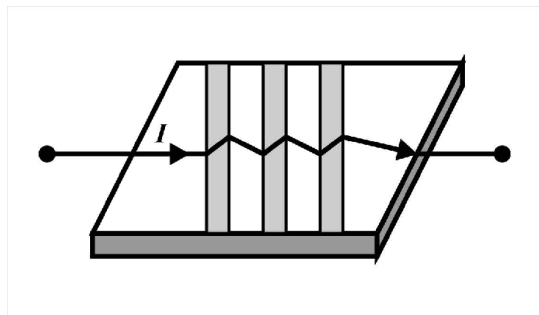


Рис. 2.48. Конструкція анізотропного магніторезистора з корекцією нелінійності функції перетворення

Більшість анізотропних магніторезисторів дозволяють вимірювати постійні та змінні магнітні поля з частотою до 10 МГц в діапазоні від 10 нТл до 1 мТл, при цьому рівень власних шумів на рівні 10 нТл/Гц. Нелінійність перетворення на рівні 0,1 %, робочий діапазон температур від мінус 55°C до 200°C . Типові значення температурного коефіцієнта чутливості від 0,25 до 0,01 %/ $^\circ\text{C}$, температурного коефіцієнта зсуву – близько 10 нТл/ $^\circ\text{C}$.

Перевагами анізотропних магніторезисторів є наявність осі чутливості, відсутність залежності від магнітного дрейфу і можливість роботи в широкому діапазоні температур. До недоліків слід віднести низьку порогову чутливість і високий рівень власного шуму.

Для підключення магніторезистивних первинних перетворювачів застосовують вимірювальні схеми, такі як потенціометричну, чвертьмостову і схему повного моста. Тип вимірювальної схеми безпосередньо впливає на чутливість, лінійність статичної характеристики, на величину похибки, яка виникає під впливом зовнішніх факторів. Подробиці викладені в розділі 2.4.

Прямим призначенням магніторезистивних перетворювачів є вимірювання величини і напрямку індукції магнітного поля. Але слід зазначити, що на базі магніторезистивних первинних перетворювачів можлива побудова різноманітних (за вимірювальною величиною) датчиків, вимірювальна величина яких буде попередньо перетворена в величину або напрямок магнітної індукції.

Приклади:

1. Побудова датчика положення (безконтактного кінцевого вимикача), якщо в певному положенні розташувати датчик з магніторезистивним елементом і постійний магніт так, щоб магнітне поле діяло на датчик, а на механізм, положення якого контролюється, закріпити маркер з феромагнітного матеріалу (наприклад залізна пластина). У разі, коли механізм займе відповідне

положення (коли маркер перекриє магнітний потік від магніту до магніторезистора), відбудеться зміна вихідного сигналу датчика (зміна величини магнітної індукції призводить до зміни опору магніторезистивного перетворювача).

2. Побудова датчика швидкості обертального руху, якщо на валу прикріпити з феромагнітного матеріалу диск з отворами, розташованими по колу, а по різні боки диска – магніт і датчик з магніторезистивним перетворювачем. При обертанні диска магнітний потік від магніту до датчика буде періодично змінюватися (проходить через отвір і не проходить безпосередньо через диск). Ця зміна супроводжуватиметься зміною опору магніторезистора, що буде викликати відповідну зміну вихідного сигналу датчика. Частота зміни сигналу при цьому буде прямо пропорційна швидкості обертання диска.

Сучасні магніторезистивні датчики являють собою пристрій, який інтегрує в собі досягнення сучасної мікроелектроніки, інтегральних магніточутливих елементів і мікротехнологій. Вони містять чутливі до магнітного поля елемент і схему перетворення електричного сигналу, які виготовлені з використанням інтегральної технології та об'єднані загальним корпусом.

Наприклад, в автомобільній електроніці датчики з магніторезистивними первинними перетворювачами використовують для контролю кута положення двірників, рульового колеса, валу газорозподільного механізму, дросельної заслінки, педалі газу, нахилу сидіння.

2.5.5 Фоторезистивні перетворювачі

Первинні фоторезистивні перетворювачі є параметричними перетворювачами і призначені для вимірювання інтенсивності світлового потоку. В таких перетворювачах зміна інтенсивності світлового потоку, що впливає на чутливий елемент, призводить до зміни електричного опору перетворювача.

В основі фоторезистивних перетворювачів – фоторезистор і його принцип дії, заснований на внутрішньому або зовнішньому фотоефекті.

Внутрішній фотоефект полягає в зміні концентрації носіїв зарядів у речовині під впливом зовнішнього світлового випромінювання, що призводить до зміни електропровідності речовини. Зовнішній – у виведенні носіїв зарядів (електронів) на поверхню речовини під впливом зовнішнього світлового випромінювання, що також змінює електропровідність речовини.

Зазвичай, фоторезистор (рис. 2.49) являє собою пластмасовий корпус 1, у якому розташовано світлочутливий елемент 2 і зроблені виводи для електричного під'єднання 3. Світлочутливий елемент вкрито прозорим до світлового випромінювання захисним шаром. Залежно від вимірюваного світлового потоку це може бути скло, кварцове скло, різноманітні полімерні матеріали. У ряді випадків для забезпечення спрямованості чутливості

фоторезистора захисний шар світлочутливого елемента може бути виконаний у вигляді лінзи.

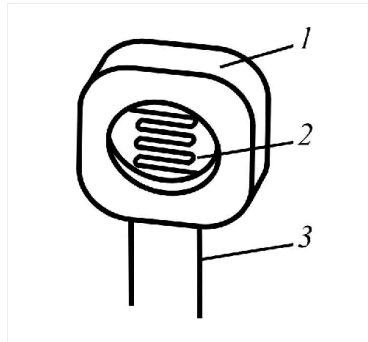


Рис. 2.49. Конструкція фоторезистора

Світлочутливий елемент являє собою підкладку з діелектричного матеріалу, на який нанесено шар світлочутливого матеріалу. Зазвичай цей шар виготовляють у вигляді зигзагоподібного провідника з метою підвищення опору фоторезистора практично зі збереженням площі світлочутливого елемента.

Як світлочутливий матеріал використовується селен, телур, германій, кремній, сульфід вісмуту, свинцю, телуру, кадмію та інші. Найчастіше застосовується сірчисто-свинцеві, сірчисто-вісмутіві, сірчисто-кадмієві та селено-кадмієві матеріали. Сірчистий свинець чутливий до інфрачервоних променів, а сірчистий кадмій – до видимих променів.

За відсутності світлового потоку Φ фоторезистор має великий опір R_T , який називається темновим. Цей опір є одним з основних параметрів фоторезистора. Відповідно струм, який проходить через фоторезистор, називається темновим струмом, він описується формулою

$$I_T = \frac{U_0}{R_T}, \quad (2.43)$$

де U_0 – напруга живлення фоторезистора; R_T – темновий опір фоторезистора.

Під дією світлового потоку в світлочутливому матеріалі фоторезистора збільшується кількість вільних носіїв заряду, що призводить до збільшення провідності (зменшення опору) матеріалу і, як наслідок, до відповідної зміни струму через фоторезистор. Величину цього струму називають світловим струмом, він визначається формулою

$$I_c = \frac{U_0}{R_c}, \quad (2.44)$$

де R_c – світловий опір фоторезистора.

Різниця світлового і темного струмів отримала назву первинного фотоструму, тобто

$$I_\phi = I_c - I_T \quad (2.45)$$

Питома чутливість фоторезистора – відношення фотоструму до добутку величини падаючого на фоторезистор світлового потоку і прикладеної напруги до фото резистора, отже,

$$K_0 = \frac{I_\Phi}{\Phi U_0} \quad (2.46)$$

де I_Φ – величина фотоструму фоторезистора; U_0 – прикладена напруга до фоторезистора; Φ – величина світлового потоку, діючого на фоторезистор.

Статична характеристика фоторезистора відображає залежність опору фоторезистора від інтенсивності світлового потоку. Типова характеристика (рис. 2.50) має досить лінійний характер і тільки при значному рості величини світлового потоку набуває нелінійного характеру, який обумовлено насиченням носіями заряду світлочутливого елемента.

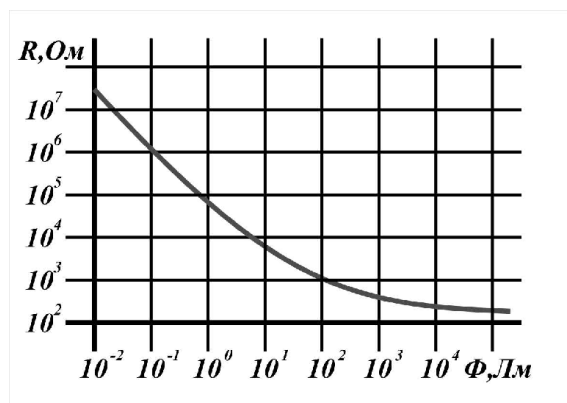


Рис. 2.50. Типова статична характеристика фоторезистора

На практиці частіше як статична характеристика фоторезистора наводиться його вольт-амперна характеристика (ВАХ).

Основними характеристиками фоторезистивних перетворювачів є вольт-амперна, світлова і спектральна характеристики.

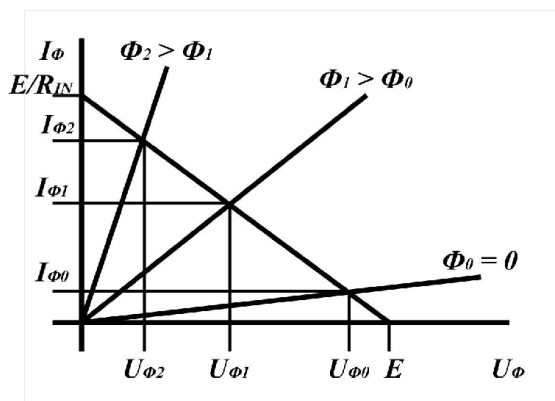


Рис. 2.51. Вольт-амперна характеристика фоторезистора

Вольт-амперна характеристика фоторезистора – залежність фотоструму через фоторезистор I_{Φ} від прикладеної напруги до фоторезистора U_0 при постійному значенні світлового потоку Φ і незмінному спектральному складі світлового потоку λ (рис. 2.51).

Для фоторезисторів ця залежність практично лінійна. Лінійність порушується тільки при значному підвищенні напруги, прикладеної до фоторезистора.

На ВАХ фоторезистора видно, що при відсутності світлового потоку $\Phi_0 = 0$ через фоторезистор протікає темновий струм $I_T = I_{\Phi 0}$, при цьому фоторезистор має великий опір і тому на ньому відбувається значне падіння напруги $U_{\Phi 0}$. Якщо на фоторезистор направити світловий потік (наприклад величиною Φ_1), то його опір зменшиться, а це призведе до збільшення струму через фоторезистор (в нашому прикладі до величини $I_{\Phi 1}$) і падіння напруги на фоторезисторі зменшиться певним чином (в нашому прикладі до величини $U_{\Phi 1}$).

Світлова (люкс-амперна) характеристика визначає залежність фотоструму I_{Φ} від величини падаючого світлового потоку Φ постійного спектрального складу λ . Напівпровідникові фоторезистори мають нелінійну люкс-амперну характеристику (рис. 2.52, а).

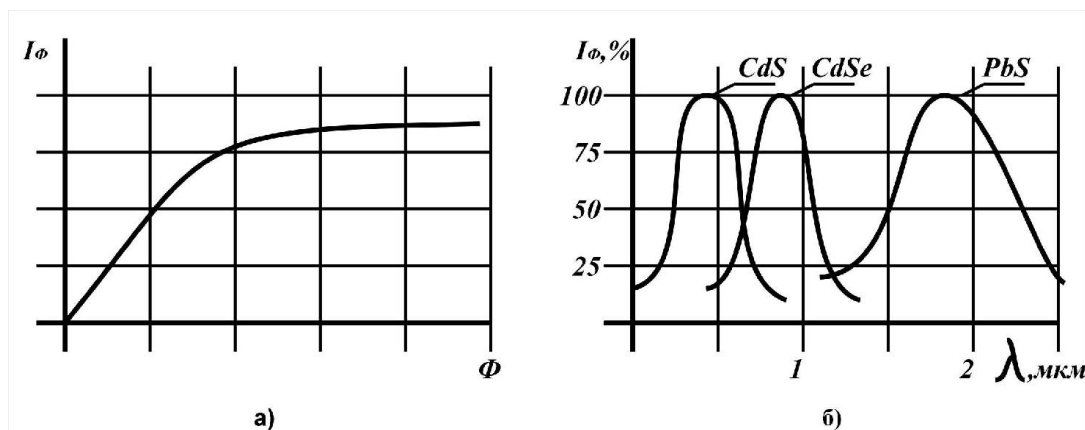


Рис. 2.52. Характеристики фоторезистора:
а – люкс-амперна характеристика; б – спектральна характеристика

Найбільша чутливість виходить при малій освітленості. Це дозволяє використовувати фоторезистори для вимірювання випромінювань дуже малої інтенсивності. При збільшенні освітленості світловий струм зростає приблизно пропорційно кореню квадратному з освітленості. Нахил кривої люкс-амперної характеристики залежить від прикладеної до фоторезистора напруги.

Спектральна характеристика відображає залежність фотоструму фоторезистора I_{Φ} від спектрального складу світлового потоку λ , який діє на фоторезистор при постійній величині інтенсивності світлового потоку Φ . Вона залежить від властивостей матеріалу світлочутливого елемента (рис. 2.52, б).

Спектральна область застосування фоторезистора визначається його спектральною характеристикою, тобто матеріалом світлочутливого елемента (рис. 2.53).

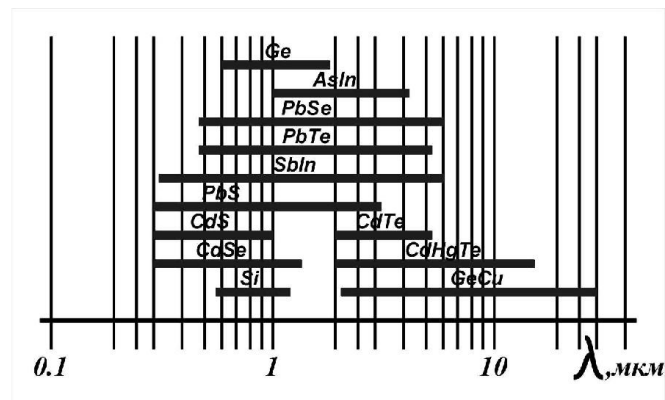


Рис. 2.53. Спектральна область застосування фоторезисторів залежно від матеріалу світлочутливого елемента

Для підключення фоторезистивних первинних перетворювачів застосовують потенціометричну, чвертьмостову, квізінапівмостову вимірювальні схеми. Тип вимірювальної схеми безпосередньо впливає на чутливість і лінійність статичної характеристики та на величину похибки, яка виникає під впливом зовнішніх факторів. Подробиці викладені в розділі 2.4.

Як уже відмічалось, основне призначення фоторезистивних перетворювачів – вимірювання інтенсивності світлового потоку. Найпоширенішим практичним застосуванням є вимірювання інтенсивності світлового потоку і його спектральний аналіз. Але слід зазначити, що на базі фоторезистивних первинних перетворювачів можлива побудова різноманітних (за вимірювальною величиною) датчиків, вимірювальна величина яких буде попередньо перетворена в інтенсивність світлового потоку або в зміну спектру світлового потоку.

Приклади:

1. Побудова датчиків вимірювання температури великих значень. За допомогою вимірювання інтенсивності інфрачервоного випромінювання і його спектрального аналізу реалізуються датчики дистанційного вимірювання температури (без безпосереднього контакту первинного перетворювача з середовищем, температуру якого вимірюють), що особливо актуально при температурах, які перевищують температуру плавлення матеріалів, з яких виготовляється датчик. Наприклад вимірювання температури металу, що виплавляється.

2. Побудова датчиків положення або переміщення об'єкту, що підлягає контролю. Наприклад проходження людиною турнікету в метро. Датчик такого типу в своєму складі має як світлочутливий елемент (наприклад фоторезистор), так і джерело світлового випромінювання (наприклад світлодіод або лампа розжарювання). Перекриття об'єктом світлового променя призводить до зміни

світлового потоку, який потрапляє на фоторезистор, що в свою чергу викликає зміну опору фоторезистора.

3. Побудова датчиків для контролю процесу горіння – наприклад у газовому котлі. Процес горіння супроводжується випромінюванням інфрачервоного спектру. Вимірювання цього випромінювання дозволяє створити датчик для реалізації функції захисного закриття подачі газу в разі погасання полум'я.

2.5.6 Ємнісні перетворювачі

Первинні ємнісні перетворювачі є параметричними перетворювачами. У таких перетворювачах зміна контрольованої фізичної величини призводить до зміни ємнісного опору перетворювача (ємності чутливого елемента).

Величина ємності конденсатора визначається виразом:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (2.47)$$

де ϵ_0 – діелектрична постійна, що дорівнює $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ϵ – відносна діелектрична проникність між обкладинками конденсатора; S – площа обкладинок конденсатора; d – відстань між обкладинками конденсатора.

Таким чином, принцип дії ємнісних первинних перетворювачів може бути реалізований на зміні:

- площі перекриття обкладинок конденсатора;
- відстані між обкладинками конденсатора;
- діелектричності між пластинами конденсатора.

Принцип дії ємнісного первинного перетворювача *на зміні площі перекриття обкладинок* конденсатора полягає в зміні площі перекриття обкладинок конденсатора за рахунок того, що одна обкладинка нерухома, а друга переміщується паралельно першій під впливом зовнішнього фактора (рис. 2.54, а).

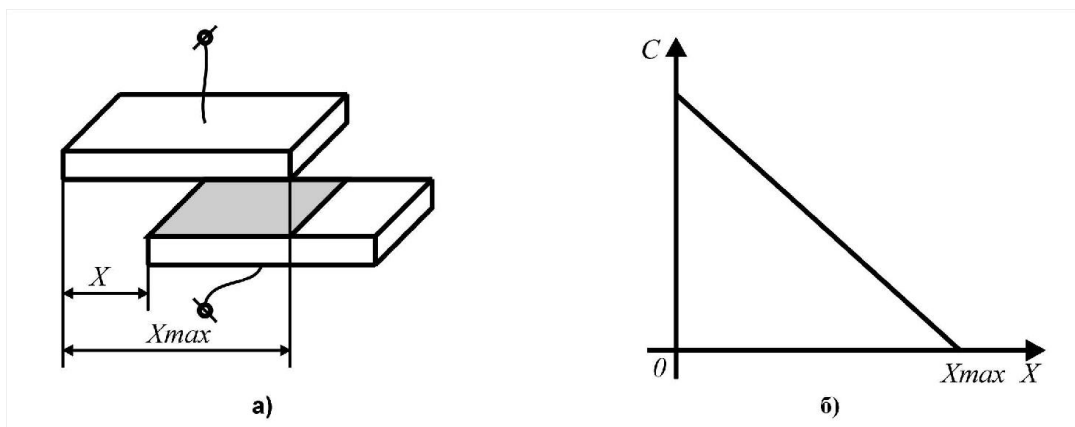


Рис. 2.54. Ємнісний первинний перетворювач на принципі зміни площі перекриття обкладинок:
а – принцип дії; б – статична характеристика

Діелектрична проникність і відстань між обкладинками величини постійні. Площа перекриття S (на рисунку виділена темним кольором) лінійно залежить від величини переміщення X . Відповідно до виразу (2.47) залежність ємності C від переміщення X також буде лінійна (рис. 2.54, б).

На основі ємнісних первинних перетворювачів за принципом зміни площі перекриття обкладинок конденсатора будуються датчики лінійних переміщень і безліч інших, у яких вимірювана величина попередньо може бути перетворена на величину лінійного переміщення.

Принцип дії ємнісного первинного перетворювача *на зміні відстані між обкладинками* конденсатора полягає в зміні відстані між обкладинками конденсатора за рахунок того, що одна обкладинка нерухома, а друга переміщається перпендикулярно до першої під впливом зовнішнього фактора (рис. 2.55, а).

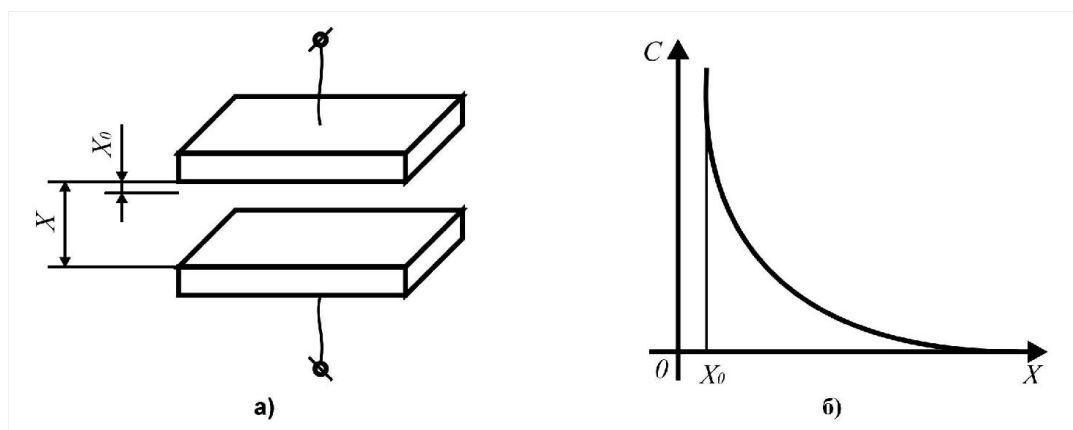


Рис. 2.55. Ємнісний перетворювач на принципі зміни відстані між обкладинками: а – принцип дії; б – статична характеристика

Діелектрична проникність середовища між обкладинками і площа перекриття обкладинок величини постійні. Відстань між обкладинками d фактично є величиною переміщення X . Відповідно до виразу (2.47) залежність ємності C від переміщення X буде мати зворотну залежність (рис. 2.55, б). Причому відстань між обкладинками не може дорівнювати нулю, мінімальне значення X_0 зумовлено напругою пробоя середовища між обкладинками.

На основі ємнісних первинних перетворювачів за принципом зміни відстані між обкладинками конденсатора будуються датчики лінійних переміщень і безліч інших, у яких вимірювана величина попередньо може бути перетворена на величину лінійного переміщення.

Принцип дії ємнісного первинного перетворювача *на зміні діелектричної проникності середовища* між обкладинками конденсатора полягає в зміні діелектричної проникності середовища між обкладинками конденсатора за рахунок повної або часткової її зміни під впливом зовнішнього фактора. Ця зміна може бути викликана, наприклад, заповненням простору між

обкладинками речовиною з іншою діелектричною проникністю або ж переміщенням діелектричної пластини між обкладинками конденсатора (рис. 2.56, а).

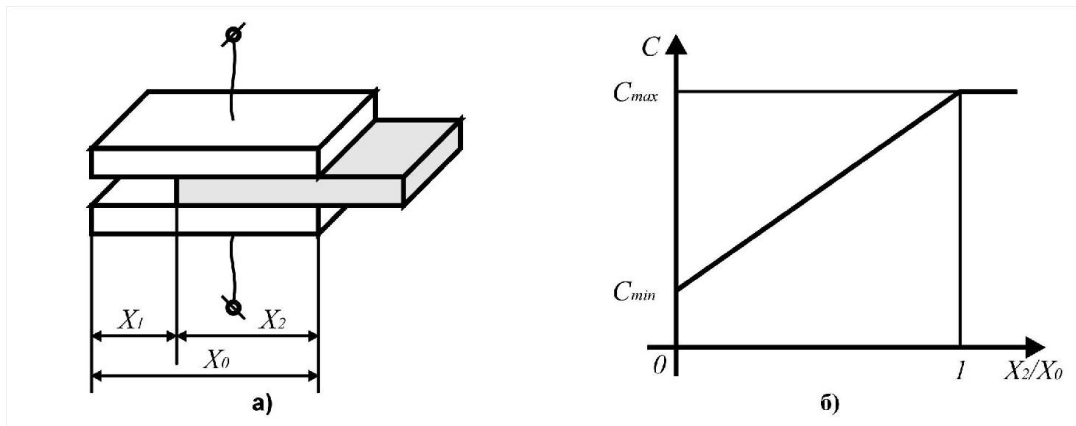


Рис. 2.56. Ємнісний первинний перетворювач на принципі зміни діелектричної проникності між обкладинками: а – принцип дії; б – статична характеристика

У даному випадку відстань між обкладинками та площа перекриття обкладинок – величини постійні, змінюється лише результуюче значення діелектричної проникності. Воно визначається співвідношенням діелектричної проникності в області X_1 і X_2 . У цьому разі ємність можна подати еквівалентом двох конденсаторів C_1 і C_2 , що підключені паралельно. Ємність для даних конденсаторів відповідно до виразу (2.47) буде визначатися як:

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S_1}{d}; \quad (2.48)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S_2}{d}; \quad (2.49)$$

При паралельному з'єднанні ємність конденсаторів визначається так:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S_1}{d} + \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S_2}{d}. \quad (2.50)$$

Після перетворень вираз набуде вигляду:

$$C = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_1 (S_0 - S_2) + \epsilon_2 S_2)}{d}. \quad (2.51)$$

Виходячи з уже розглянутого раніше, площа перекриття S лінійно залежить від величини переміщення X . Статична характеристика буде лінійною. І якщо діелектрична проникність в області X_2 більша, ніж в області X_1 , то характеристика буде позитивною (рис. 2.30, б). Причому, якщо X_2 дорівнює X_0 (діелектрична пластина повністю введена), ємність буде набувати максимального значення, а якщо X_2 дорівнює нулю (діелектрична пластина повністю виведена) – мінімального значення.

На основі ємнісних первинних перетворювачів за принципом зміни діелектричної проникності між обкладинками конденсатора будуються датчики лінійних переміщень і безліч інших, у яких вимірювана величина попередньо може бути перетворена на величину лінійного переміщення або викликає зміну діелектричної проникності. Наприклад побудова датчика вологості.

Для підключення ємнісних первинних перетворювачів застосовують такі вимірювальні схеми: потенціометричну, диференційну, чвертьмостову, напівмостову, квазінапівмостову і схему повного моста. Тип вимірювальної схеми безпосередньо впливає на чутливість і лінійність статичної характеристики та на величину похибки, яка виникає під впливом зовнішніх факторів. Подобиці викладені в розділі 2.4.

Тут слід звернути увагу на те, що диференціальні вимірювальні схеми передбачають попарне використання первинних перетворювачів. І в даному випадку можливе використання звичайних ємнісних перетворювачів і спеціальних ємнісних перетворювачів, які конструктивно поєднують два ємнісних перетворювачі (рис. 2.57).

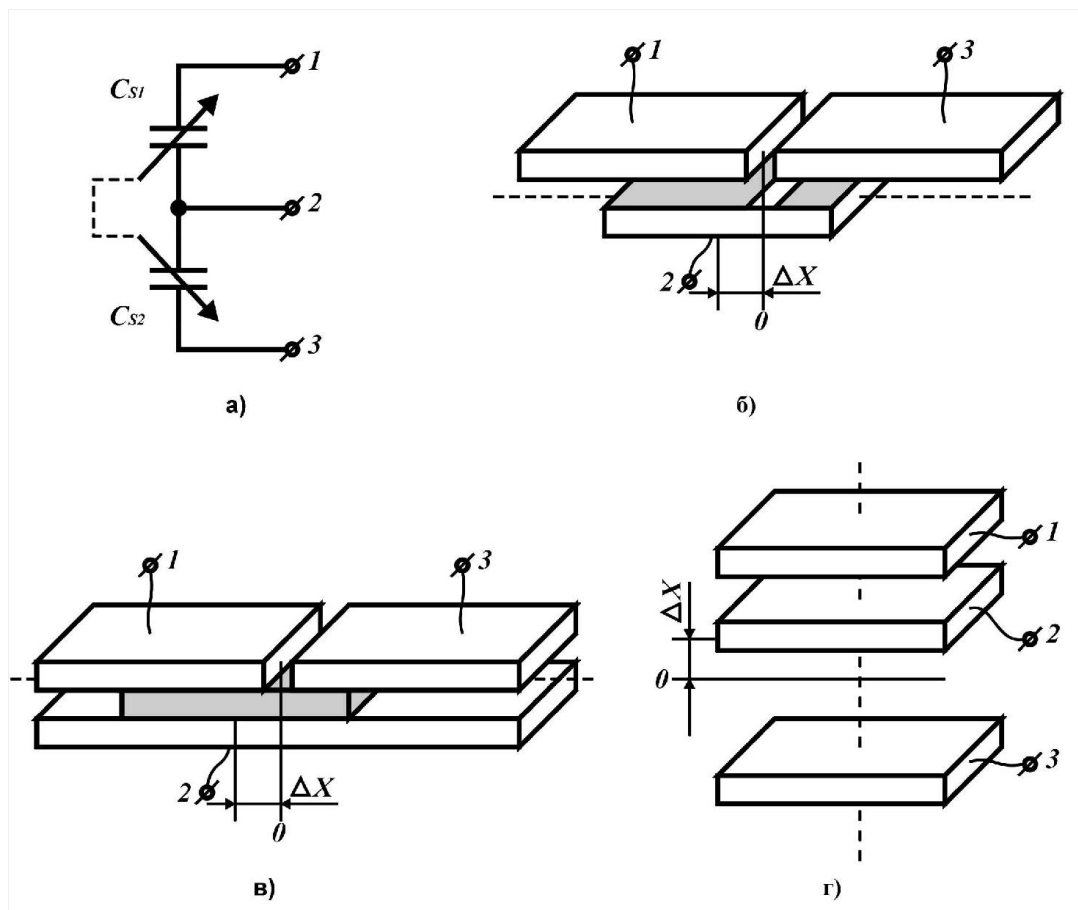


Рис. 2.57. Диференціальний ємнісний первинний перетворювач:
а – електрична схема; б – на принципі зміни площі перекриття обкладинок; в – на принципі зміни діелектричної проникності між обкладинками; г – на принципі зміни діелектричної проникності між обкладинками

Конструктивні особливості наведених перетворювачів: по-перше – у початковому стані $\Delta X = 0$ ємність обох конденсаторів однакова; по-друге – переміщення ΔX одночасно викликає збільшення ємності одного конденсатора і зменшення другого.

На базі ємнісних перетворювачів можлива побудова різноманітних датчиків, якщо вимірювана величина безпосередньо пов'язана з діелектричною проникністю або попередньо буде перетворена в переміщення.

Приклади:

1. Побудова датчиків тиску газоподібних речовин за допомогою ємнісного перетворювача за принципом зміни діелектричної проникності. Зміна тиску призводить до зміни кількості молекул речовини в одиниці об'єму, що в свою чергу змінює діелектричну проникність речовини. Дана методика широко використовується для вимірювання тиску при розрідженні (зменшення тиску нижче атмосферного).

2. Побудова датчиків вологості газоподібних і сипучих речовин за допомогою ємнісного перетворювача за принципом зміни діелектричної проникності. Зміна вологості призводить до зміни пропорції молекулярного складу речовини в одиниці об'єму, що в свою чергу змінює діелектричну проникність речовини.

3. Побудова датчиків вимірювання товщини виробу, наприклад товщини паперу. Якщо папір проходить між обкладинками ємнісного датчика, то діелектрична проникність буде залежати від товщини паперу, оскільки величина зазору між обкладинками постійна, а діелектрична проникність буде визначатися співвідношенням товщини паперу і повітря.

4. Побудова датчиків рівня рідини або сипучих речовин у резервуарах. Якщо обкладинки ємнісного перетворювача будуть розташовані на бокових поверхнях резервуара, то при зміні рівня буде відбуватися зміна діелектричної проникності, що буде призводити до зміни ємності первинного перетворювача.

2.5.7 Індуктивні перетворювачі

Первинні індуктивні перетворювачі є параметричними перетворювачами. В таких перетворювачах зміна контрольованої фізичної величини призводить до зміни індуктивного опору перетворювача (індуктивності чутливого елемента). Основне застосування – вимір лінійного або кутового переміщення.

Частіше всього індуктивний перетворювач складається з магнітопроводу у вигляді осердя з двох частин – рухомої (якір) та нерухомої, на якій розташована котушка індуктивності. Вхідна величина x змінює взаємне розташування котушки та якоря. При цьому змінюється індуктивність котушки L і, як наслідок, її повний опір Z .

Нагадаємо, що індуктивність – це величина, яка характеризує магнітні властивості електричного кола. По суті, це коефіцієнт пропорційності між струмом і напруженістю магнітного поля. Чим вище значення індуктивності, тим більше буде напруженість магнітного поля при одному і тому ж значенні електричного струму.

Загальна конструкція індуктивного перетворювача на одному осерді (рис. 2.58) складається з магнітного осердя 1, на якому розташована обмотка котушки 2 і якоря 3. Якір може переміщуватись відносно осердя і пов'язаний механічно з механізмом, рух якого вимірюється. Обмотка 2 живиться від джерела змінної напруги і створює в осерді 1 магнітний потік Φ , що замикається через якір 3.

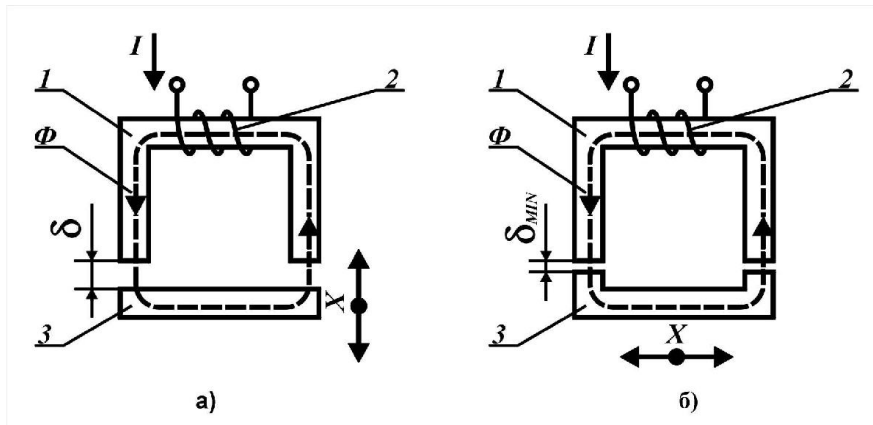


Рис. 2.58. Індуктивний перетворювач:
а – на принципі зміни величини повітряного зазору осердя;
б – на принципі зміни активної площі осердя

Конструктивно найбільш поширені два різновиди індуктивних перетворювачів на одному осерді. Перший – на принципі зміни повітряного зазору магнітного осердя δ (рис. 2.58, а), другий – на принципі зміни активної площі магнітного осердя S_M (рис. 2.58, б).

Індуктивність котушки перетворювача зі змінним повітряним зазором без урахування розсіяння магнітного потоку визначається виразом:

$$L = \frac{W^2}{Z_M} = \frac{W^2}{\sqrt{(R_M + R_\delta)^2 + X_M^2}} \quad (2.52)$$

де W – число витків котушки; Z_M – повний опір магнітного кола; R_M і X_M – активна та реактивна складові магнітного опору магнітопроводу; R_δ – магнітний опір повітряного проміжку.

Враховуючи, що осердя, виготовлені з тонколистового пермалою або фериту, мають дуже мале значення втрат на вихрові струми, реактивною складовою магнітного опору можна знехтувати. Крім того, використання феритів з вузькою петлею перемагнічування дозволяє знехтувати й активною складовою на перемагнічування. Цей аналіз показує, що магнітний опір в основному визначається магнітним опором повітряного зазору, тобто

$$R_\delta = \frac{2\delta}{\mu_0 S_\delta} \quad (2.53)$$

Цей опір пропорційний подвійній довжині повітряного зазору δ , оскільки магнітний потік проходить через нього двічі. Таким чином, для плоско паралельних повітряних зазорів магнітний опір прямо пропорційний подвійній величині повітряного зазору δ та обернено пропорційний площі повітряного зазору S_δ . Зі збільшенням повітряного зазору магнітний опір збільшується, а індуктивність, індуктивний і повний опір зменшуються.

Наведені припущення дають можливість звести вираз (2.52) до такого вигляду:

$$L = \frac{W^2}{2R_\delta} = \frac{W^2}{2\delta} \mu_0 S_\delta \quad (2.54)$$

З іншого боку, індуктивність обмотки з числом витків W визначається виразом

$$L = \frac{W \Phi}{I} \quad (2.55)$$

А магнітний потік осердя з урахуванням (2.53) буде визначатися виразом:

$$\Phi = \frac{IW}{R_\delta} = \frac{IW}{2\delta} \mu_0 S_\delta \quad (2.56)$$

Практично весь магнітний потік проходить через повітряний зазор (не беручи до уваги потоки розсіяння).

Якщо (2.56) підставити у (2.55), то значення індуктивності набуде вигляду (2.54), а індуктивний опір обмотки буде визначатися виразом:

$$X_L = \omega L = \frac{\omega W^2}{2\delta} \mu_0 S_\delta \quad (2.57)$$

Повний опір котушки перетворювача Z має дві складові – активну R та реактивну X_L . У загальному випадку, відповідно до закону Ома для електричного кола змінного струму, струм у котушці визначається виразом:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (2.58)$$

Індуктивні перетворювачі виконуються таким чином, щоб активний опір котушки був значно менше магнітного опору повітряного зазору. Тоді вплив активного опору спостерігається тільки при малих значеннях δ .

Отже, при збільшенні величини зазору струм I в обмотці котушки також збільшується. Вважаючи цей струм за вихідний сигнал індуктивного перетворювача, а переміщення сердечника x – за вхідну величину, статична характеристика індуктивного перетворювача може бути подана залежністю повного опору котушки індуктивності перетворювача Z від величини переміщення осердя X (рис. 2.59, а), або у вигляді залежності струму через котушку індуктивності перетворювача I від величини переміщення осердя X (рис. 2.59, б).

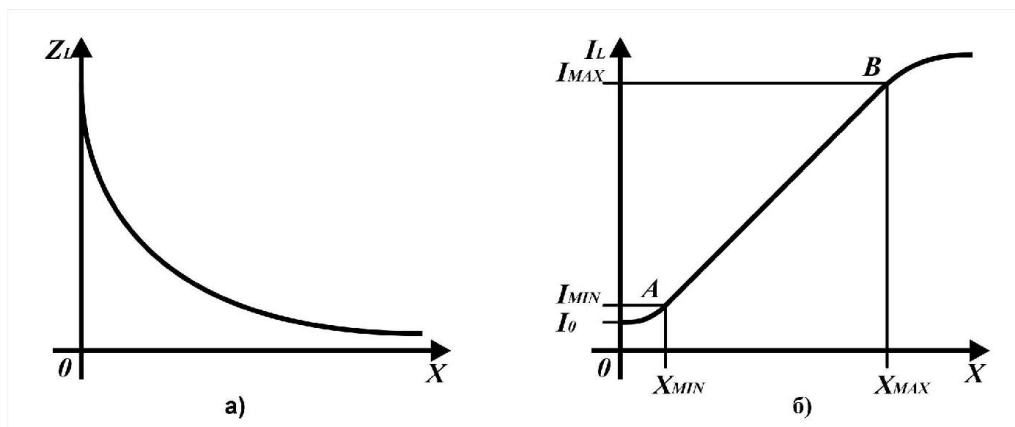


Рис. 2.59. Статична характеристика індуктивного перетворювача:
а – у вигляді $Z_L = f(x)$; б – у вигляді $I = f(x)$

Як видно, статична характеристика має нелінійний характер, але на ній можна виділити ділянку (обмежену точками **A** і **B**), на якій дотримується пряма пропорційність між вхідним і вихідним сигналами. Ця ділянка називається робочою, датчик використовується саме в діапазоні вхідних сигналів від x_{MIN} до x_{MAX} .

У зоні $x < x_{MIN}$ повітряний зазор дуже малий і його магнітний опір стає порівняним з магнітним опором сталевих осердя та якоря. Реальна характеристика починається не від нуля, оскільки навіть при $\delta = 0$ індуктивний опір не може дорівнювати нескінченності. Отже, певний струм буде протікати по обмотці, виконаної навіть на замкнутому магнітопроводі. З метою зменшення значення початкового струму перетворювача для виготовлення осердя та якоря використовують матеріали з високим значенням магнітної проникності.

У зоні $x > x_{MAX}$ індуктивний опір обмотки вже настільки зменшується, що залишається тільки її активний опір, який і обмежує наростання струму. Слід також зазначити, що при великих зазорах частина магнітного потоку вже не замикається через якір, а замикається безпосередньо по повітрю. Це стає причиною виникнення істотної похибки.

Індуктивні перетворювачі зі змінним зазором характеризуються високою чутливістю, але порівняно малим діапазоном вимірювання. Вони використовуються при вимірі малих переміщень, від одиниць мікрометрів до одиниць міліметрів. А у перетворювачів зі зміною площі перерізу магнітопроводу діапазоном вимірювання доходить до декількох десятків міліметрів. Похибка таких датчиків досягає 0,1 %.

З урахуванням магнітної проникності повітряного зазору і магнітної проникності осердя індуктивність котушки з розімкненим сердечником у загальному вигляді буде визначатися формулою:

$$L = \frac{W^2 S}{l_c} \mu_0 \mu \quad (2.59)$$

Аналіз цього виразу показує, що індуктивність котушки може бути змінена кількістю витків котушки, зміною площі перерізу магнітопроводу, зміною довжини магнітної силової лінії в осерді, зміною довжини повітряного зазору і зміною магнітної проникності матеріалу. В останньому випадку феромагнітні осердя виготовляють із матеріалу, чутливого до дії сили тиску F , що і приводить до зміни магнітної проникності. Такі перетворювачі отримали назву «магнітопружні перетворювачі» (рис. 2.60).

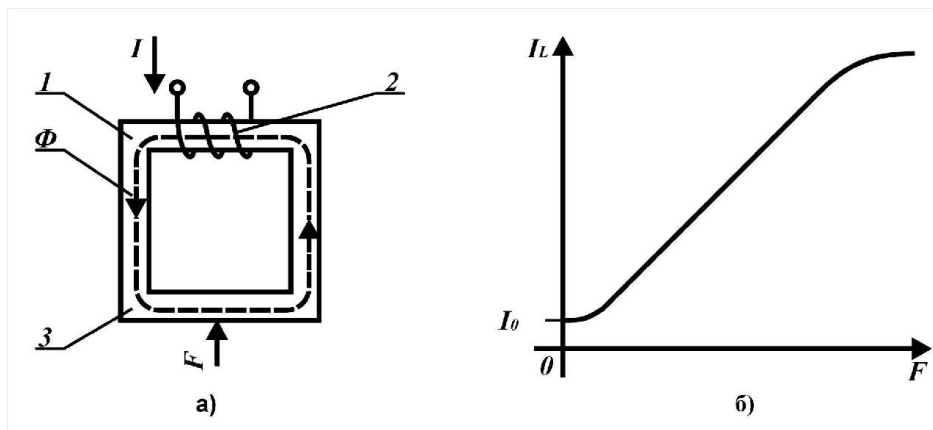


Рис. 2.60. Магнітопружний індуктивний перетворювач:
а – конструкція; б – статична характеристика

Крім розглянутих принципів перетворення, знаходять застосування індуктивні перетворювачі соленоїдного типу, у яких феромагнітний яркір 1 переміщується всередині котушки 2 (рис. 2.61).

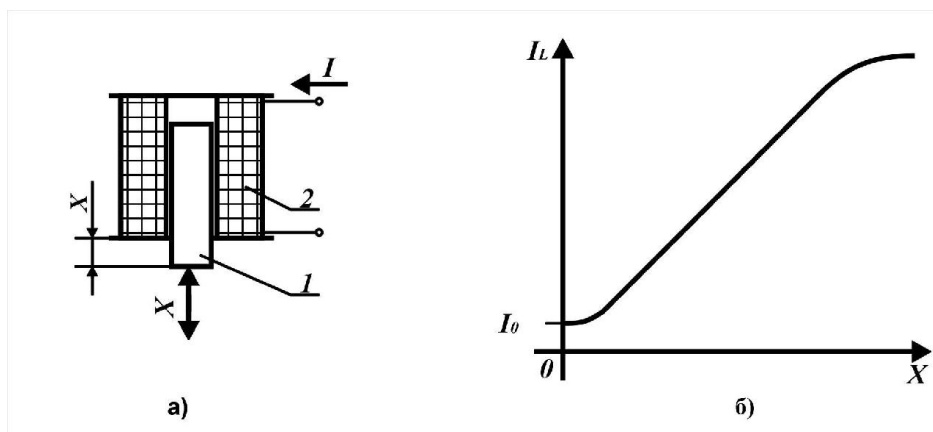


Рис. 2.61. Індуктивний перетворювач соленоїдного типу:
а – конструкція; б – статична характеристика

Індуктивні перетворювачі соленоїдного типу – це індуктивні перетворювачі з розімкненим магнітним колом. Вони мають гірші характеристики і більшу похибку порівняно з перетворювачами, які були розглянуті раніше, і це обумовлено такими причинами:

- магнітний потік в основному замикається через повітря, унаслідок цього їх чутливість значно нижча;
- у зв'язку з великим розсіюванням магнітного потоку ці датчики піддаються сильному впливу зовнішніх магнітних полів.

Для поліпшення властивостей індуктивних перетворювачів використовуються диференціальні перетворювачі. Вони складаються з двох одинарних перетворювачів, що мають загальний рухливий елемент (рис. 2.62).

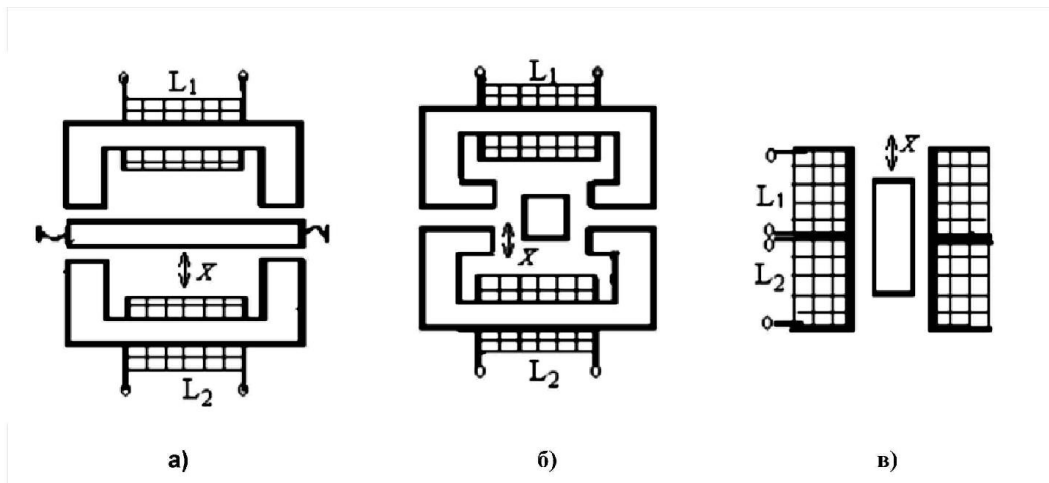


Рис. 2.62. Диференціальні індуктивні перетворювачі:

- а – зі змінною довжиною повітряного зазору;
- б – зі змінною площею повітряного зазору;
- в – з розімкненим магнітним колом

У диференціальних перетворювачах при переміщенні рухомого якоря під дією вхідної величини індуктивність однієї котушки, наприклад L_1 , зростає, а другої – L_2 – зменшується. При включенні в вимірювальну схему вихідний сигнал буде пропорційний різниці вихідних сигналів кожного перетворювача. Диференціальні перетворювачі дозволяють істотно зменшити похибки, підвищити чутливість і збільшити лінійну ділянку характеристики.

Дуже важлива особливість диференціального датчика – рівність нулю вихідного сигналу при нульовому вхідному сигналі.

Для отримання реверсивної статичної характеристики використовують мостову схему включення індуктивних перетворювачів (рис. 2.63, а). Плечі моста утворені обмотками двох осердь 1 і 2 з індуктивностями відповідно L_1 і L_2 та двома постійними резисторами з опором R . До однієї діагоналі моста підводиться напруга живлення U_0 змінного струму, з другої діагоналі знімається вихідна напруга U_{OUT} . Якщо якір 3 займає середнє положення, то індуктивності L_1 і L_2 однакові, тобто міст збалансований. Вихідна напруга U_{OUT} при цьому дорівнює нулю. При відхиленні якоря від середнього положення баланс моста порушується, оскільки індуктивність однієї обмотки збільшується, а другої – зменшується. При відхиленні якоря від середнього положення в інший бік індуктивність котушок змінюється протилежним чином. Статична характеристика є реверсивною (рис. 2.63, б).

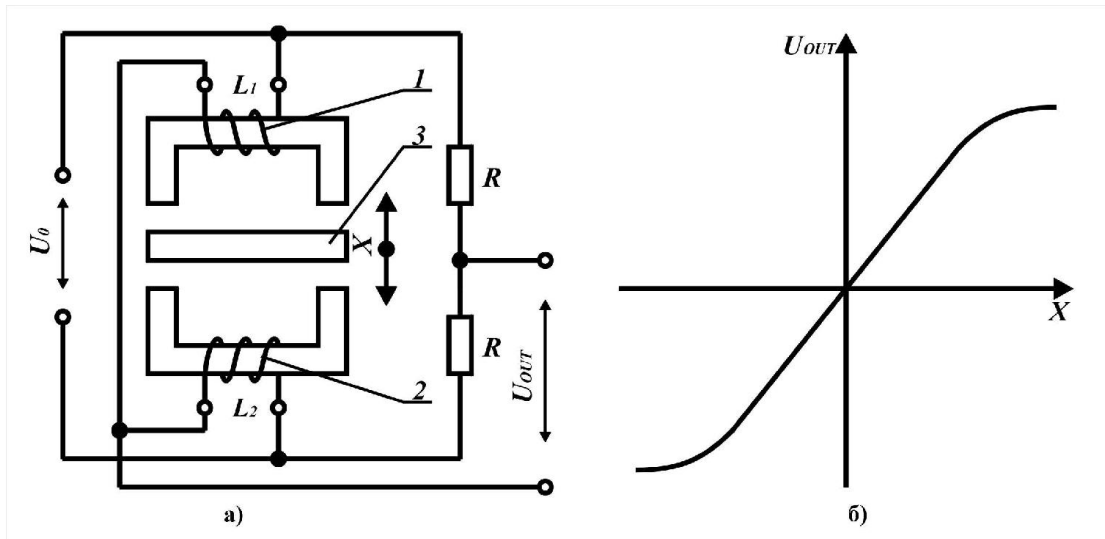


Рис. 2.63. Диференціальний індуктивний перетворювач з реверсивною характеристикою:
а – електрична схема; б – статична характеристика

Датчики з індуктивними первинними перетворювачами широко використовуються у різних технічних системах і приладах. Наприклад, у машинобудуванні вони застосовуються для контролю або виміру розмірів деталей із забезпеченням точності до 3 мкм (рис. 2.64).

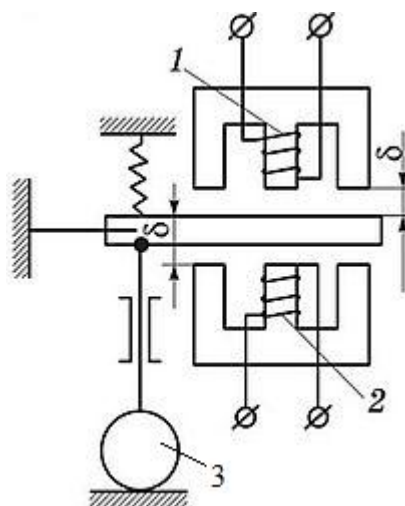


Рис. 2.64. Приклад використання індуктивного датчика для виміру розміру деталі

Відхилення розміру деталі 3 призводить до відповідного відхилення рухомої частини осердя, що в свою чергу викликає відповідну зміну індуктивності котушок 1 і 2.

Висока чутливість до лінійного переміщення дала можливість створити датчики тиску мембранного типу (рис. 2.65).

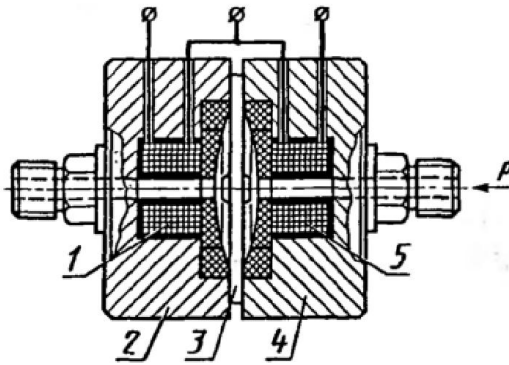


Рис. 2.65. Приклад індуктивного датчика тиску мембранного типу

У корпусі, що складається з двох частин 2 і 4 розміщені котушки 1 і 5, які утворюють індуктивний перетворювач з диференційною схемою підключення. Мембрана 3, на яку діє тиск P , виконана із феромагнітного матеріалу і виконує роль рухомого якоря. Зміна тиску призводить до відповідної деформації (переміщення) мембрани, що відстежується відповідною зміною індуктивності котушок 1 і 5.

Прикладом використання соленоїдного індуктивного перетворювача може бути датчик рівня рідини в резервуарі (рис. 2.66).

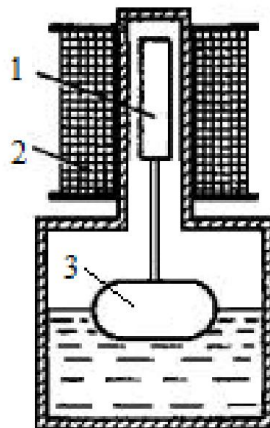


Рис. 2.66. Приклад індуктивного соленоїдного датчика рівня рідини

Поплавок 3 безпосередньо пов'язаний з осердям 1, яке розташовано в котушці 2. Зміна рівня рідини призводить до відповідної зміни положення поплавка 3 і, як наслідок, до зміни положення осердя 1 і величини індуктивності котушки 2.

2.5.8 Перетворювачі Холла

Принцип дії перетворювачів Холла заснований на ефекті Холла, який був відкрито американським ученим Едвіном Холлом у 1876 р.

Основне призначення первинних перетворювачів на ефекті Холла – вимірювання величини струму в електричному колі або вимірювання величини магнітного поля.

Принцип дії таких перетворювачів полягає в зміні траєкторії руху носіїв заряду в напівпровідниках, що знаходяться в магнітному полі. При цьому в твердотільному провіднику (напівпровіднику) із струмом I виникає електричне поле, яке перпендикулярно як напрямку струму, так і напрямку магнітного поля. Результатом цього стає виникнення різниці потенціалів між верхньою та нижньою гранями провідника U_H (рис. 2.67).

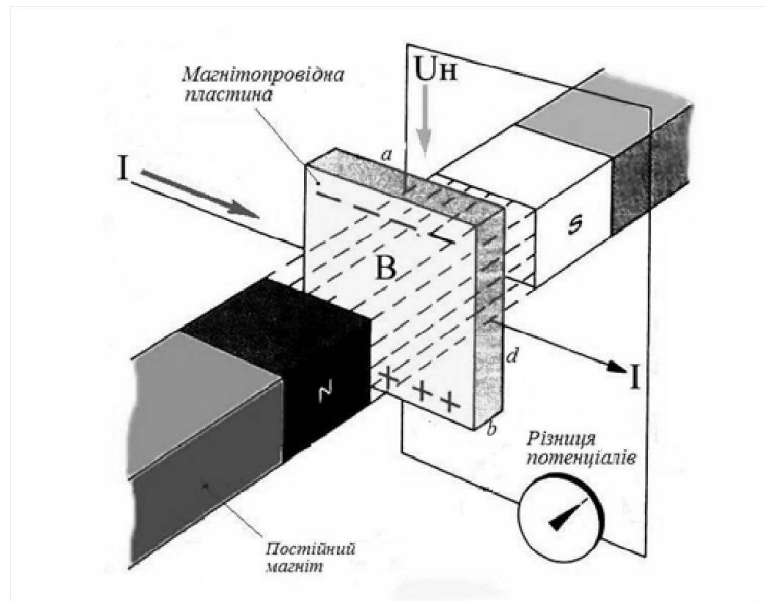


Рис. 2.67. Принцип дії перетворювача Холла

Якщо пластину помістити в магнітне поле, вектор індукції якого спрямований перпендикулярно площині пластини, то на заряди, що рухаються в магнітному полі, діє сила Лоренца, тобто

$$F = eVB, \quad (2.60)$$

де e – заряд носія струму; V – швидкість руху зарядів; B – вектор індукції магнітного поля.

Під дією цієї сили відбувається відхилення траєкторії руху зарядів до країв пластини. Така зміна траєкторій веде до появи негативних зарядів на одному боці пластини і позитивних на протилежному (рис. 2.67). Накопичення зарядів відбувається до тих пір, поки ЕРС Холла не компенсує сили, викликані впливом магнітного поля. При цьому створюється електричне поле, яке визначається швидкістю руху зарядів V та індукцією B , отже,

$$E = VB. \quad (2.61)$$

А різниця потенціалів, або ЕРС Холла буде визначатися виразом:

$$E_H = Ed = VBd \quad (2.62)$$

Таким чином, ефект Холла полягає у виникненні поперечної різниці потенціалів на краях напівпровідника при проходженні через нього струму в поперечному магнітному полі.

З іншого боку, сила струму дорівнює добутку щільності струму j на поперечний переріз провідника S , тобто

$$I = jS = enVS, \quad (2.63)$$

де $j = enV$ – щільність струму з кількістю зарядів n ; $S = bd$ – площа поперечного перерізу з розмірами b і d .

З виразу (2.63) швидкість руху зарядів визначається так:

$$V = \frac{I}{e \cdot n \cdot S}. \quad (2.64)$$

Згідно з (2.62) і (2.64) формула ЕРС Холла буде мати вигляд:

$$E_H = \frac{IB}{enb} \quad (2.65)$$

У цьому виразі $1/(en)$ – коефіцієнт пропорційності, який називають постійною Холла. Оскільки $E_H = U_H$, то різниця потенціалів елемента Холла матиме вигляд:

$$U_H = R \cdot \frac{I \cdot B}{e \cdot n \cdot b}. \quad (2.66)$$

Аналіз виразу (2.66) показує, що вихідна напруга прямо пропорційна добутку величини струму I в провіднику і напруженості магнітного поля B та обернено пропорційна товщині провідника b і кількості зарядів n . Таким чином, статична характеристика перетворювача Холла при вимірюванні напруженості магнітного поля або величини струму в електричному колі носить лінійний характер (рис. 2.68).

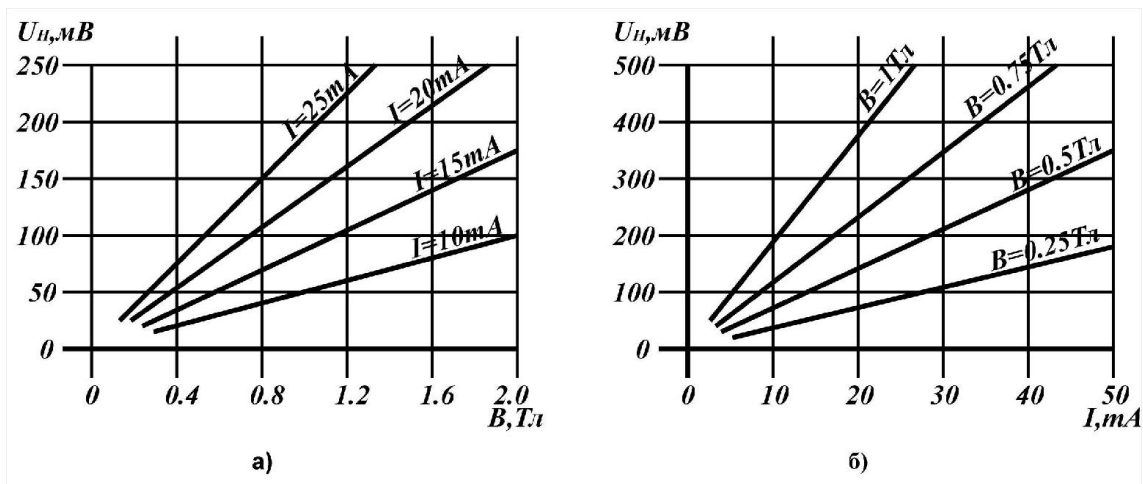


Рис. 2.68. Статична характеристика перетворювача Холла:
 а – залежність ЕРС Холла від магнітної індукції;
 б – залежність ЕРС Холла від сили струму

Слід зазначити, що при вимірюванні величини магнітного поля струм через елемент Холла підтримують на постійному рівні, а при вимірюванні величини струму в електричному колі на постійному рівні підтримують величину магнітного поля.

Одним з основних параметрів перетворювачів Холла є чутливість елемента Холла, яка визначається виразом:

$$\gamma = \frac{\Delta E_H}{\Delta B} \quad (2.67)$$

Для виробництва перетворювачів Холла використовуються напівпровідники Ge (германій), Si (кремній), Ga (галій), In (індій), оскільки вони мають високу рухливість зарядів і велику чутливість до магнітного поля (рис. 2.69).

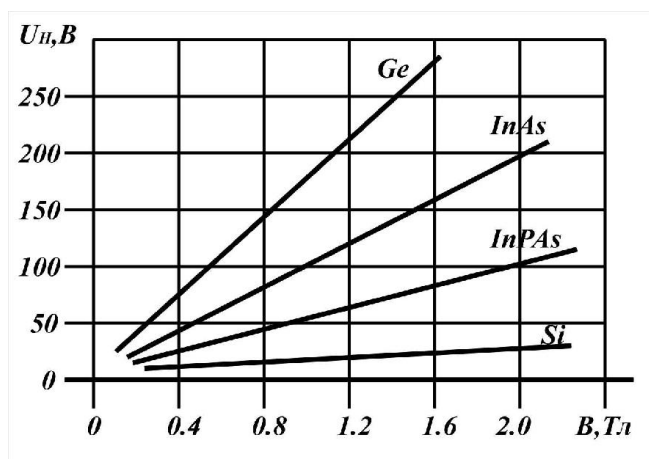


Рис. 2.69. Статична характеристика перетворювачів Холла з різних матеріалів

Наведені приклади статичних характеристик демонструють, що найбільшу крутизну характеристики (тобто чутливість) мають перетворювачі на основі германію. З характеристик також видно, що початкове значення вихідної напруги перетворювача Холла не дорівнює нулю і це необхідно враховувати при таруванні характеристик перетворювача.

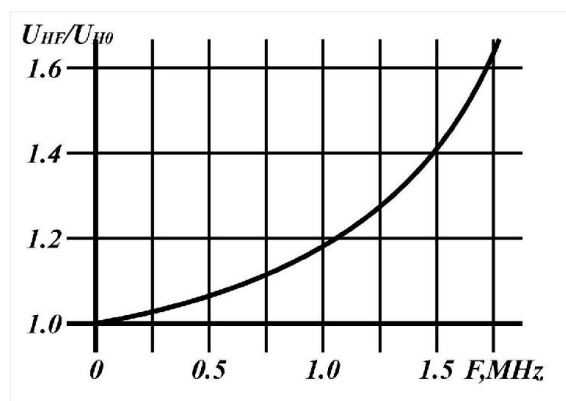


Рис. 2.70. Відносна залежність ЕРС Холла від частоти магнітної індукції

У разі змінного магнітного поля в перетворювачі виникають вихрові струми, які викликають збільшення ЕРС Холла. Залежність відносного збільшення ЕРС Холла від зміни частоти магнітного поля (від 0 до F) носить нелінійний характер (рис. 2.70).

Електрорушійна сила Холла залежить як від сили магнітної індукції, так і від напрямку вектора магнітної індукції (рис. 2.71).

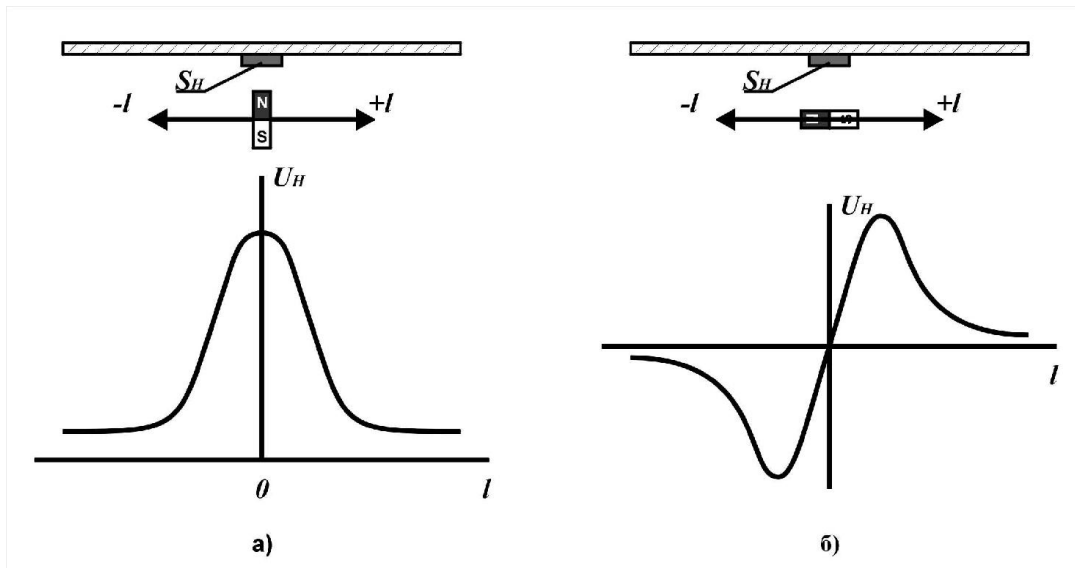


Рис. 2.71. Залежність ЕРС Холла від зміни магнітної індукції (зміни положення магніту відносно елемента Холла)

Величина ЕРС Холла прямо пропорційна величині сили магнітної індукції (рис. 2.71, а). Чим на більшій відстані магніт розташований від елемента Холла (тобто сила магнітної індукції зменшується), тим менше значення ЕРС Холла.

Полярність ЕРС Холла безпосередньо залежить від напрямку вектора магнітної індукції (рис. 2.71, б). При зміні напрямку вектора магнітної індукції змінюється і полярність ЕРС Холла.

Як уже відмічалось, одне з основних призначень первинних перетворювачів на ефекті Холла – це побудова датчиків для вимірювання величини струму в електричному колі. Вимірювання сили струму за допомогою перетворювачів на ефекті Холла можливо безпосереднім або непрямим способом (рис. 2.72).

Безпосередній метод (рис. 2.72, а) застосовують при вимірюванні струму невеликих значень. У цьому разі робочий струм кола I_W , у якому проводиться вимірювання, пропускається безпосередньо через елемент Холла при постійному значенні магнітної індукції, яка утворюється, наприклад, постійним магнітом. Згідно зі статичною характеристикою (рис. 2.68, б) при постійному значенні магнітної індукції величина ЕРС Холла U_H буде прямо пропорційна величині струму I_W в колі, у якому здійснюється вимір.

Непрямий метод вимірювання (рис. 2.72, б) застосовують при вимірюванні струму середніх і великих значень, а також коли необхідно

забезпечити гальванічну розв'язку вимірювального кола та кола вимірювального пристрою. У цьому разі робочий струм кола I_W в осерді утворює магнітне поле, величина якого прямо пропорційна силі струму. Величина магнітної індукції осердя безпосередньо вимірюється елементом Холла при постійному значенні струму через елемент Холла I_C , який утворюється завдяки зовнішньому джерелу живлення G . Згідно зі статичною характеристикою (рис. 2.68, а) при постійному значенні сили струму через елемент Холла величина ЕРС Холла буде прямо пропорційна величині магнітної індукції (тобто величині струму I_W в колі, у якому здійснюється вимір).

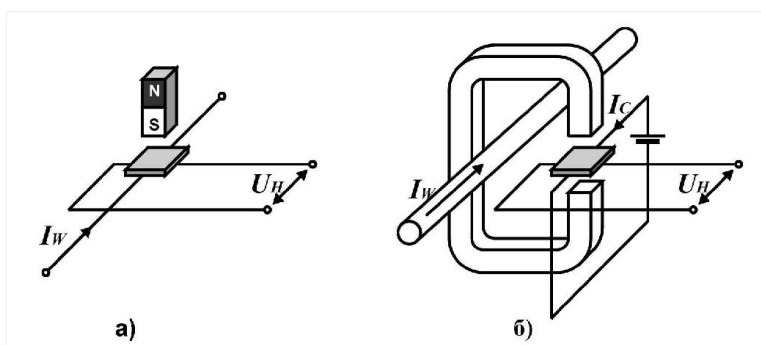


Рис. 2.72. Вимірювання струму за допомогою елемента Холла:
а – безпосереднім вимірюванням; б – непрямим вимірюванням

Слід зазначити, що за допомогою розглянутих методів можливо вимірювання як постійного струму, так і змінного. Форма вихідного сигналу буде повторювати форму струму, що протікає в вимірювальному колі.

Враховуючи, що вихідний сигнал перетворювача на ефекті Холла – це ЕРС Холла, тобто напруга, тому найчастіше застосовується потенціометрична вимірювальна схема.

Слід зазначити, що на базі первинних перетворювачів на ефекті Холла можлива побудова різноманітних датчиків, вимірювальна величина яких буде попередньо перетворена на величину магнітної індукції або на величину електричного струму.

Приклади:

1. Побудова датчика положення (безконтактного кінцевого вимикача). У певному положенні необхідно розташувати датчик з елементом Холла і постійний магніт так, щоб магнітне поле діяло на датчик, а на механізмі, положення якого контролюється, закріпити маркер з феромагнітного матеріалу (наприклад залізна пластина). У разі, коли механізм займе таке положення, коли маркер перекриє магнітний потік від магніту до елемента Холла, відбудеться зміна вихідного сигналу датчика (зміна величини магнітної індукції призводить до зміни ЕРС Холла).

2. Побудова датчика швидкості обертального руху. На валу необхідно містити з феромагнітного матеріалу диск з отворами, розташованими по колу, а

по різні боки диска – магніт і датчик на елементи Холла. При обертанні диска магнітний потік від магніту до датчика буде періодично змінюватись (проходить через отвір і не проходить безпосередньо через диск). Зміна магнітного потоку буде супроводжуватися зміною вихідного сигналу елемента Холла. Частота зміни сигналу буде прямо пропорційна швидкості обертання диска.

2.5.9 Електроконтактні перетворювачі

В основі електроконтактних перетворювачів лежить електричний контакт, який під впливом зовнішньої сили змінює свій стан (замикається, розмикається). Перетворювачі такого типу належать до параметричних перетворювачів, у яких змінюється електричний опір при зміні стану контакту. Замкнутий контакт має опір, що прагне до нуля, а розімкнутий контакт має опір, що прагне до нескінченності. Зміна стану контакту залежно від конструктивного виконання може відбуватися завдяки безпосередньому механічному впливу на контакт, впливу температури або магнітного поля.

Найпоширенішим є побудова датчиків на безпосередньому механічному впливі на контакт. За цим принципом виготовляються датчики положення (кінцеві вимикачі, шляхові вимикачі), проходження об'єкту (одиниці продукції, механізму), граничних величин. Істотно, що сигнал з таких датчиків не може давати інформацію про абсолютне значення вимірюваної величини. В даному випадку сигнал містить інформацію про досягнення контрольованої величини деякого заздалегідь відомого значення.

Наприклад, якщо мова йде про датчик положення, то при досягненні об'єктом положення, яке визначається датчиком, відбувається зміна стану контакту (зміна опору), що свідчить про те, що об'єкт досяг певного положення. Якщо мова йде про датчик температури, то при переході температури через порогове значення датчика відбувається зміна стану контакту. Стан контакту несе інформацію про те, що температура менша чи більша за порогове значення датчика.

Електроконтактний перетворювач датчика може містити один або декілька контактів, вони можуть бути різними за типом – замикальні, розмикальні або перемикальні (рис. 2.73).

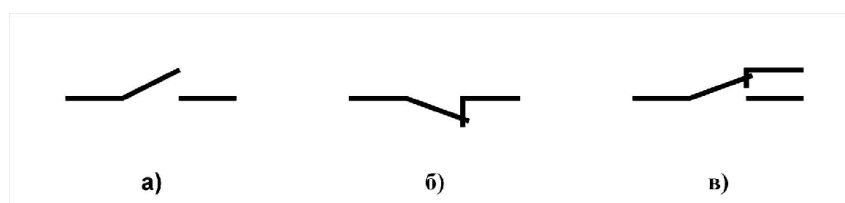


Рис. 2.73. Різновид електричних контактів за типом:
а – NO; б – NC; в – CO

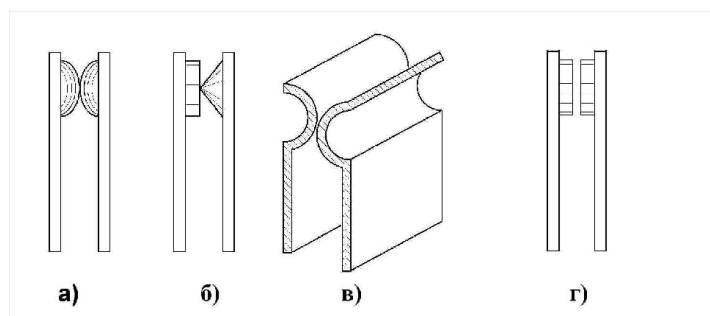
Замикальним називається контакт, що при спрацьовуванні датчика переходить у стан «замкнено». Такий контакт ще називають «нормально

розімкнутий», у технічній літературі часто позначають як НР (нормально розімкнутий) або англomовною аббревіатурою NO (Normal Open).

Розмикальним називається контакт, що при спрацьовуванні датчика переходить у стан «розімкнено». Контакт такого типу ще називають «нормально замкнутий», в технічній літературі часто позначають як НЗ (нормально замкнутий) або англomовною аббревіатурою NC (Normal Close).

Перемикальним називається контакт, що поєднує в собі замикальний і розмикальний контакти, при спрацьовуванні датчика замкнутий контакт розмикається, а розімкнутий – замикається. Контакт такого типу в технічній літературі часто позначають як ПК (перемикальний контакт) або НЗ/НР (нормально замкнутий / нормально розімкнений) чи англomовною аббревіатурою CO (Change-Over).

Залежно від здатності до навантаження контакти мають різне конструктивне виконання і відповідно розподіляються на точкові, лінійні, площинні (рис. 2.74).



**Рис. 2.74. Різновид електричних контактів за конструкцією:
а, б – точкові; в – лінійні; г – площинні**

Точкові утворюють контакт між двома півсферами (рис. 2.74, а) або між вершиною конуса і площиною (рис. 2.74, б), лінійні – між двома поверхнями, що мають форму дотику двох циліндрів, тобто пряму лінію (рис. 2.74, в), площинні – між двома площинами, форма яких може бути довільна, наприклад прямокутна (рис. 2.74, г).

У точкового контакту зіткнення відбувається тільки в одній точці. У лінійних контактів – у точках, які лежать на одній лінії. Мінімальна кількість точок дотику в лінійному контакті дорівнює двом. У поверхневого контакту зіткнення відбувається в точках, розташованих на дотичній поверхні. Мінімальна кількість точок дотику в поверхневому контакті дорівнює трьом.

Точкові контакти призначені для комутації навантаження малої потужності (до 5 А), лінійні – середньої потужності (від 3 до 30 А), площинні – великої потужності (більше 30 А).

Контакти виготовляють з різних металів та їхніх сплавів, а також використовують покриття з різних металів, у тому числі з благородних, з метою отримати як можна кращі характеристики механічної і корозійної стійкості, електричних властивостей.

Основною перевагою електроконтактних перетворювачів є простота конструкції, надійність, низька ціна, недоліками – механічний знос контактів і схильність до корозії під впливом навколишнього середовища (особливо волога, пил).

Статична характеристика електроконтактного датчика має релейний характер (рис. 2.75), оскільки його вихідна величина – електричний опір, що змінюється стрибкоподібно.

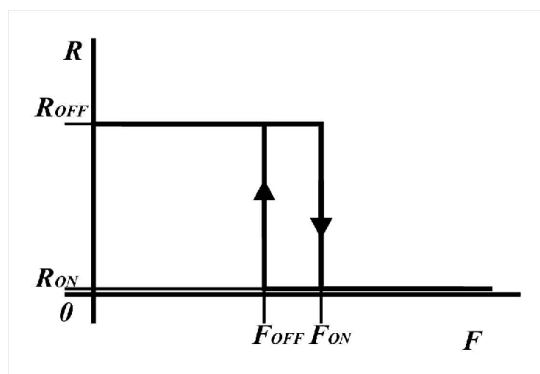


Рис. 2.75. Статична характеристика електричних контактів в загальному вигляді

На наведеному прикладі зображена статична характеристика, що відповідає контакту типу NO. За відсутності впливу сили на контакт його стан – «розімкнено» й електричний опір складає величину, що теоретично прагне до нескінченності (на характеристиці позначено як R_{OFF}). Коли сила, що діє на контакт, зростає і перевищує значення F_{ON} , відбувається зміна стану контакту на «замкнено» й електричний опір складає величину, що теоретично прагне до нуля (на характеристиці позначено як R_{ON}). Коли сила, що діє на контакт, зменшується і стає менша за значення F_{OFF} , відбувається повернення контакту в початковий стан, тобто зміна стану на «розімкнено».

Причому треба звернути увагу на те, що перетворювачам такого типу властива наявність гістерезису. Навмисно конструктивно контакт роблять таким чином, щоб мінімізувати час зміни стану контакту, у ході якого можлива неоднозначність інформації за рахунок ефекту «брязкіт контакту». «Брязкіт контакту» полягає в тому, що в процесі зміни стану контакту (наприклад із «замкнено» в «розімкнено») здійснюється замикання і розмикання декілька разів. Залежно від особливих властивостей контакту це здійснюється до 20 разів упродовж до 0,02 с.

Роботу електроконтактних перетворювачів краще розглянути на ряді прикладів датчиків, у яких первинним перетворювачем є електричний контакт.

Шляховий вимикач (рис. 2.76, б). Спрощено конструкцію датчика (рис. 2.76, а) можливо зобразити у вигляді корпусу 1, у якому розташовано перемикальний контакт у вигляді нерухомих нормально замкнутого контакту 2 і нормально розімкнутого контакту 3 та рухомого контакту 4, який переміщається під впливом підпружиненого механізму 5 залежно від положення робочого важеля 6, який обладнано роликками 7, 8.

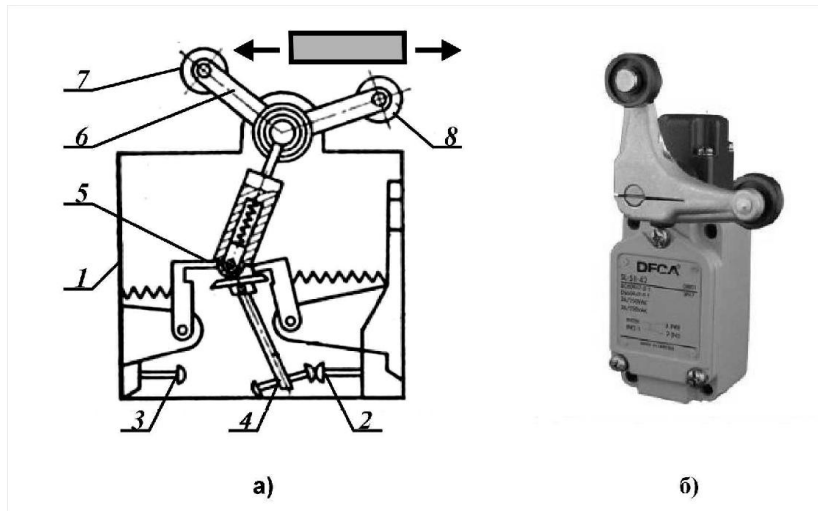


Рис. 2.76. Приклад шляхового вимикача:
а – конструкція; б – зовнішній вигляд

Переміщення об'єкта в лівому напрямку при певному положенні викликає механічний вплив на робочий важіль через ролик 7, що призводить до переміщення механізму 5, унаслідок чого розмикається контакт 2 і замикається контакт 3. Переміщення об'єкта в зворотному напрямку при певному положенні викликає механічний вплив на робочий важіль через ролик 8, у зв'язку з чим переміщується механізм 5, при цьому розмикається контакт 3 і замикається контакт 2.

Манометр електроконтактний (рис. 2.77, а). Цей пристрій виконує одразу декілька функцій. Перша – візуальне відображення поточного значення тиску. Друга – функція двох незалежних датчиків (мінімального і максимального тисків). Третя – налаштування величини спрацьовування датчиків мінімального і максимального тисків.

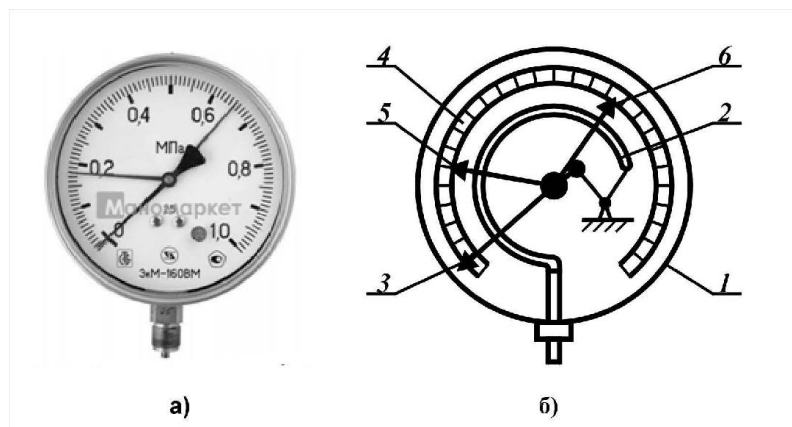


Рис. 2.77. Приклад манометра електроконтактного:
а – зовнішній вигляд; б – конструкція

Спрощено конструкцію датчика (рис. 2.77, б) можливо зобразити у вигляді корпусу 1, у якому розташовано манометричну пружину 2, яка жорстко пов'язана зі стрілкою 3, що відображає поточний тиск за допомогою шкали 4. У корпусі також розташовані контакт датчика мінімального тиску, який пов'язаний із стрілкою мінімального тиску 5, і контакт датчика максимального тиску, який пов'язаний із стрілкою максимального тиску 6.

Зміна тиску призводить до деформації манометричної пружини, що у свою чергу спричиняє зміну положення стрілки-показчика 3. У разі, коли стрілка-показчик 3 перетинає положення стрілки мінімального тиску або положення стрілки максимального тиску, відбувається зміна стану контакту відповідного датчика.

Наприклад, при підвищенні тиску до 0,18 МПа змінюється стан контакту датчика мінімального тиску, оскільки поріг спрацьовування мінімального тиску налаштовано на позначці 0,18 МПа (рис. 2.77, а), при цьому стан контакту датчика максимального тиску залишиться незмінним. При подальшому зростанні тиску стан контактів датчиків буде також незмінним, аж до позначки 0,65 МПа, після чого відбудеться зміна стану контакту датчика максимального тиску, оскільки поріг спрацьовування максимального тиску налаштовано на позначці 0,65 МПа (рис. 2.77, а), при цьому стан контакту датчика мінімального тиску залишиться незмінним. Зменшення тиску буде призводити до зміни стану контактів датчиків максимального і мінімального тиску в зворотному порядку.

Слід зазначити, що промисловість виготовляє електроконтактні манометри за типом контактів чотирьох виконань, які позначаються III – контакти NC + NC, IV – контакти NO + NO, V – контакти NC + NO, VI – контакти NO + NC.

Термометр електроконтактний (рис. 2.78, а). Цей пристрій виконує одразу декілька функцій. Перша – візуальне відображення поточного значення температури. Друга – функція двох незалежних датчиків (мінімальної і максимальної температури). Третя – налаштування величини спрацьовування датчиків мінімальної і максимальної температури.

Функціональні можливості термометра електроконтактного такі самі, як і манометра електроконтактного. Конструктивне виконання (рис. 2.78, б) і принцип дії теж однакові, окрім однієї відмінності – наявності термобалону і капілярної трубки в термометрі електроконтактному. Фактично в цьому пристрої спочатку відбувається попереднє перетворення температури в тиск. Система термобалон 7, капілярна трубка 8, манометрична пружина 2 закритого типу і заповнена речовиною, що легко випаровується. Зміна температури призводить до відповідної зміни тиску в системі. В іншому робота термометра електроконтактного повністю відповідає роботі манометра електроконтактного.

Електроконтактні термометри промисловість також виготовляє за типом контактів чотирьох виконань.

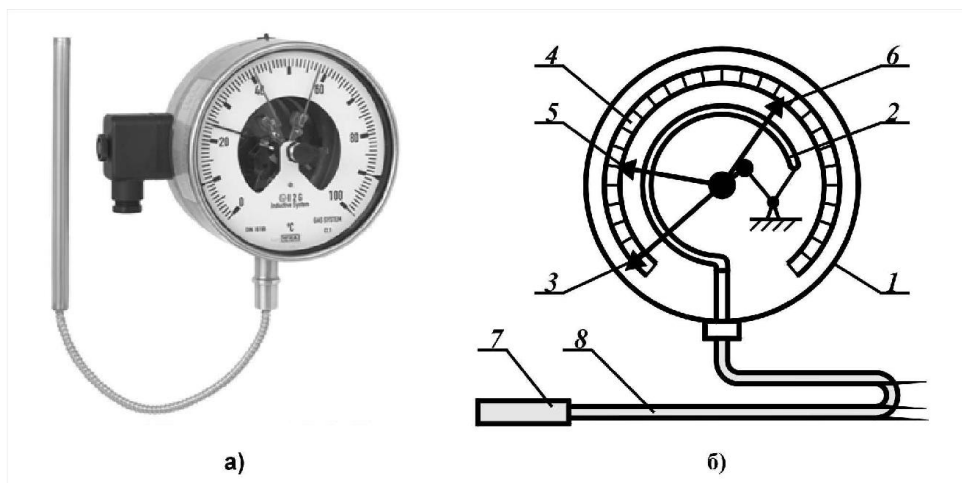


Рис. 2.78. Приклад термометра електроконтактного:
а – зовнішній вигляд; б – конструкція

Термометр біметалевий. В основі лежить біметалевий термоперетворювач. Основне призначення вимірювання температури з використанням в простих системах регулювання температури, а також в системах захисту та аварійного відключення обладнання в разі критичного перевищення температури. Основними перевагами є простота конструкції, низька ціна, висока надійність і в багатьох випадках можливість використання в системах захисту прямої дії.

Робота біметалевих перетворювачів основана на зміні геометричних розмірів твердого тіла у разі зміни температури. Відомо, що тверді речовини при нагріванні розширюються, причому зміна довжини матеріалу визначається виразом:

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (2.68)$$

де l_0 – довжина матеріалу до зміни температури (нагрівання); l – довжина матеріалу після зміни температури (нагрівання); α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу; ΔT – величина зміни температури.

Таблиця 2.2

Значення коефіцієнта лінійного розширення матеріалів

Матеріал	α , 10^{-6} $\times 1/^\circ\text{C}$	Матеріал	α , 10^{-6} $\times 1/^\circ\text{C}$
Вольфрам	4,3	Мідь	16,6
Молібден	5,0	Срібло	19,5
Платина	9,0	Олово	20,0
Залізо	12,0	Алюміній	22,2
Нікель	13,0	Магній	25,0
Золото	14,2	Цинк	29,7

Коефіцієнт лінійного розширення – фізична величина, що характеризує відносну зміну об'єму або лінійних розмірів тіла зі збільшенням температури на 1К при постійному тиску. Має розмірність зворотної температури. Розрізняють коефіцієнти об'ємного і лінійного розширення.

Біметалевий перетворювач температури складається з двох металевих пластин, що зроблені з різних матеріалів і скріплені між собою (рис. 2.79, а). Метали використовують з коефіцієнтами лінійного розширення, що суттєво відрізняються. Незважаючи на те, що самі значення коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів невеликі, зміни лінійних розмірів біметалевої пластини виявляються істотними.

Пояснення принципу дії (рис. 2.79, а). Нехай на конструкції з ізоляційного матеріалу 3 закріплено два контакти, один – звичайний 1, а другий – виконано з біметалевої пластини 2. При нагріві відбувається деформація біметалевого контакту (показано пунктирною лінією) за рахунок того, що коефіцієнти лінійного розширення матеріалів відрізняються. Це призводить до замикання контактів 1 і 2 між собою.

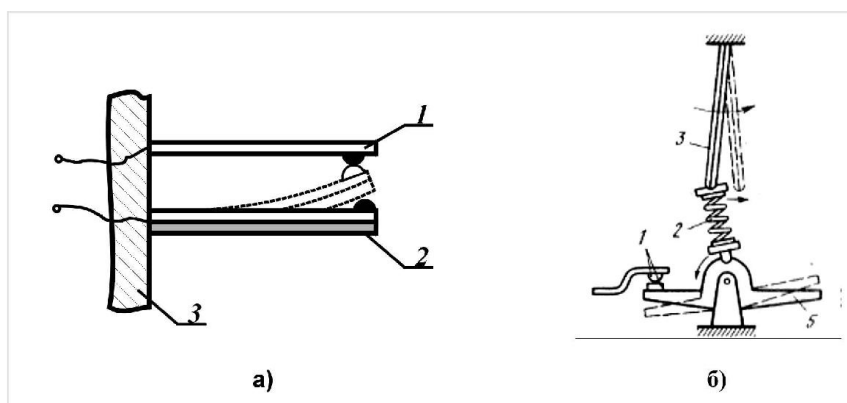


Рис. 2.79. Термовимикач біметалевий:
а – принцип дії; б – конструкція

Розглянута конструкція має суттєвий недолік – доволі повільний процес зміни стану контакту, що призводить до ефекту «брязкіт контакту». В практичному використанні застосовують механізм, який забезпечує швидку зміну стану контактів (рис. 2.79, б). Поворотне коромисло 5 має два стійких стани, що забезпечуються пружиною 2. Під дією температури відбувається деформація біметалевої пластини 3, що призводить до зміни положення коромисла 5 і до відповідної зміни стану контакту 1. Статична характеристика набуває релейного характеру з наявністю гістерезису (має вигляд як на рис. 2.75).

Біметалеві термоперетворювачі використовуються в діапазоні температур від -40°C до $+550^{\circ}\text{C}$, широке застосування особливо в побутовій техніці (електричні чайники, праски, бойлери), а також є невід'ємною складовою автоматичних вимикачів для реалізації функції автоматичного відключення при перенавантаженні.

Герконові перетворювачі. Це різновид електроконтактних перетворювачів, зміна стану контакту яких відбувається за допомогою впливу магнітного поля безпосередньо на контакт. Вони не мають зносу, що викликано негативними факторами навколишнього середовища (контакти не схильні до окиснення і корозії). Основним компонентом є геркон. Геркон (від скорочення «герметичний контакт») – електромеханічний пристрій, що являє собою герметичний магнітокерований контакт.

Геркон може містити замикальний, розмикальний або перемикальний контакт. Конструктивно він має вигляд скляної герметичної колби, у якій розташовано контакт (рис. 2.80). Середовище колби може бути вакуумоване або заповнене інертним газом.

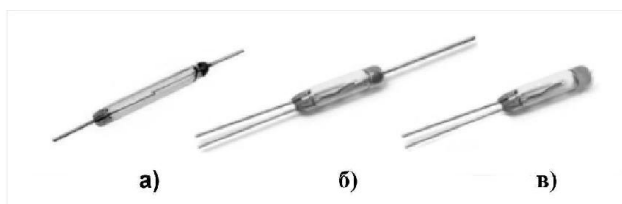


Рис. 2.80. Зовнішній вигляд герконів з контактом:
а – замикальним; б – перемикальним; в – розмикальним

У загальному випадку принцип дії геркона полягає в зміні стану контакту при впливі зовнішнього магнітного поля і повернення контакту в початковий стан при зникненні зовнішнього магнітного поля. Але залежно від типу контакту є незначні відмінності в роботі геркона. В загальному випадку статична характеристика має релейний характер з наявністю гістерезису (має вигляд як на рис. 2.75).

Геркон із замикальним контактом (рис. 2.81). Контакти 1 і 2 зроблені з феромагнітного матеріалу, пружні й можуть вигинатися під впливом магнітного поля.

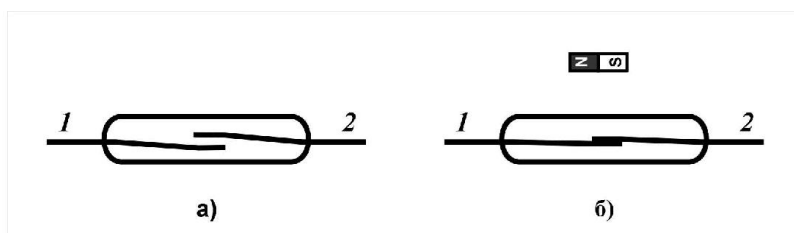


Рис. 2.81. Робота геркона із замикальним контактом:
а – стан без впливу магнітного поля; б – стан під впливом магнітного поля

У початковому стані магнітне поле не впливає на контакти геркона і вони розімкнуті (рис. 2.81, а). При впливі магнітного поля контакти геркона поводяться подібно магнітопроводу – виникає взаємне притягання контактів (рис. 2.81, б). Магнітні поля, що утворюються з протилежним знаком, спричиняють замикання контактів, коли магнітна сила перевищує поворотну

(пружну) силу самих контактів. При зниженні сили зовнішнього магнітного поля так, що зусилля між контактами стає менше, ніж поворотна сила, контакт повертається в початковий стан – розмикається.

Геркон з розмикальним контактом (рис. 2.82). Контакти 1 і 2 зроблені з феромагнітного матеріалу; як правило, контакт 1 пружний і має можливість вигинатися під впливом магнітного поля, а контакт 2 – нерухомий.

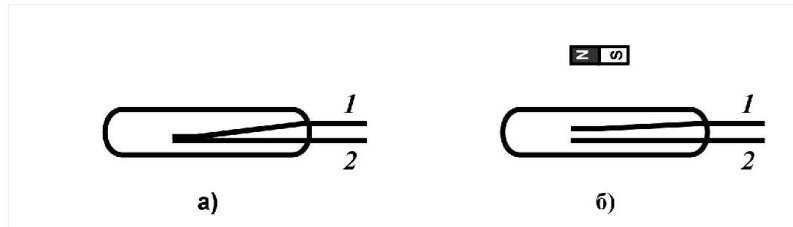


Рис. 2.82. Робота геркона з розмикальним контактом:
а – стан без впливу магнітного поля; б – стан під впливом магнітного поля

Пристрої з нормально замкнутими контактами діють трохи інакше. У початковому стані магнітне поле не впливає на контакти геркона і вони знаходяться в замкнутому стані (рис. 2.82, а). При впливі магнітного поля достатньої сили контакти геркона отримують однакову полярність, що призводить до їх взаємного відштовхування (вигинається контакт 1), у результаті чого контакт розмикається (рис. 2.82, б). При зниженні сили зовнішнього магнітного поля так, що зусилля між контактами стає менше, ніж поворотна сила, контакт повертається в початковий стан – замикається.

Геркон з перемикальним контактом (рис. 2.83). Контакти 1 і 2 зроблені з феромагнітного матеріалу, а контакт 3 – з не феромагнітного, причому контакт 1 пружний і має можливість вигинатися під впливом магнітного поля, а контакти 2 і 3 – нерухомі.

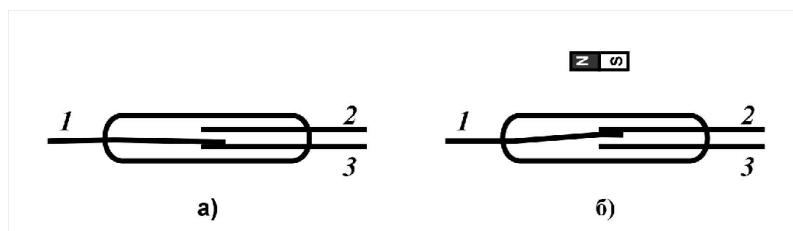


Рис. 2.83. Робота геркона з перемикальним контактом:
а – стан без впливу магнітного поля; б – стан під впливом магнітного поля

Принцип дії таких герконів схожий з принципом дії герконів із замикальним контактом. У початковому стані магнітне поле не впливає на контакти геркона, тому контакт 1 замкнуто з контактом 3 та розімкнено з контактом 2 (рис. 2.81, а). При наявності магнітного поля між контактами 1 і 2 виникає взаємне тяжіння, у результаті чого контакт 1 притягується до нерухомого контакту 2 і супроводжується це розмиканням контактів 1 і 3, тому

що контакт 3 теж не рухомий (рис. 2.81, б). При достатньому зниженні сили зовнішнього магнітного поля під дією пружної сили контакту 1 відбувається переміщення його в початковий стан, тобто контакт 1 розмикається з контактом 2 і замикається з контактом 3.

Магнітна характеристика контактної групи герконів має виражену анізотропну симетричну спрямованість. Орієнтація і положення магніта щодо геркону мають певний вплив на контакти (рис. 2.84).

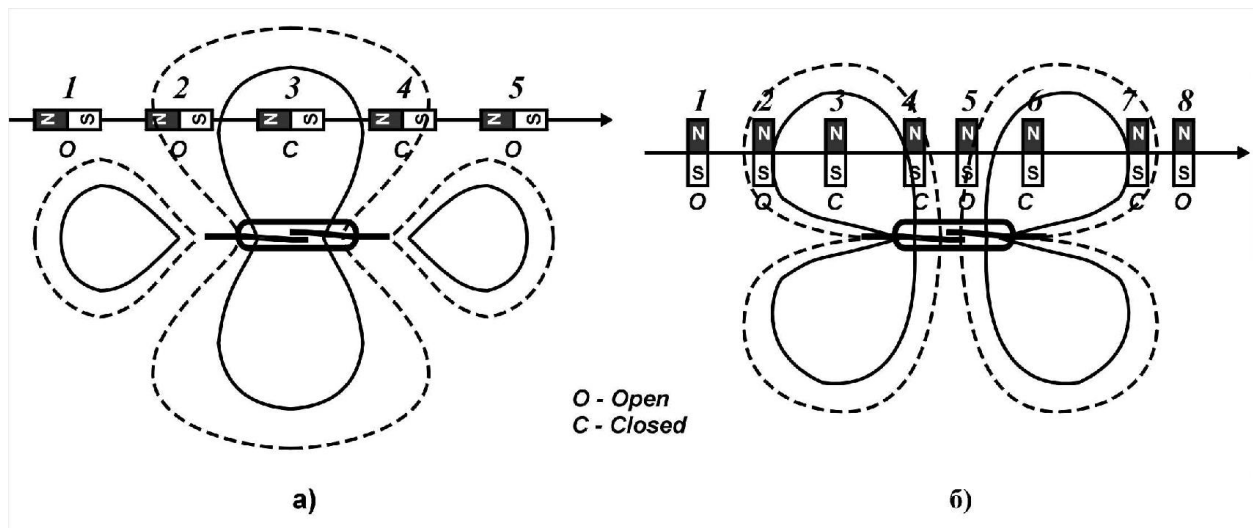


Рис. 2.84. Взаємодія постійного магніту з герконом:
а – при паралельній орієнтації; б – при перпендикулярній орієнтації

Оскільки контакти геркона мають свою діаграму чутливості, то залежно від розташування магніту і його орієнтації в просторі відносно контактної групи, можливі три варіанти взаємодії:

- магніт поза зоною дії – положення 1, 5 (рис. 2.84, а) і 1, 5, 8 (рис. 2.84, б);
- магніт у зоні спрацьовування – положення 3 (рис. 2.84, а) і 3, 4 (рис. 2.84, б);
- магніт у зоні гистерезису – положення 2, 4 (рис. 2.84, а) і 2, 4, 7 (рис. 2.84, б).

Суцільними лініями показана зона впевненого спрацьовування контактної групи. При знаходженні постійного магніту в її межах магнітне поле є достатнім для надійного спрацьовування контактної групи. Пунктирною лінією показана зона гистерезису. Під час входження магніту в цю зону сила магнітного поля ще недостатня для спрацьовування контактної групи, але його ще досить для утримання контактної групи в «спрацьованому» стані.

Таким чином, крім розглянутого керування герконом за допомогою лінійного переміщення магніту вздовж нього, також можливі варіанти керування шляхом обертання магніту, кутового переміщення магніту і шляхом перекриття магнітного потоку феромагнітним матеріалом (рис. 2.85).

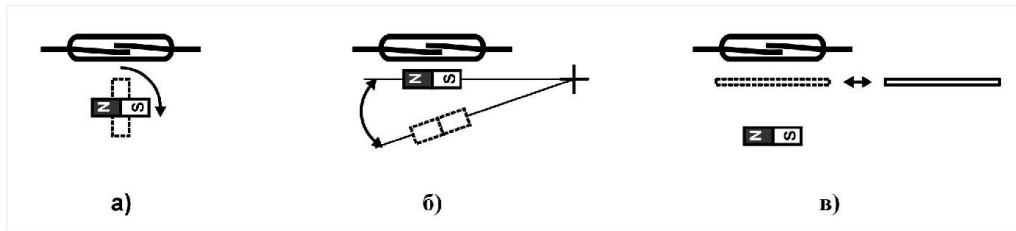


Рис. 2.85. Керування герконом:
а – шляхом обертання магніту; б – шляхом кутового переміщення;
в – шляхом перекриття магнітного потоку

З використанням герконів реалізовано багато різновидів датчиків положення (кінцеві вимикачі, шляхові вимикачі, положення об'єкту), а також датчиків різноманітних за контрольованою величиною, у яких спочатку реалізовано перетворення цієї величини в переміщення і положення (з розташуванням на нерухомій частині – геркон, на рухомій – магніт).

Наприклад, датчик рівня рідини в резервуарі. На певному рівні встановлюється геркон, а магніт розташовується на поплавці. Поплавок безпосередньо відстежує рівень рідини, і коли рівень досягне зони дії магніту на геркон, буде отримано відповідний сигнал у вигляді зміни стану контакту.

Ще один приклад – датчик положення (рис. 2.86) конструктивно складається з двох частин, в одній – постійний магніт, у другій – геркон.

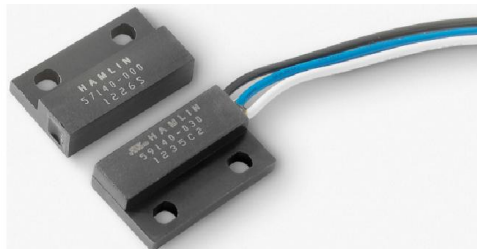


Рис. 2.86. Приклад герконового датчика положення

Перша частина розташовується на рухомій частині, а друга – на нерухомій. Прикладом застосування може бути контроль відкриття дверей.

2.5.10 Тахогенераторні перетворювачі

Тахогенераторами називаються невеликі електричні машини, призначені для перетворення механічного переміщення (обертання валу) в електричний сигнал у вигляді напруги.

За родом струму можна розрізнити тахогенератори змінного і постійного струму. Тахогенератори змінного струму бувають асинхронними і синхронними. Тахогенератори постійного струму можуть бути або зі збудженням постійними магнітами, або з електромагнітним збудженням (з наявністю обмотки збудження).

Тахогенератори постійного струму

Тахогенератори постійного струму функціонально призначені для перетворення частоти обертання вала в пропорційну частоті вихідну напругу постійного струму. Вихідна напруга тахогенератора використовується для вимірювання частоти (швидкості) обертання виконавчих механізмів.

Як вже відмічалось, залежно від конструкції збудження в тахогенераторах постійного струму може здійснюватися постійним магнітом або за допомогою обмотки збудження (рис. 2.87).

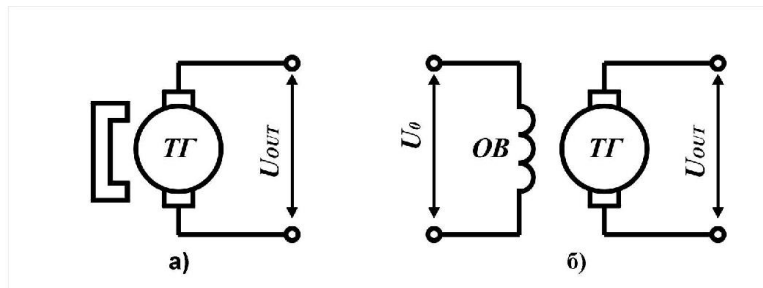


Рис. 2.87. Умовне графічне позначення тахогенератора постійного струму: а – зі збудженням постійним магнітом; б – зі збудженням обмоткою збудження

Тахогенератор постійного струму являє собою традиційну колекторну електричну машину, при конструюванні якої основна увага приділяється не питанню енергетичної ефективності (ККД, потужність і маса машини), а лінійності й точності статичної характеристики. Тахогенератор постійного струму містить статор 1 з джерелом збудження постійного магнітного поля (за допомогою постійного магніту або обмотки збудження), ротора з обмотками 2 і щітково-колекторний вузол 3 (рис. 2.88).

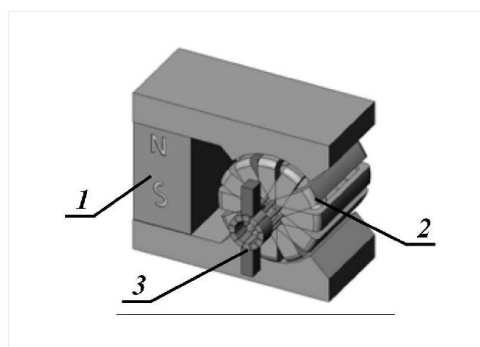


Рис. 2.88. Конструкція тахогенератора постійного струму

При обертанні ротора тахогенератора в кожній секції роторної обмотки наводиться синусоїдальна ЕРС (рис. 2.89), частота якої дорівнює добутку швидкості обертання на число пар полюсів статора.

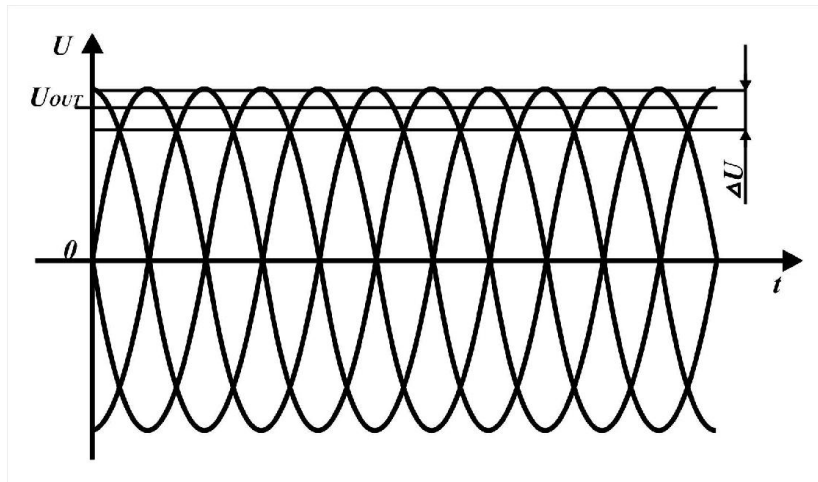


Рис. 2.89. Формування вихідного сигналу тахогенератора постійного струму

За рахунок перемикачів, що здійснюються щітково-колекторним пристроєм, вихідний сигнал має форму, що огинає напруги, які виробляються секціями роторної обмотки.

У практичному застосуванні для визначення величини вихідної напруги використовують такий вираз:

$$E = C_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (2.69)$$

де C_e – конструктивний коефіцієнт ЕРС тахогенератора; Φ – магнітний потік збудження, n – частота обертання.

Статична характеристика тахогенератора постійного струму відображає залежність величини вихідної напруги від кількості обертів валу тахогенератора (рис. 2.90).

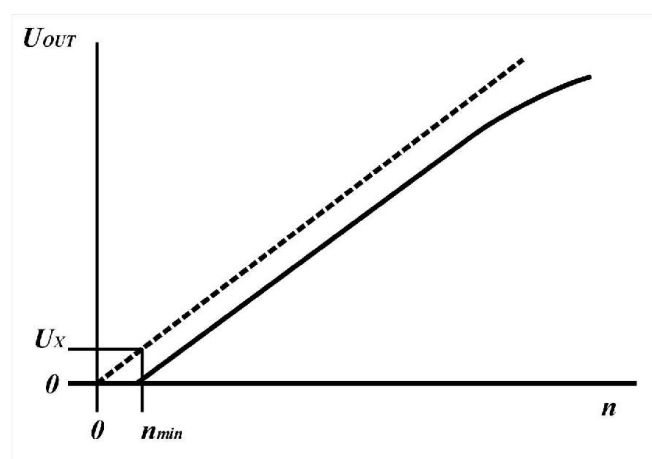


Рис. 2.90. Статична характеристика тахогенератора постійного струму

В ідеальному тахогенераторі постійного струму статична характеристика (позначена пунктирною лінією) має лінійний характер і проходить через початок координат, тобто не має зони нечутливості.

Однак у реальних тахогенераторах вихідна характеристика не прямолінійна (позначена суцільною лінією) і до того ж вона виходить не з початку осей координат.

Основна причина криволінійності характеристики – реакція якоря, тому зменшенню криволінійності цієї характеристики сприяє включення на вихід тахогенератора приладів з великим внутрішнім опором, оскільки при зменшенні струму якоря послаблюється дія реакції якоря. В сучасних тахогенераторах відхилення вихідної характеристики від прямолінійної становить від 0,5 до 3 %.

Падіння напруги в щітковому контакті створює в характеристиці тахогенератора зону нечутливості. Це діапазон частот обертання у проміжку від 0 до n_{min} , у якому напруга на виході генератора дорівнює нулю. Кордон зони нечутливості визначається виразом:

$$n_{min} = \frac{U_x}{C_e \cdot \Phi}, \quad (2.70)$$

де U_x – падіння напруги на щітках.

Слід зазначити що зміна напрямку обертання валу тахогенератора постійного струму призводить до зміни полярності вихідної напруги, таким чином за полярністю сигналу можна визначати напрям обертання.

Широке застосування отримали тахогенератори постійного струму, що збуджуються постійними магнітами. Ці тахогенератори не мають обмотки збудження, і тому вони простіші за конструкцією і мають менші габарити.

Перевагою тахогенератора постійного струму є зручна форма вихідного сигналу (сигнал постійного струму), досить висока точність перетворення.

Головний недолік цього типу тахогенераторів зумовлений наявністю щітково-колекторного вузла, який має обмежений ресурс роботи, а також недоліком є чутливість до ударів і вібрацій, що може породжувати додаткові шуми вихідного сигналу.

Тахогенератори змінного струму

Тахогенератори змінного струму функціонально призначені для перетворення частоти обертання вала в пропорційну частоті вихідну напругу змінного струму.

Як вже відмічалось, тахогенератори змінного струму бувають двох видів – синхронні та асинхронні.

Синхронним тахогенератором (рис. 2.91) змінного струму називають невелику однофазну синхронну електричну машину, у якій ротор являє собою постійний магніт з декількома полюсами, а в пазах статора розміщена вихідна обмотка.

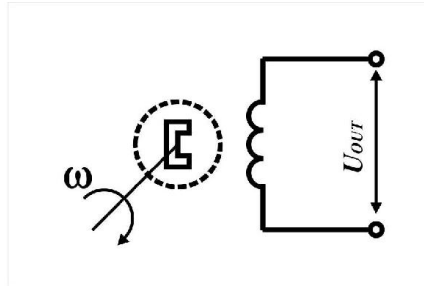


Рис. 2.91. Синхронний тахогенератор змінного струму

При обертанні ротора від стороннього механізму в вихідній обмотці тахогенератора індукується змінна напруга U_{OUT} , амплітуда і частота якої залежать від швидкості обертання ротора. Оскільки ротор синхронного тахогенератора зазвичай виготовляють з багатополюсного постійного магніту, то на один оберт доводиться не один період вихідного сигналу, а їх кількість визначається кількістю магнітних полюсів ротора.

При обертанні ротора обмотка перетинається обертовим магнітним полем постійної величини Φ і в ній наводиться ЕРС:

$$E = -W \frac{d\Phi}{dt'} \quad (2.71)$$

де W – кількість витків обмотки.

Зміна потоку через обмотку буде відбуватися з частотою ω і при відповідній конструкції ротора і статора ця зміна за формою може бути близькою до синусоїдальної, тобто

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \omega \cdot \sin \omega t \quad (2.72)$$

де Φ_0 – амплітудне значення магнітного потоку через обмотку.

Тоді ЕРС тахогенератора буде визначатись як

$$E = W \cdot \Phi_0 \cdot \sin \omega t \quad (2.73)$$

У синхронних тахогенераторів зі зміною кутової швидкості разом з амплітудою змінюється і частота вихідної напруги. Інформаційною складовою вихідного сигналу може використовуватись як величина напруги, так і частота. Таким чином, статична характеристика синхронних тахогенераторів може бути представлена залежністю амплітуди вихідної напруги від частоти обертів валу тахогенератора або залежністю частоти вихідної напруги від частоти обертів валу тахогенератора.

В першому випадку статична характеристика має нелінійний характер (рис. 2.92, а), а в другому – вона лінійна в усьому діапазоні перетворення (рис. 2.92, б).

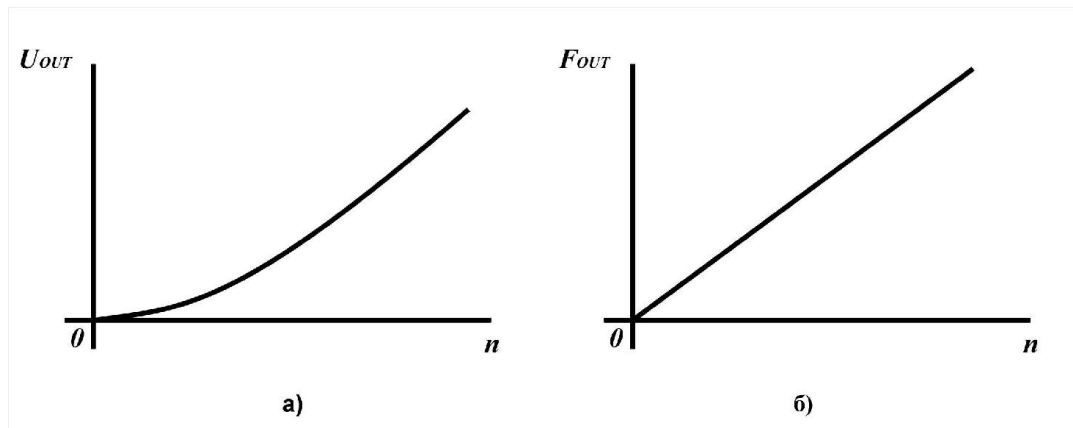


Рис. 2.92. Статичні характеристики синхронного тахогенератора змінного струму:
 а – залежність амплітуди напруги; б – залежність частоти напруги

При використанні синхронних тахогенераторів вимірювання частоти напруги доцільно, ніж вимірювання величини напруги, оскільки в даному випадку є можливість забезпечити більшу точність і застосувати значно простіші методи обробки сигналу. Слід тільки звернути увагу на те, що для забезпечення гарного співвідношення "точність вимірювання – час вимірювання" при відносно високих частотах слід проводити вимірювання частоти сигналу, а при відносно низьких частотах – вимір періоду проходження сигналу.

При практичному застосуванні також слід зважати на те, що за рахунок неідентичності магнітних полюсів ротора за рівнем намагніченості та за геометричним розташуванням по колу ротора можливе періодичне незначне коливання як амплітуди вихідного сигналу, так і періоду його проходження. Якщо потрібна підвищена точність вимірювання, то слід проводити вимір періоду за повний оберт валу тахогенератора. Наприклад, якщо кількість магнітних полюсів ротора 5, то вимірювання слід проводити п'яти періодів сигналу тахогенератора. Вимір періоду за повний оберт валу тахогенератора дозволяє повністю усунути похибку вимірювання, яка може бути викликана неідентичністю виготовлення магнітних полюсів ротора.

Перевагами синхронних тахогенераторів є надійність за рахунок відсутності рухомих електричних контактів, висока точність вимірювання за рахунок вимірювання частоти сигналу. Недоліком слід вважати неможливість визначення напрямку обертання.

Асинхронним тахогенератором змінного струму (рис. 2.93) називають невелику двофазну асинхронну електричну машину, у якій на статорі знаходяться обмотка збудження і зрушена відносно неї на 90° вихідна (генераторна) обмотка. Між нерухомими статором і внутрішнім феромагнітним сердечником розташований ротор, виконаний у вигляді тонкостінного стакану, який обертається в процесі роботи тахогенератора.

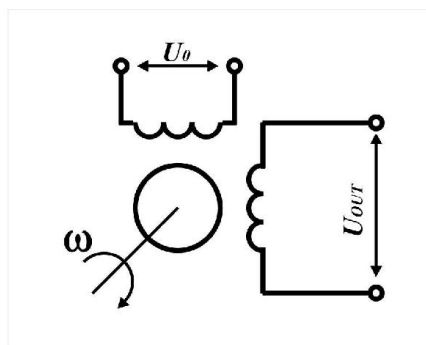


Рис. 2.93. Асинхронний тахогенератор змінного струму

При подачі на обмотку збудження змінної напруги та обертанні ротора у вихідній (генераторній) обмотці буде виникати ЕРС. Амплітудне і середнє значення ЕРС, що наводяться, пропорційні значенням кутової швидкості обертання ротора (чим вище швидкість, тим більше амплітуда). Частота цієї ЕРС не залежить від швидкості ротора і завжди дорівнює частоті мережі, яка живить обмотку збудження.

Слід зазначити, що при обробці вихідного сигналу асинхронного тахогенератора є можливість визначати зміну напрямку обертання ротора, оскільки в цих випадках фаза вихідної напруги тахогенератора змінюється на зворотну. Фаза вихідного сигналу відносно фази напруги, що живить обмотку збудження, при обертанні в один бік запізнюється на 90° , а при обертанні в інший – випереджає на 90° .

Обмотка збудження підключається до мережі змінного струму з постійною частотою. Синусоїдальний струм цієї обмотки збуджує в статорі пульсуючий магнітний потік, вектор якого збігається з віссю обмотки збудження, і якщо ротор нерухомий, то в ньому під дією магнітного потоку виникають тільки струми Фуко. Ці струми створюють своє магнітне поле, що збігається за напрямом, але протилежне за знаком магнітному потоку обмотки збудження. Цей режим відповідає режиму короткого замикання вторинної обмотки трансформатора і приводить до збільшення споживання струму від джерела живлення. Результуючий магнітний потік перпендикулярний осі вихідної обмотки тахогенератора, тому ЕРС в ній не наводиться і вихідна напруга тахогенератора дорівнює нулю.

Якщо ротор тахогенератора обертається з деякою кутовою швидкістю Ω , то в матеріалі ротора наводиться ЕРС:

$$E = B_M l r \omega \sin \omega t \quad (2.74)$$

де B_M – індукція поля обмотки збудження; l – довжина ротора; r – радіус ротора; ω – швидкість обертання ротора.

Ця ЕРС викличе в тілі ротора струми, що створюють ще одне магнітне поле, напрямом якого перпендикулярний вектору магнітного потоку збудження. Це поле збігається з віссю вихідної обмотки тахогенератора, тому в вихідній

обмотці буде наводитися ЕРС, амплітуда якої буде пропорційна швидкості обертання, а частота дорівнювати частоті напруги живлення обмотки збудження.

Статична характеристика асинхронного тахогенератора відображає залежність амплітуди вихідної напруги змінного струму з постійною частотою від частоти обертання ротора тахогенератора (рис. 2.94).

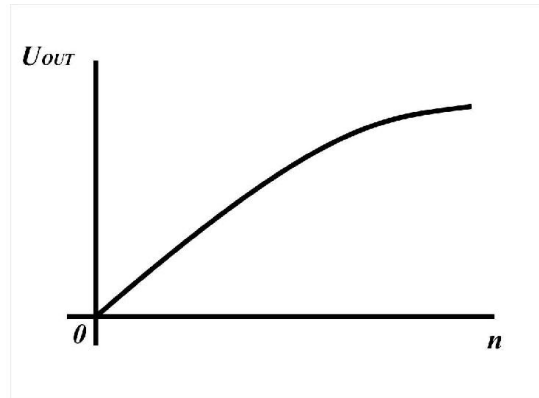


Рис. 2.94. Статична характеристика асинхронного тахогенератора змінного струму

Перевагами асинхронних тахогенераторів є простота конструкції, надійність за рахунок відсутності рухомих електричних контактів, недоліками – наявністю нелінійності статичної характеристики.

2.5.11 Термоелектричні перетворювачі

Термоелектричні перетворювачі є генераторними перетворювачами і їх часто називають термопарами. Принцип дії таких перетворювачів заснований на явищі виникнення термо-ЕРС в місці з'єднання двох різнорідних металів, яке було відкрито німецьким ученим Зеєбеком в 1821 році. Основне призначення термоелектричних перетворювачів – вимір температури.

У термопарі метали, з яких вона виготовлена, називають термоелектродами, а місце з'єднання двох різнорідних металів отримало назву спай. Зазвичай спай виготовлений за допомогою зварювання або пайки.

У провіднику, кінці якого мають різні температури, від теплового кінця до холодного передається тепла енергія. Унаслідок градієнта температур у провіднику виникає електричне поле, обумовлене ефектом Томсона. Суть ефекту полягає в поглинанні або вивільненні тепла лінійно пропорційно току, що проходить через однорідний провідник, який має градієнт температури вздовж його довжини. Індуковане електричне поле спричинює утворення різниці потенціалів, яка для однорідного матеріалу може бути знайдена як:

$$dU = \alpha_1 dT, \quad (2.75)$$

де α_1 – абсолютний коефіцієнт Зеєбека; dT – градієнт температур.

Рівняння (2.75) є основним математичним виразом для термоелектричного ефекту.

Термоелектричні властивості матеріалів досліджуються за допомогою контуру (термоелектричного контуру), що складається з двох різних провідників *A* і *B*, які утворюють два спаї 1 і 2 (рис. 2.95, а).

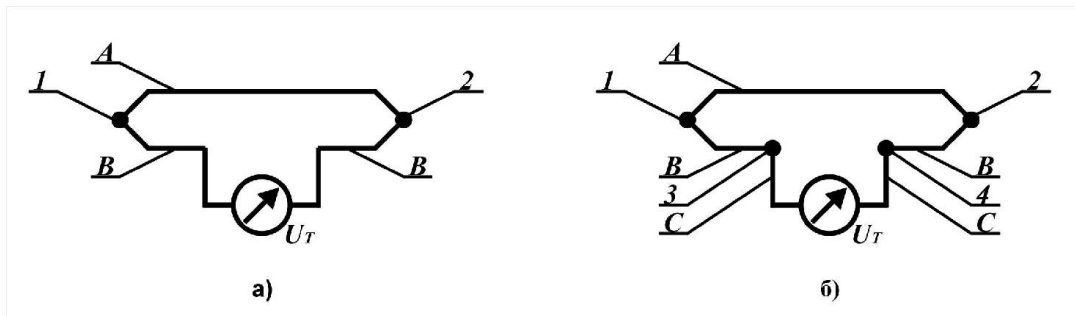


Рис. 2.95. Термоелектричний контур:
а – з двох провідників; б – з трьох провідників

У такому контурі індукована теплом різниця потенціалів (термо-ЕРС) називається напругою Зеєбека та утворюється трьома складовими:

- об'ємною, зумовленою виникненням різниці потенціалів на кінцях провідника (напівпровідника), що мають різну температуру; пояснюється тим, що носії зарядів на гарячому кінці набувають вищих енергії і швидкості, і вони дифундують до холодного кінця, таким чином, основні носії накопичуються на холодному кінці провідника, а на гарячому виникає потенціал протилежного знака;
- контактною, зумовленою температурною залежністю контактної різниці потенціалів місць з'єднання провідників;
- фононною, зумовленою захопленням електронів фононами, при переміщенні останніх від гарячого кінця до холодного, фонони стикаються з основними носіями заряду і захоплюють їх за собою; при низьких температурах фононна складова може бути в десятки і сотні разів більше перших двох.

Напругу Зеєбека можна записати у вигляді статичного ряду від різниці температур:

$$E_T = \alpha_1(T - T_0) + \alpha_2(T - T_0)^2 + \dots + \alpha_n(T - T_0)^n \quad (2.76)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – температурно-незалежні коефіцієнти; T – температура спаю; T_0 – деяка задана температура калібрування.

Для більшості матеріалів потрібно приблизно вісім коефіцієнтів α_i , щоб отримати похибку визначення термо-ЕРС не більше $\pm 1\%$.

Для багатьох комбінацій матеріалів у вузькому інтервалі температур можна вважати, що

$$E_T = \alpha_1(T - T_0), \quad (2.77)$$

де α_1 – коефіцієнт Зеєбека.

Таким чином, можна сформулювати закони термоелектричного контуру.

Перший. Для отримання термо-ЕРС контур повинен складатися з різнорідних матеріалів.

Другий. Алгебраїчна сума всіх термо-ЕРС в контурі, що складається з будь-якої кількості з'єднань різних матеріалів, буде завжди дорівнювати нулю, якщо всі з'єднання знаходяться при однакових температурах.

Це означає, що при включенні в будь-яке плече контуру додаткового матеріалу C (рис. 2.95, б) результуюча термо-ЕРС в контурі не зміниться за умови, що обидва нових з'єднання (спаї 3 і 4) матимуть однакову температуру. Звідси випливає, що термоелектричний контур можна розімкнути в будь-якому місці та включити в нього додаткові матеріали. Кількість додаткових матеріалів необмежена, необхідно підтримувати тільки однакову температуру в місцях їх з'єднань.

Таким чином, якщо відомі термо-ЕРС E_1 і E_2 двох провідників A і B при їх приєднанні до третього провідника C , то результуюча напруга при безпосередньому контакті провідників A і B дорівнюватиме алгебраїчній сумі термо-ЕРС E_1 і E_2 , тобто

$$E_T = E_{AB}(T) + E_{BC}(T_1) + E_{CB}(T_1) + E_{BA}(T_0) = E_{AB}(T - T_0). \quad (2.78)$$

Третій. Якщо два з'єднання різних матеріалів A і B , що знаходяться відповідно при температурах T і T_1 , виробляють термо-ЕРС E_{T1} , а при температурах T_1 і T_0 – термо-ЕРС E_{T2} , то при температурах T і T_0 вихідна ЕРС визначається сумою двох термо-ЕРС E_{T1} і E_{T2} .

Третій закон дозволяє градувати (калібрувати) термопару в одному температурному діапазоні, а використовувати в іншому, і його називають законом проміжних температур.

З практичної точки зору використання термопар полягає в вимірюванні різниці термо-ЕРС між спаями.

Один спай розміщується в середовищі, де здійснюється вимір температури. Цей спай називають гарячим спаєм або робочим спаєм.

Другий спай – розташовується в середовищі, де температура є величиною незмінною або відносно малою порівняно з вимірюваною температурою. Цей спай називають холодним або вільним спаєм.

Якщо обидва спаї знаходяться в однакових умовах, тобто при однаковій температурі, то термо-ЕРС спаїв рівні між собою і протилежні за знаком, отже, струм у замкнутому контурі різнорідних провідників відсутній. Якщо температура одного зі спаїв зміниться, то в замкнутому контурі різнорідних провідників почне протікати електричний струм, величина якого пропорційна різниці температур спаїв.

Нехай температура гарячого спаю становить T_1 , а температура холодного – T_2 , тоді, виходячи з виразу (2.77), термо-ЕРС гарячого і холодного спаїв будуть визначатись як:

$$E_H = \alpha_1(T_1 - T_0); \quad (2.79)$$

$$E_C = \alpha_1(T_2 - T_0) \quad (2.80)$$

Результуюча термо-ЕРС визначається як різниця термо-ЕРС гарячого і холодного спаїв:

$$E_T = E_H - E_C = \alpha_1(T_1 - T_2) \quad (2.81)$$

До матеріалів для виготовлення термоелектродів висуваються спеціальні вимоги:

- велике значення термо-ЕРС;
- лінійність статичної характеристики;
- висока жаростійкість;
- відсутність окиснення при високих температурах;
- малий температурний коефіцієнт опору;
- висока стабільність фізичних властивостей із впливом часу у всьому діапазоні вимірюваних температур;
- взаємозамінність при виробництві великими партіями зі збереженням незмінних фізичних властивостей.

Для оцінки величини питомої термо-ЕРС різних матеріалів як порівняльний використовується термоелектрод з платини, яка має високу температуру плавлення, її нескладно отримати в хімічно чистому вигляді, оскільки вона має постійні термоелектричні властивості.

Таблиця 2.3

Термо-ЕРС матеріалів					
Матеріал	Термо-ЕРС, мВ/°С	Матеріал	Термо-ЕРС, мВ/°С	Матеріал	Термо-ЕРС, мВ/°С
Сурма	+4,7	Мідь	+0,76	Алюміній	+0,40
Хромель	+2,4	Золото	+0,75	Ртуть	+0
Ніхром	+2,2	Цинк	+0,75	Паладій	-0,57
Залізо	+1,8	Срібло	+0,72	Нікель	-1,5
Молибден	+1,2	Іридій	+0,65	Алюмель	-1,7
Вольфрам	+0,8	Олово	+0,42	Константан	-3,4
Манганін	+0,76	Магній	+0,42	Копель	-4,5

Залежність термо-ЕРС від температури робочого спаю при нульовій температурі вільних кінців називається номінальною статичною характеристикою перетворювача (НСХ). Вона задається у вигляді градувальних таблиць або графіків і визначається в ДСТУ 3044-84 «Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворювання». Цей же документ нормує типи термоелектричних перетворювачів.

Таблиця 2.4

Типи термоелектричних перетворювачів

Тип ТЕП	Позначення НСХ	Матеріал термоелектроду		Температура, °С	
		позитивного	негативного	мін.	макс.
ТВР	ВР(А)-1	Сплав вольфрам-реній ВР 5 (95 % W+5 % Re)	Сплав вольфрам-реній ВР20 (80 %W+20 %Re)	0	1800
	ВР(А)-2			0	1800
	ВР(А)-3			0	2500
ТПР	ПР (В)	Сплав платинородій ПР-30 (70 %Pt+30 %Rh)	Сплав платинородій ПР-6 (94 %Pt+6 %Rh)	300	1600
ТПШ	ПП (S)	Сплав платинородій ПР-10 (90 %Pt+10 %Rh)	Платина Пл Т (Pt)	0	1300
	ПП (R)	Сплав платинородій ПР-13(87 % Pt+13 %Rh)		0	1300
ТХА	ХА (К)	Сплав хромель Т НХ9,5 (90,5 %Ni+9,5 % Cr)	Сплав алюмель НМц АК2-2-1(94,5 %Ni+ +5,5 %Al,Si,Mn,Co)	-200	1000
ТХК	ХК (L)		Сплав копель МНМц 43-0,5(56 %Cu+44 %Ni)	-200	600
	ХК (E)		Сплав константан (55 % u+45 %Ni,Mn,Fe)	-200	700
ТМК	МК (M)	Мідь МІ (Cu)	Сплав копель МНМц 43-0,5(56 %Cu+44 %Ni)	-200	100
	МК (T)		Сплав константан (55 %Cu+45%Ni,Mn,Fe)	-200	400
ТЖК	ЖК (J)	Залізо (Fe)		-200	700

Термопара є перетворювачем температури, статична характеристика якого відображає залежність величини термо-ЕРС від температури гарячого спаю (рис. 2.96, а).

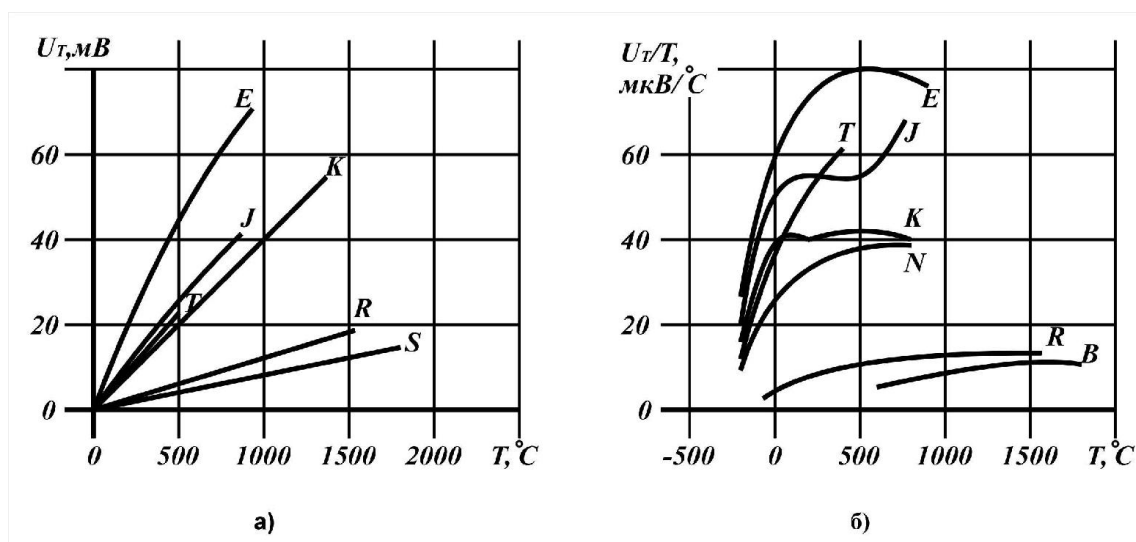


Рис. 2.96. Характеристики термоелектричних перетворювачів:
а – статична характеристика; б – залежність чутливості від температури

Як вже відзначалось, температурний коефіцієнт у виразі (2.76) має нелінійний характер, що спонукає розподіляти весь діапазон вимірювань приблизно на вісім ділянок для опису рівняння температурного перетворення. Це має пряме відображення на змінюваний характер чутливості термоперетворювачів у діапазоні вимірювань (рис. 2.96, б). Але, як показує практика, для певного температурного діапазону можливо підібрати термопару, яка забезпечить необхідну точність і лінійність характеристики.

Загальна коротка характеристика різновидів термопар.

Термопара хромель-алюмель (ТХА, тип К). Використовується для вимірювання температур у діапазоні від -200°C до $+1100^{\circ}\text{C}$. У діапазоні температур від 200°C до 500°C може виникнути ефект гістерезису, коли показання при нагріванні й охолодженні можуть відрізнитися. У деяких випадках різниця досягає 5°C . Працює в нейтральній атмосфері, а також в атмосфері з надлишком кисню. Після термічного старіння вихідний сигнал знижується. Може статися зміна термо-ЕРС при використанні в розрідженій атмосфері, тому що хром може виділятися з Ni-Cr термоелектроду (так звана міграція). При цьому термопара показує занижену температуру. Атмосфера сірки шкідлива для термопари, тому що негативно впливає на обидва електроди.

Термопара хромель-копель (ТХК, тип L) і хромель-константан (ТХКн, тип E). Використовується для вимірювання температур у діапазоні від -200°C до $+800^{\circ}\text{C}$. Має найвищу чутливість з усіх промислових термопар.

Термопара залізо-константан (ТЖК, тип J). Використовується для вимірювання температур у діапазоні від -203°C до $+750^{\circ}\text{C}$. Працює в відновлювальному та окисному середовищах. Добре працює в розрідженій атмосфері. При температурах вище 500°C необхідна наявність газощільного захисту термопари, якщо в середовищі вимірювання присутня сірка. Має високу чутливість, невисоку вартість, оскільки до складу термопари входить залізо. На електроді з заліза може утворитися іржа через конденсацію вологи. Показання підвищуються після термічного старіння.

Термопара мідь-константан (ТМК, тип T) і мідь-копель (ТМК, тип M). Використовується для вимірювання температур у діапазоні від -250°C до $+400^{\circ}\text{C}$. Може працювати в окислювальній або відновлювальній атмосфері, а також у вакуумі. Найбільш точна термопара для вимірювання температур діапазону від 0°C до $+250^{\circ}\text{C}$. Не рекомендується використання термопар даного типу при температурах вище 400°C . Не чутлива до підвищеної вологості. Обидва термоелектроди можуть бути випалені для видалення матеріалів, що викликають термоелектричну неоднорідність.

Термопара ніхросил-нісіл (ТНН, тип N). Використовується для вимірювання температур до $+1200^{\circ}\text{C}$. Це відносно новий тип термопари, розроблений на основі термопари типу К, яка може легко забруднюватися домішками при високих температурах. Сплавляючи обидва електроди з кремнієм, можна тим самим забруднити термопару заздалегідь, і таким чином знизити ризик подальшого забруднення під час роботи. Висока стабільність при температурах від $+200^{\circ}\text{C}$ до $+500^{\circ}\text{C}$ (значно менший гістерезис, ніж для

термопари типу К). Вважається найточнішою термопарою з неблагородних металів.

Термопара ВР5-ВР20 (ТВР, тип А). Використовується для вимірювання високих температур у діапазоні від +1300°C до +2500°C. Може працювати в інертній атмосфері або вакуумі. Має хороші механічні властивості при високих температурах.

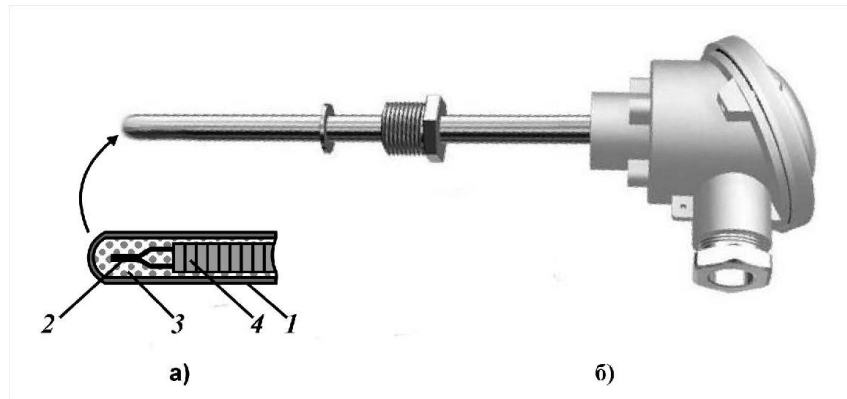
Термопара вольфрам-молібден (ТВМ). Використовується для вимірювання високих температур у діапазоні від +1400°C до +1800°C. Може працювати в інертному середовищі, а також в середовищі водню або вакуумі. Має низьку чутливість, невисоку вартість порівняно з іншими термопарами для вимірювання високих температур.

Термопара платинородій-платина (ТПП, тип S, R). Використовується для вимірювання температур у діапазоні від +300°C до +1400°C. Може працювати в окисній та інертній атмосферах. При наявності захисту може використовуватися в відновлювальних середовищах. Не рекомендується застосування при температурі нижче +300°C, бо термо-ЕРС в цій області температур мала і вкрай нелінійна. Дає високу точність вимірювань, має хорошу відтворюваність і стабільність термо-ЕРС. Використовується як еталонна термопара. Має високу вартість. Чутлива до хімічних забруднень металевими і неметалевими домішками.

Термопара платинородій-платинородій (ТПР, тип В). Використовується для вимірювання температур у діапазоні від +600°C до +1600°C. Може працювати в окисному і нейтральному середовищах. Можливе використання у вакуумі, при наявності захисту – у відновлювальних середовищах. Не рекомендується застосування при температурі нижче +600°C, де термо-ЕРС дуже мала і нелінійна. Дає високу точність вимірювань, має хорошу відтворюваність і стабільність термо-ЕРС. Використовується як еталонна термопара. Має високу вартість. Чутлива до хімічних забруднень металевими і неметалевими домішками.

Типова конструкція датчика температури складається з двох частин. Перша – вимірювальна частина, друга – приєднувальна камера (рис. 2.97, б). Вимірювальна частина являє собою металеву трубку, у якій розташована термопара. У приєднувальній камері є клемник для підключення з'єднувального кабелю. У ряді випадків у даній камері розташовується електричний і нормуючий перетворювачі.

Термоелектричний перетворювач (рис. 2.97, а) являє собою металевий корпус 1 у вигляді трубки, у якій розташовано спай термоелектродів 2, що виготовлені з дроту. Ці електроди протягнуто через керамічні ізолятори 4 в приєднувальну камеру. Порожнечі заповнені дрібнодисперсним термопровідним діелектричним матеріалом 3. Таким чином, забезпечується ізоляція термоелектродів від корпусу, амортизація спаю та електродів при термічному розширенні, а також покращується теплопровідність від корпусу до спаю.



**Рис. 2.97. Приклад термоелектричного датчика температури:
а – конструкція термоелектричного перетворювача; б – зовнішній вигляд
термоелектричного датчика**

Правильне вимірювання температури можливо лише при сталості температури холодних спаїв. З'єднувальні дроти призначені для видалення холодних спаїв термопари на якомога більшу відстань від об'єкта вимірювання, тобто від зони з мінливою температурою. З'єднувальні дроти повинні бути термоелектричними, подібно термоэлектродам термопари. Отже, провідники кабелю, за допомогою якого термопару приєднують до вимірювального пристрою (пристрою керування), мають бути з того ж матеріалу, що і термоелектроди термопари. І це є суттєвим недоліком термоелектричних перетворювачів. У разі, коли термопара виконана з неблагородних металів, таке під'єднання можливо реалізувати, хоч це призводить до підвищення витрат, а якщо термопара зроблена з використанням благородних металів, таке практично неприйнятне. У таких випадках первинну обробку сигналу з термопари здійснюють за допомогою електричного перетворювача, який розташований безпосередньо в приєднувальній камері датчика. Електричний перетворювач зазвичай поєднує і нормалізатор сигналу, таким чином на виході формується сигнал у вигляді напруги або струму одного із стандартних діапазонів.

В ідеалі холодний спай повинен знаходитися при постійній температурі. Але на практиці таке реалізувати або неможливо, або необґрунтовано дорого. Тому при вимірюванні температури за допомогою термоелектричних перетворювачів потрібно враховувати коливання температури холодного спаю і вносити відповідні поправки при вимірюванні.

Компенсацію такої похибки можна здійснити за рахунок використання у вимірювальній схемі терморезистора, який буде вносити поправку у вимірювальну схему при відхиленні температури холодного спаю (рис. 2.98).

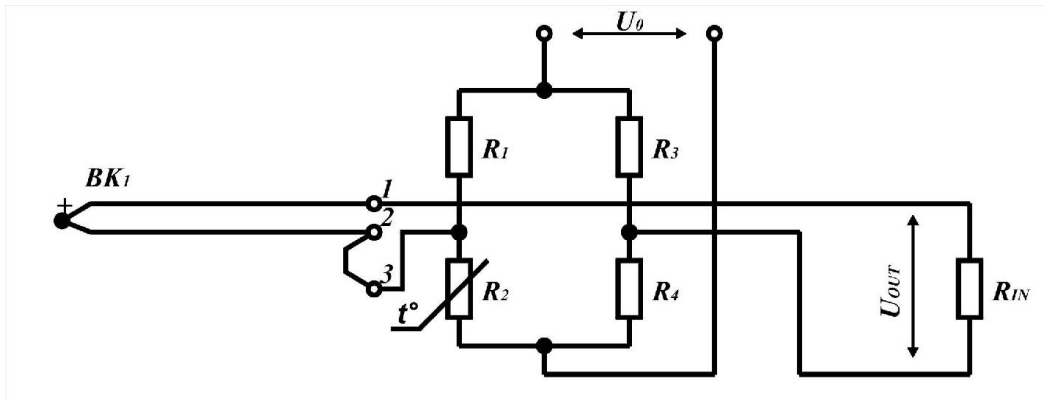


Рис. 2.98. Схема компенсації нестабільності температури холодного спаю термоелектричного перетворювача

Цей метод передбачає, що холодний спай і терморезистор повинні бути розташовані поруч, тобто в однакових температурних умовах. Зазвичай під'єднання здійснюється за допомогою клем, що розташовані на ізотермічній панелі разом з терморезистором. Це найбільш якісно забезпечує рівність температур холодного спаю і терморезистора. Згідно з наведеною схемою термопара під'єднана до клем 1 і 2 умовно з матеріалами термоелектродів *A* і *B* відповідно. Клеми 2 і 3 з'єднані перемичкою з матеріалу *A*, таким чином утворюється холодний спай безпосередньо на клемі 2. Від клем 1 і 3 до вимірювальної схеми провідники можуть бути з будь-якого матеріалу, головне – щоб з однакового. На клемі 1 і 3 також утворюються спаї і на них виникає термо-ЕРС. За умови, що ці спаї однакові, то згідно з другим законом Зеєбека термо-ЕРС цих спаїв буде однаковою за величиною і протилежною за знаком, і тому не буде впливати на вимірювання.

Величини резисторів моста вибираються таким чином, що при градуовальній температурі холодних спаїв термопари міст знаходиться в рівновазі, тобто різниця потенціалів на вихідних вершинах моста дорівнює нулю. У разі зміни температури холодних спаїв змінюється опір терморезистора, унаслідок чого порушується рівновага моста і на його вихідних вершинах виникає різниця потенціалів. Ця різниця потенціалів однакова за величиною і протилежна за знаком зміни термо-ЕРС термопари, яка викликана відхиленням температури її холодних спаїв від градуовальної.

Як вже відмічалось, основне призначення термоелектричних перетворювачів – вимір температури. Але термопари знайшли широке застосування в засобах автоматики як захисні елементи, елементи автоматичного аварійного відключення, елементи блокування, що пов'язані з контролем температури, особливо в області високих температур.

Прикладом використання термопари для реалізації функції автоматичного аварійного відключення є система автоматичного відключення подачі палива газового котла у разі погасання полум'я.

Гарячий спай термопари розміщується в полум'я пальника, холодний спай має температуру навколишнього середовища. За рахунок різниці температур на

виході термопары виникає термо-ЕРС, яка є джерелом живлення для котушки електромагніту, що відкриває клапан подачі палива. До тих пір, поки горить паливо, температура, що діє на термопару, висока і за рахунок енергії термо-ЕРС термопары електромагніт тримає клапан подачі палива в відкритому стані. У разі загасання полум'я температура швидко знижується, що призводить до зниження величини термо-ЕРС термопары практично до нуля і, як наслідок, електромагніт втрачає живлення і під дією пружини клапан подачі палива переходить у закритий стан.

Особливі моменти даного прикладу такі: перше – система захисту належить до категорії «прямої дії», тобто без посередніх елементів датчик діє на виконавчий пристрій, друге – система працездатна без зовнішнього джерела живлення, тобто відключення електромережі не впливає на роботу захисту.

Висновок відносно переваг і недоліків термопар. Переваги термопар: широкий діапазон температур вимірювання, спай термопары може мати прямий контакт з об'єктом вимірювання температури, великий термін служби. Недоліки: необхідність контролю температури холодних спаїв, нелінійність характеристик у широкому діапазоні температур, необхідність монтажу термоелектричних перетворювачів за допомогою спеціальної кабельної продукції.

2.5.12 П'єзоелектричні перетворювачі

Пристрій, у якому використовується п'єзоелектричний ефект, для перетворення змінних механічних зусиль у кількість електрики чи, навпаки, електричного сигналу в механічне переміщення, називається п'єзоелектричним перетворювачем. П'єзоелектричні перетворювачі належать до генераторних первинних перетворювачів. Ці пристрої застосовуються для вимірювання вібрацій, змінних тисків, зусиль та ін.

Принцип дії п'єзоелектричних перетворювачів оснований на прямому п'єзоелектричному ефекті, появи електричних зарядів на гранях деяких діелектриків при їхній деформації. При цьому використовуються такі діелектрики: кварц, сегнетова сіль, титаніт барію та ін.

П'єзоелектричний перетворювач являє собою пластину, вирізану з кварцу (рис. 2.99). Діелектричні властивості виявляються залежно від орієнтації осей кристала. Головна вісь – оптична z , перпендикулярні до неї осі – електрична x і механічна y .

Електрична вісь x з'єднує симетричні грані кристала, у яких електричний заряд має найбільше значення. Під дією сили F_x уздовж осі x на гранях пластини f_x , перпендикулярних до осі x , виникають різнополярні заряди q_x , тобто поздовжній п'єзоэффект. Величина цих зарядів у межах пружної деформації перебуває на лінійній залежності від прикладеної сили, тобто

$$q_x = k_n F_x \quad (2.82)$$

де k_n – п'єзомодуль матеріалу пластини.

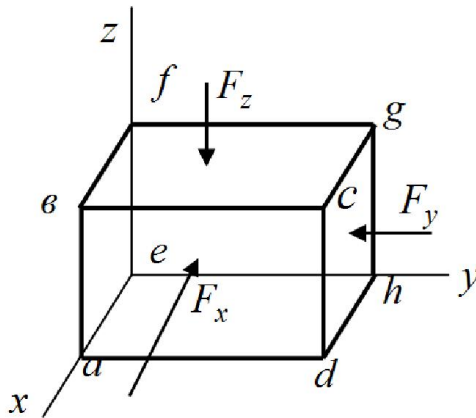


Рис. 2.99. П'єзоелектричний елемент

Під дією сили F_y уздовж осі y на тих самих гранях виникають різнополярні електричні заряди q'_x – поперечний п'єзоэффект. Величина q'_x залежить не тільки від F_y , але й від розмірів граней п'єзоелемента, а саме:

$$q'_x = -k_n \frac{f_x}{f_y} F_y \quad (2.83)$$

де f_x, f_y – площі граней, перпендикулярних до осей x, y відповідно.

Заряди протилежних граней рівні між собою і мають різні знаки, що визначаються напрямком сили F_x (стискування, розтягання). Під дією сили F_z п'єзоэффект не спостерігається.

При прямих зрізах уздовж осей заряди виникають тільки на гранях, перпендикулярних до осей x, y . При косих зрізах заряди утворюються і на інших гранях, але меншої величини.

Напруга на обкладинках граней f_x за відсутності навантаження визначається як

$$E = \frac{q_x}{C_n} \quad (2.84)$$

де C_n – ємність п'єзоелектричного перетворювача.

Ємність п'єзоелектричного перетворювача визначається виразом:

$$C_n = \frac{\epsilon f_x}{d} \quad (2.85)$$

де d – товщина пластини п'єзоелемента.

Одним з найпоширеніших матеріалів для п'єзоелектричних перетворювачів є кварц, який має такі характеристики: п'єзомодуль кварцу $k_n = 23 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, $\epsilon = 40 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, модуль пружності $E_y = 17 \cdot 10^{10}$ Па.

Залишкові деформації не виникають при навантаженнях, менших від $(1 \dots 10) \cdot 10^7$ Па.

Еквівалентна схема п'єзоелектричного перетворювача утворюється поєднанням джерела живлення ε з реактивною складовою, що описується ємністю C та активним опором R (рис. 2.100).

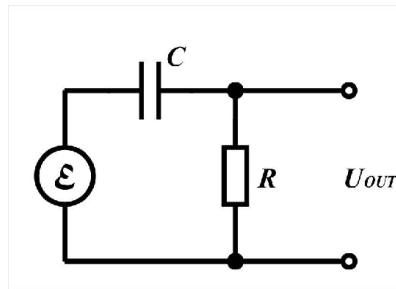


Рис. 2.100. Еквівалентна схема п'єзоелектричного елемента

Величина вихідного сигналу буде визначатися таким виразом:

$$U_{OUT} = \frac{k_n F_x}{C_n} \quad (2.86)$$

Вхідна частина вимірювальної схеми може впливати на вихідну величину п'єзоелектричного елемента у разі, якщо вона характеризується не достатньо високим активним опором R_{IN} та має суттєву ємність C_{IN} .

Чутливість перетворювача визначається формулою

$$S = \frac{dU_{OUT}}{dF_x} = \frac{k_n}{C_n} \quad (2.87)$$

Для підвищення чутливості перетворювач виготовляють з декількох пластин, розташовуючи їх стовпчиком і з'єднуючи паралельно (з електричної точки зору).

Слід зазначити, що дія механічного зусилля на п'єзоелектричний елемент схожа на те, як діє магнітне поле на котушку індуктивності. А саме: щодо індуктивності – тільки змінне магнітне поле викликає утворення ЕРС в котушці і щодо п'єзоелектричного елемента – тільки змінна величина зовнішнього зусилля викликає розглянутий п'єзоэффект. Таким чином, при статично прикладеному зусиллі п'єзоэффект не виникає.

На основі п'єзоелектричних перетворювачів виготовляють датчики для вимірювання динамічних зусиль, прискорення, вібрацій та різноманітного контролю звукових коливань, у тому числі й ультразвукового діапазону. Причому слід звернути увагу на те, що можлива побудова датчиків, у яких здійснюється контроль ультразвукових коливань, що випромінюються безпосередньо об'єктом, а також побудова датчиків, які самі є джерелом ультразвукових коливань і виконують вимір цих коливань з метою отримання інформації щодо об'єкту, за яким здійснюється контроль. Наприклад, побудова датчика для вимірювання відстані шляхом вимірювання часу, за який ультразвукові коливання пройдуть шлях від джерела ультразвукових коливань

до об'єкта, та, відбившись від нього, повернуться до п'єзоелектричного перетворювача.

Найбільш поширеними джерелами ультразвукових коливань є перетворювачі, такі як електростатичний перетворювач, перетворювач зі згинними пластинами і мембранний перетворювач (рис. 2.101).

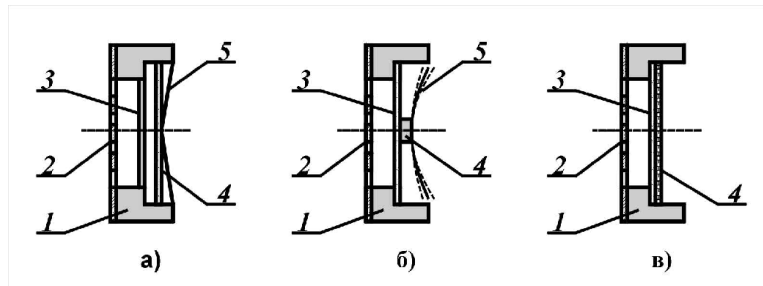


Рис. 2.101. П'єзоелектричний випромінювач:
а – електростатичний; б – мембранний; в – зі згинними пластинами

Електростатичний ультразвуковий перетворювач (рис. 2.101, а).

Основними елементами такого перетворювача є тонка металізована пластикова плівка 3 (фольга) та борозниста металева пластина 4, які разом утворюють конденсатор, що розташований у корпусі 1 з перфорованою кришкою 2. Пластина 4 поєднана з пластинчатою пружиною 5.

У разі підключення до пластини зовнішньої постійної напруги електростатична сила впливає на фольгу 3 й пластину 4, що приводить до їх взаємного притягнення. Змінна напруга певної частоти, яка накладається на постійну напругу, викликає вібрування фольги з тією самою частотою. «Підпірка» постійною напругою необхідна через те, що сила, яка діє на фольгу, пропорційна квадрату прикладеної напруги, і при використанні тільки змінної напруги буде потрібна вдвічі більша за амплітудою напруга.

Основні характеристики ультразвукового перетворювача:

- широка смуга пропускання;
- малий час затухання й наростання сигналу;
- відносно низький акустичний тиск;
- відкрита конструкція.

Ультразвуковий перетворювач зі згинними пластинами (рис. 2.101, в).

У корпусі 1, що закритий перфорованою кришкою 2, розташований випромінювач, що являє собою диск із склеєних п'єзокерамічної 3 і металевої 4 пластин. При підключенні зовнішньої напруги діаметр п'єзокерамічного диска 3 змінюється, що створює зусилля зсуву й викликає вигин з певною амплітудою всієї системи з двох дисків.

Основні характеристики цих перетворювачів:

- високі показники електроакустичного перетворення;
- відносно низька частота;
- низький рівень звукових сигналів;
- вузька смуга пропускання (резонансна система);

- великий час затухання;
- можлива герметизована конструкція.

Мембранний перетворювач (рис. 2.101, б). Цей перетворювач має пружну мембрану 5, виконану з металу, що збуджується із власним циклом коливань п'єзокерамічним елементом 3 через елемент 4, що їх поєднує.

Основні характеристики мембранного перетворювача:

- широка діаграма спрямованості випромінювання;
- відносно низька частота;
- низький рівень звукових сигналів;
- вузька смуга пропускання (резонансна система);
- великий час затухання;
- відкрита конструкція (висока напруга).

На цей час виготовляють різноманітні за призначенням датчики, у яких використано принцип формування імпульсу ультразвукових коливань, і за виміром його відбитка можна отримати ту чи іншу інформацію про об'єкт. Наприклад, датчик рівня рідини в резервуарі – за відбитком сигналу ультразвукових коливань від поверхні рідини визначається поточне значення рівня.

2.5.13 Перетворювачі кутових переміщень

Енкодер – це різновид перетворювачів кутових переміщень, які можуть застосовуватися як перетворювачі кутових, так і перетворювачі лінійних переміщень. Перетворювач кутових переміщень – пристрій, який призначений для перетворення кута повороту обертового об'єкта (вала) в електричні сигнали, що дозволяють визначити кут його повороту.

Енкодери знайшли широке застосування в машинобудуванні, де висувуються високі вимоги до точності вимірювань і роздільної здатності.

У даний час існують енкодери, у яких як первинні перетворювачі використовуються оптичні (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори) та магніточутливі елементи (магніторезистори, магніодіоди, перетворювачі Холла). Відрізняються вони лише принципом отримання первинного сигналу, а принцип перетворення кутового переміщення у них однаковий. Далі розгляд енкодерів буде на основі оптичних первинних перетворювачів.

За принципом перетворення кутового переміщення в кодову інформацію енкодери поділяються на абсолютні й відносні (інкрементальні). І ті й інші мають свої переваги і недоліки.

Абсолютні енкодери формують сигнал, який несе інформацію про абсолютне (конкретне) положення поворотного механізму в поточний момент часу.

Відносні енкодери формують сигнал, який несе інформацію про стан поворотного механізму відносно деякого початкового положення в поточний момент часу.

Несучою інформацією в обох видах енкодерів є інформація про величину переміщення у вигляді деякого коду, який може набувати нехай велику, але

кінцеву кількість значень. Назва енкодера пішла від «кодування в N-значень» (перетворення кута в одне з N значень).

Конструктивно енкодери являють собою деякий корпус, у якому розташована вимірювальна система, яка в свою чергу пов'язана (з елементами, що виходять назовні) механічно з вимірювальним валом і електрично – з роз'ємом для підключення до входу пристрою керування (рис. 2.102).



Рис. 2.102. Приклад зовнішнього вигляду енкодера

Вимірювальна система абсолютних і відносних енкодерів у цілому однакова і складається з кодового диска, який розташований на вимірювальному валу, і оптичної системи, яка розміщується по обидва боки від кодового диска (з одного боку джерела світла, а з другого – фотоприймачі). Відмінність полягає в кодовому диску і відповідно в коді, що формується в результаті перетворення.

Абсолютні енкодери

Вимірювальна система абсолютного енкодера (рис. 2.103, а) складається з поворотної осі 1, змонтованої на двох прецизійних підшипниках, кодового диска 2, встановленого на вісь, а також оптоелектронної зчитувальної матриці 3, 4 і схеми обробки сигналу (на рисунку не показана).

В оптоелектронній зчитувальній матриці джерелом світла 3 частіше є світлодіоди, промені яких просвічують кодовий диск і потрапляють на матрицю світлочутливих елементів 4 (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори найчастіше фотодіоди), розташовану за зворотнім боком кодового диска. Кодовий диск складається з прозорих і непрозорих для світлового потоку ділянок.

Коли світловий потік проходить через прозору ділянку і потрапляє на фотоприймач, на виході формується логічний сигнал високого рівня. У результаті перекриття світлового потоку непрозорою ділянкою на виході фотоприймача формується логічний сигнал низького рівня. Сукупність декількох пар «джерело світла – фотоприймач» формують кодову комбінацію із сигналів високого і низького рівнів.

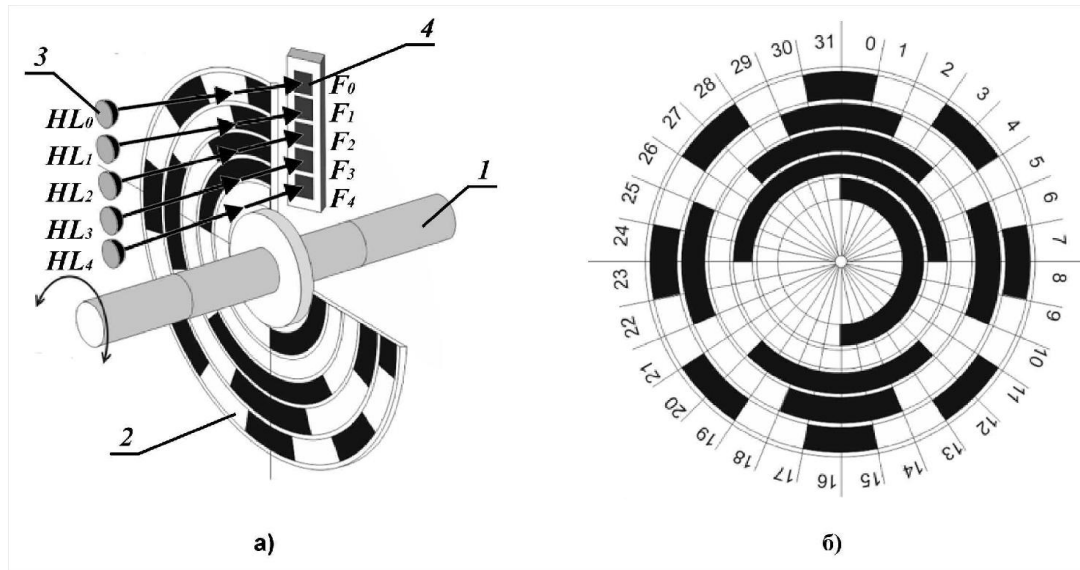


Рис. 2.103. Конструкція абсолютного енкодера:
а – вимірювальна система; б – кодуєчий диск

Кодовий диск абсолютного енкодера складається з n концентричних кіл (кількість кіл відповідає кількості фотоприймачів) і 2^n секторів (рис. 2.103, б). У наведеному прикладі кількість пар «джерело світла – фотоприймач» відповідає п'яти, таким чином, кодовий диск складається з п'яти кіл і 32-х секторів. Ділянки кіл у межах сектора робляться прозорими і непрозорими так, щоб утворився двійковий код, який відповідає номеру сектора. Фактично кількість секторів визначає кількість точок вимірювання за один оберт диска. Таким чином, від кількості секторів на обертовому диску залежить точність вимірювання кутового положення. Наприклад, при $n = 5$ на один оберт припадає $2^n = 2^5 = 32$ сектори і точність вимірювання не перевищує $360^\circ / 2^n = 360^\circ / 2^5 = 1125'$, а при $n = 10$ на один оберт припадає $2^n = 2^{10} = 1024$ сектори і точність вимірювання становить $360^\circ / 2^n = 360^\circ / 2^{10} = 03515625'$. Сучасні технологи дозволяють виготовити вимірювальну систему з показником n до 20 при зовнішньому діаметрі корпусу енкодера – до 80 мм.

Таким чином, при деякому положенні диска світловий потік буде потрапляти на фотоприймачі, які визначаються кодом відповідного сектора, що в свою чергу буде супроводжуватися формуванням відповідного вихідного коду. За значенням коду можна судити про положення вала (тобто положення об'єкта, що контролюється). Вихідний код є абсолютним значенням (абсолютним значенням кута або абсолютним значенням координати).

Виходячи з принципу дії перетворювача, при повороті кодового диска на один сектор на виході одна кодова комбінація переходить в іншу. Для прикладу розглянемо роботу абсолютного енкодера з розрядністю 5 і кодовим диском, який реалізує бінарний код (табл. 2.5).

Відповідність кодових комбінацій енкодера положенню вала

Положення вала (номер сектора)	Двійковий код	Код Грея
0	00000	00000
1	00001	00001
2	00010	00011
3	00011	00010
4	00100	00110
5	00101	00111
6	00110	00101
7	00111	00100
8	01000	01100
9	01001	01101
...
31	11111	10000

Розглянемо початкове положення – сектор 0 (код 00000). При повороті вала за годинниковою стрілкою диск прийме положення сектора 1 (код 00001), при подальшому повороті прийме положення сектора 2 (код 00010) і т.д. Обертання в зворотному напрямку буде приводити до зміни кодів у зворотній послідовності.

З таблиці видно, що при переході з одного положення в інше (з одного сектора в інший) в деяких випадках, змінюється стан декількох розрядів кодової комбінації. Наприклад, при переході з сектора 3 (код 00011) в сектор 4 (код 00100) змінюється стан відразу трьох розрядів, при переході з сектора 7 (код 00111) у сектор 8 (код 01000) змінюється одночасно стан чотирьох розрядів. Забезпечити одночасне перемикання фотоприймачів у всіх розрядах практично неможливо, зумовлено це неможливістю виготовлення випромінювачів світла і фотоприймачів з абсолютно однаковими параметрами. Тому в таких випадках у момент часу зміни секторів можливе формування ряду проміжних кодів, які не відповідають куту повороту. Наприклад, при переході з сектора 7 (код 00111) у сектор 8 (код 01000) на виході перетворювача можуть з'явитися в будь-якій послідовності такі кодові комбінації: 01111, 01011, 01110, 01000, 01100, 01101, 01010. У зв'язку з цим для забезпечення надійної роботи перетворювача необхідно, щоб при зміні сектора (зміні кодової комбінації) у вихідній кодовій комбінації змінювалося значення тільки в одному розряді. Цим вимогам відповідає код Грея, який має властивість безперервності бінарних комбінацій, тобто сусідні кодові комбінації відрізняються одна від одної тільки в одному розряді (табл. 2.5).

Оскільки код Грея не несе реальної числової інформації, то його перетворюють у стандартний бінарний код за допомогою перетворювача коду з використанням логічних функцій «виключне або» (XOR) програмними або апаратними засобами.

Абсолютний перетворювач кутових переміщень формує вихідний код, який строго відповідає поточному положенню вала (поточного сектору). Система вимірювання з використанням абсолютного енкодера після відключення і відновлення живлення не втрачає інформацію про положення вала і не вимагає позиціонування вала енкодера в початкову точку для коректного відліку положення. Це є перевагою абсолютних енкодерів. Істотний їх недолік – необхідність великої кількості (кількість розрядів коду плюс один загальний) сполучних проводів з пристроєм керування і невисока стійкість до електромагнітних перешкод, що особливо позначається при значній відстані енкодера від пристрою керування.

Відносні (інкрементальні) енкодери

Вимірювальна система відносного енкодера (рис. 2.104) дуже схожа з вимірювальною системою абсолютного енкодера (рис. 2.103, а). Конструкція відносного енкодера включає поворотний вал 1, змонтований на двох прецизійних підшипниках, кодовий диск, що складається з нерухомої 2 і рухомої 3 частин, а також оптоелектронну систему зчитування зі схемою обробки і формування сигналу 4, 5, 6, 7.

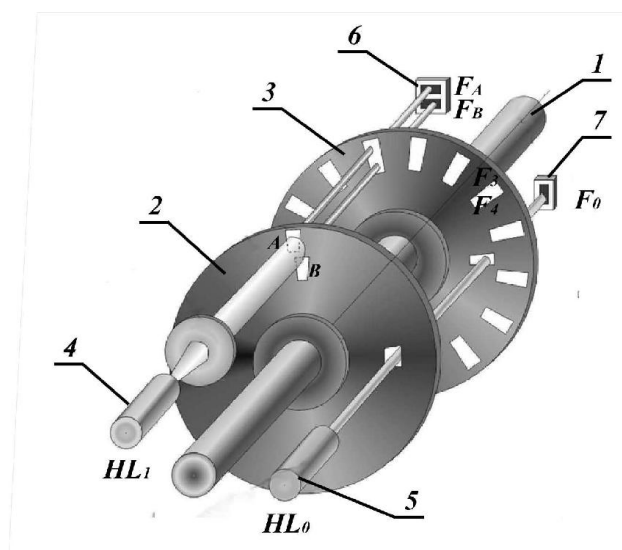


Рис. 2.104. Конструкція відносного енкодера

Як джерело світла частіше використовують світлодіоди 4, 5, промені якого формуються прозорими секторами нерухомого диска 2 і через прозорі сектори рухомого диска 3 потрапляють на світлочутливі елементи 6, 7 (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори найчастіше фотодіоди), які розташовані за зворотнім боком рухомого диска. Величина вихідного сигналу фотоелементів визначається інтенсивністю світлового потоку на відповідному фотоелементі, яка безпосередньо залежить від ступеня перекриття променя поворотним диском. У кінцевому підсумку в результаті обробки сигналів фотоприймачів формуються відповідним чином логічні сигнали, що визначають відносне положення вала.

На нерухомому диску розташовані два прозорих сектори А і В (два отвори), зміщені один відносно одного на чверть періоду проходження міток на кодовому диску.

Кількість світла, що потрапляє на фотоприймачі F_A і F_B , визначається положенням прозорої частини кодової доріжки відносно світлових потоків, які формуються секторами А і В. Вихідний сигнал вимірювальної системи матиме періодичний характер, тому робота пояснюється на прикладі повороту вала в межах одного сектора рухомого диска (рис. 2.105).

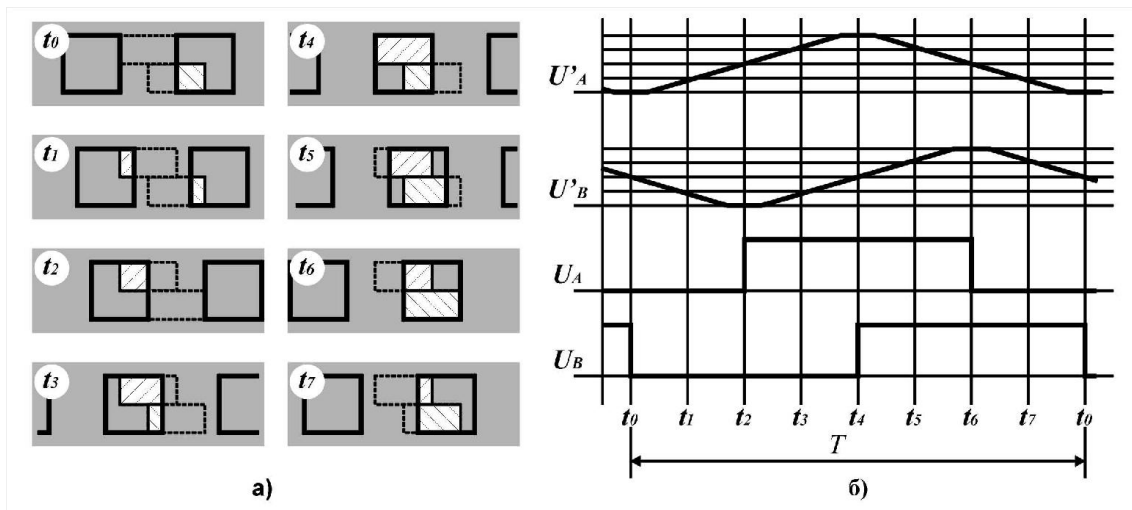


Рис. 2.105. Діаграма роботи вимірювальної системи відносного перетворювача кутових переміщень:
а – схема перекриття світлових потоків;
б – діаграма сигналів у вимірювальній системі перетворювача

У початковому положенні (момент часу t_0) на фотоприймач F_A світловий потік не надходить, а на фотоприймачі F_B світловий потік складає близько 50 %.

При повороті диска на $1/8$ періоду проходження секторів рухомого диска (момент часу t_1) на фотоприймачі F_A і F_B надходить близько 25 % світлового потоку.

При повороті диска ще на $1/8$ періоду (момент часу t_2) на фотоприймач F_A надходить близько 50 % світлового потоку, проте на фотоприймачі F_B він відсутній.

При повороті диска ще на $1/8$ (момент часу t_3) на фотоприймач F_A надходить близько 75 % світлового потоку, а на фотоприймач F_B – близько 25 %.

Наступний поворот диска на $1/8$ (момент часу t_4) приводить до того, що на фотоприймач F_A надходить близько 100 % світлового потоку, а на фотоприймач F_B – близько 50 %.

Поворот диска ще на $1/8$ (момент часу t_5) приводить до того, що на фотоприймачі F_A і F_B надходить близько 75 % світлового потоку.

У наступний поворот диска на $1/8$ періоду (момент часу t_6) на фотоприймач F_A надходить близько 50 % світлового потоку, а на фотоприймач F_B – близько 100 %.

І завершує вимірювальний період останній поворот на $1/8$ періоду (момент часу t_7): на фотоприймач F_A надходить близько 25 % світлового потоку, а на фотоприймач F_B – близько 75 %.

Амплітуда електричних сигналів фотоприймачів U'_A і U'_B пропорційна інтенсивності світлових потоків Φ_A і Φ_B відповідно. Після обробки сигналів U'_A і U'_B формуються сигнали з логічними рівнями відповідно U_A і U_B . Таким чином, формування імпульсу сигналу, неважливо U_A або U_B , несе інформацію про поворот валу на величину одного сектора. Напрямок обертання визначається випередженням або відставанням фази сигналу U_A відносно сигналу U_B (рис. 2.106). Такі сигнальні двоканальні послідовності, зрушені на 90 градусів, мають назву квадратурні сигнали.

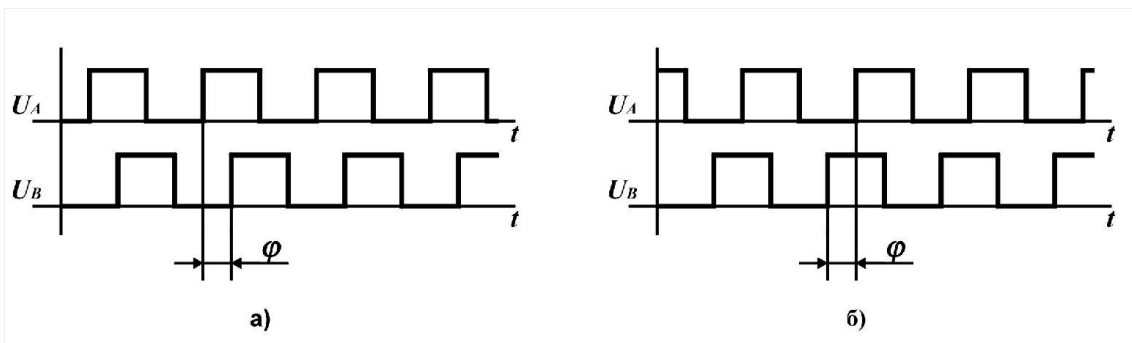


Рис. 2.106. Діаграма вихідних сигналів відносного енкодера:
а – рух вала в прямому напрямку; б – рух вала в зворотному напрямку

Крім розглянутих пар «джерело світла – фотоприймач», відносні енкодери містять ще одну пару для формування сигналу початкової позиції (початку відліку) U_0 . Даний сигнал формується у вигляді імпульсу на кожен повний оборот валу. За цим сигналом здійснюється синхронізація з точкою відліку, відносно якої ведеться відлік вимірюваної величини.

Підводячи підсумок, можна сказати, що відносні перетворювачі кутових переміщень дають інформацію про положення валу відносно початкової точки відліку.

Перевагою відносних енкодерів є мала кількість провідників для зв'язку з пристроєм керування, особливо це актуально при значній відстані енкодера від пристрою керування. Недоліком даних перетворювачів є можливість накопичення помилки при втраті імпульсів за рахунок перешкод і необхідність повторної прив'язки до точки відліку в разі відключення і відновлення живлення.

2.5.14 Безконтактні індуктивні датчики

Індуктивні безконтактні датчики – одні з найпоширеніших пристроїв у складі низового обладнання систем керування автоматизованим виробництвом. Індуктивні датчики знаходять широке застосування в машинобудуванні, харчовій, текстильній та інших галузях. Вони найбільш ефективно використовуються як кінцеві вимикачі в автоматичних лініях і верстатах, тому що індуктивні датчики спрацьовують тільки на метали і не чутливі до решти матеріалів.

Циліндрична конструкція індуктивних датчиків набула найбільшого поширення в промисловості. В структуру такого датчика (рис. 2.107) входить індуктивний первинний перетворювач, що складається з котушки 1 і сердечника 2. Індуктивність котушки разом з конденсатором утворюють коливальний контур, що визначає частоту коливань генератора 3, сигнал якого підсилюється підсилювачем 4. Об'єкт контролю – металева пластина 5, яка встановлюється безпосередньо на механізм, положення якого контролюється.

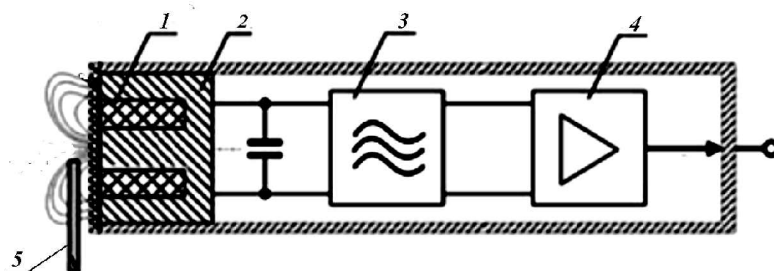


Рис. 2.107. Структура безконтактного індуктивного датчика

Котушка індуктивності виготовляється з розімкнутим феритовим сердечником. Магнітний потік котушки, який створюється генератором, замикається через повітряний зазор сердечника. Котушка індуктивності є складовою частиною коливального контуру генератора.

При попаданні контрольованого об'єкта 5 в електромагнітне поле датчика відбувається зміна індуктивності котушки L і, як наслідок, змінюється добротність коливального LC -контур. Таким чином, при наближенні металевого об'єкта до датчика збільшується вплив об'єкта на індуктивність котушки і зменшується амплітуда вихідного сигналу. Слід зазначити, що у металах не феромагнітного типу (мідь, алюміній), які попадають під дію змінного електромагнітного поля, наводиться вихровий контурний струм Фуко. Цей струм створює вихрове магнітне поле, яке і взаємодіє з полем котушки, змінюючи її індуктивність.

В індуктивних датчиках дискретного типу вихідний підсилювач поєднує і функцію порогового елемента у вигляді тригера Шмітта. Це забезпечує ступінчасте перемикання вихідного сигналу (рис. 2.108). Вихідним елементам датчика є біполярний транзистор, що працює в ключовому режимі, іноді – твердотільне реле.

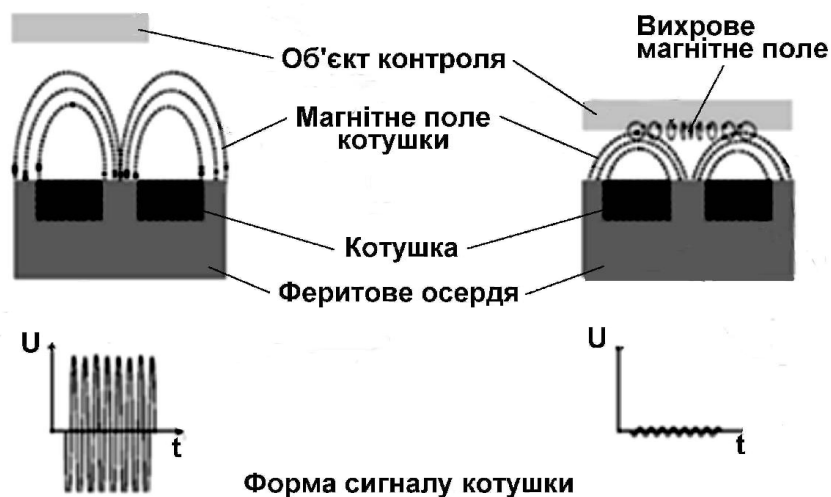


Рис. 2.108. Взаємодія індуктивного датчика з об'єктом

Основним параметром датчика є величина зазору – відстань від робочої поверхні датчика до об'єкта, при якому спрацьовує датчик. Ця величина залежить від температури навколишнього середовища, коливання напруги живлення і фізичних властивостей контрольованого об'єкта, тобто від матеріалу, з якого він виготовлений. За еталонний об'єкт прийнята сталева квадратна пластина (Сталь 37) товщиною 1 мм і площею, що в три рази більше активної площі датчика.

Для індуктивних датчиків уведений такий показник, як коефіцієнт редукції, який показує, наскільки змінюється величина зазору спрацьовування датчика порівняно з номінальним значенням, прийнятим для еталонного об'єкта. Так, для об'єктів з нержавіючої сталі номінальна величина зазору спрацьовування зменшується на 15 %, для об'єктів з алюмінію – на 60 %, а з міді – на 70 %.

Коефіцієнт редукції прийнято позначати буквою r з індексом, що вказує на матеріал, з якого виготовлений об'єкт. Наприклад, для алюмінію $r_{Al} = 0{4}$, для міді – $r_{Cu} = 0{3}$. Отже, при номінальному значенні $\delta = 20$ мм величина зазору спрацьовування для мідних об'єктів складатиме 6 мм.

Залежно від призначення статичні характеристики індуктивних датчиків бувають з виходом по струму або по напрузі. Номінальні напруги живлення складають 12 В, 24 В постійного струму або до 230 В змінного струму.

Статична характеристика в загальному вигляді (рис. 2.109) відображає залежність логічного рівня вихідного сигналу від відстані між контрольованим об'єктом і датчиком. Характеристика має релейний вигляд, основними параметрами якої є величина відстані спрацьовування і відпускання датчика.

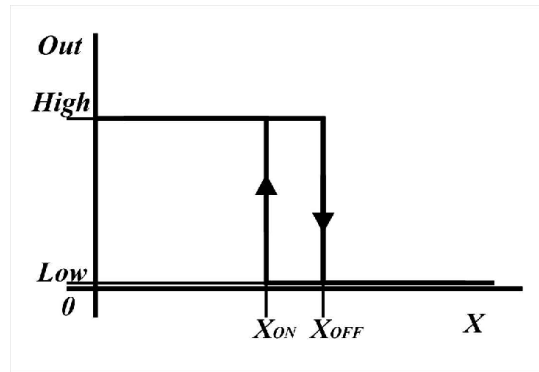


Рис. 2.109. Статична характеристика індуктивного датчика з дискретним виходом

Величина гістерезису характеризується коефіцієнтом повернення. Значення цього коефіцієнта залежать і від траєкторії наближення об'єкта до датчика. У тому випадку, коли об'єкт рухається вздовж осі датчика, значення параметрів відповідають паспортним даним. На практиці найчастіше наближення об'єкта відбувається перпендикулярно осі датчика. Величина зазору спрацьовування залежить у цьому випадку від площі взаємодії об'єкта з активною поверхнею датчика, і величину зазору спрацьовування визначають відповідно до графіка (рис. 2.110).

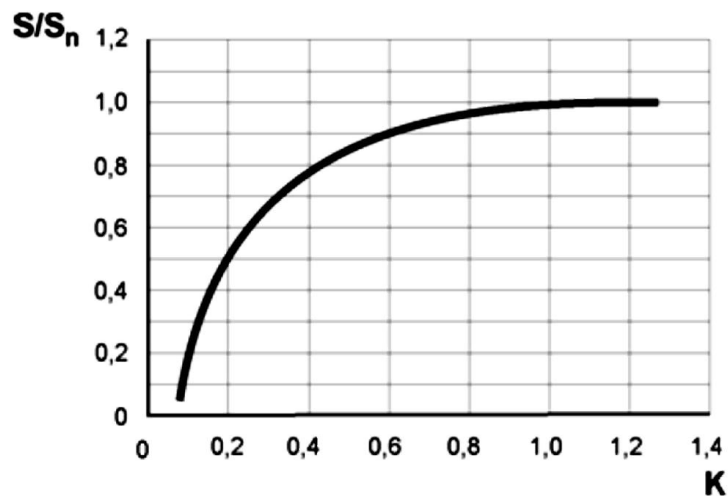


Рис. 2.110. Залежність відстані спрацьовування від площі взаємодії з об'єктом

Якщо площа взаємодії об'єкта з датчиком дорівнює або більше активної області датчика $K > 1$, то величина зазору спрацьовування відповідає номінальному значенню. Якщо площа взаємодії менше, величина зазору спрацьовування зменшується. Характеристики індуктивного циліндричного датчика з діаметром активної поверхні 12 мм наведені на рис. 2.111. При наближенні еталонного об'єкта вздовж поздовжньої осі датчика площа взаємодії максимальна, зазор спрацьовування відповідає паспортним даним і дорівнює 2 мм. При наближенні еталонного об'єкта перпендикулярно осі датчика величина площі взаємодії об'єкта з датчиком зменшується і

зменшується також величина зазору спрацьовування до 0,8 мм. Крім того, для надійного й однозначного перемикання датчика відстань спрацьовування і відпускання робляться різні. Цей гістерезис необхідний ще і для того, щоб врахувати наявність люфтів у різних механізмах у процесі їх функціонування.

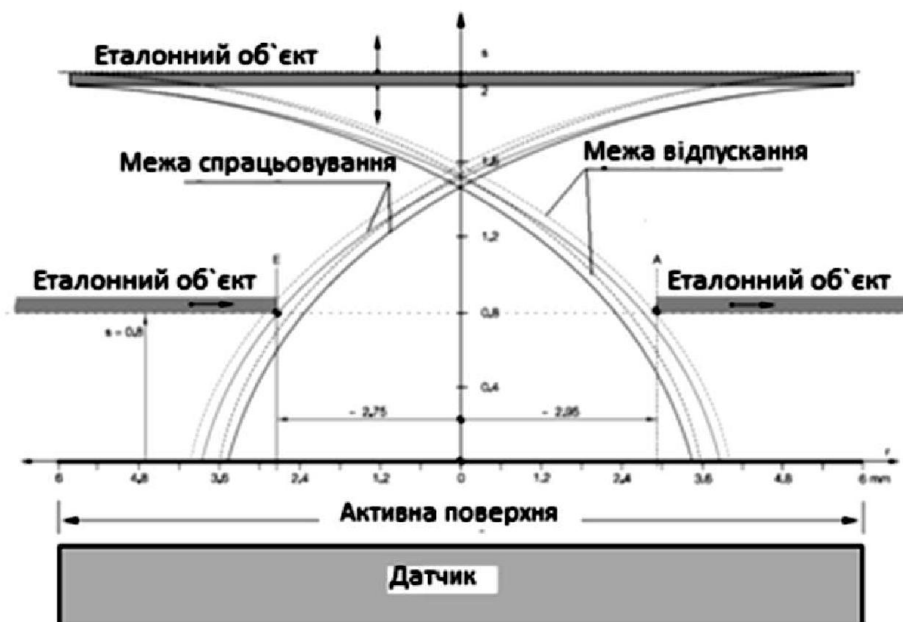


Рис. 2.111. Характеристики меж спрацьовування та відпускання індуктивного датчика

Характеристики індуктивних датчиків з аналоговим виходом (рис. 2.112) показують, що найбільша чутливість датчика проявляється на об'єктах з феромагнітних матеріалів – сталь 37 (суцільна лінія) і менша для об'єктів з немагнітних матеріалів – мідь та алюміній (пунктирна лінія).

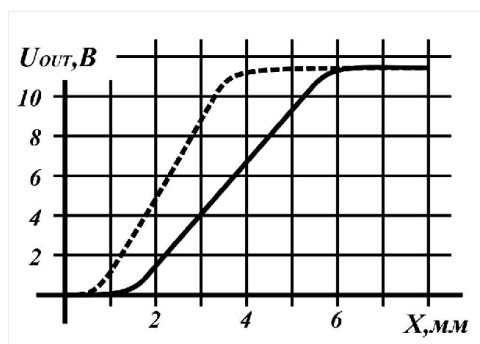


Рис. 2.112. Статичні характеристики індуктивних датчиків з аналоговим виходом

На точність індуктивних датчиків впливають зміна температури та коливання напруги живлення і частоти. Практично похибки індуктивних датчиків не перевищують 1,5 %.

Безконтактні індуктивні датчики відомі своєю надійністю при роботі в складних умовах. Отже, часто саме їх відразу вибирають тоді, коли необхідно

забезпечити високу надійність роботи. Крім традиційних галузей, таких як машинобудування, індуктивні датчики, широко застосовуються в автомобільній, військовій, аерокосмічній, залізничній та важкій промисловостях. Приклади застосування індуктивних датчиків з дискретним (рис. 2.113) і аналоговим (рис. 2.114) виходами показують різноманітність і широту сфер їх використання.

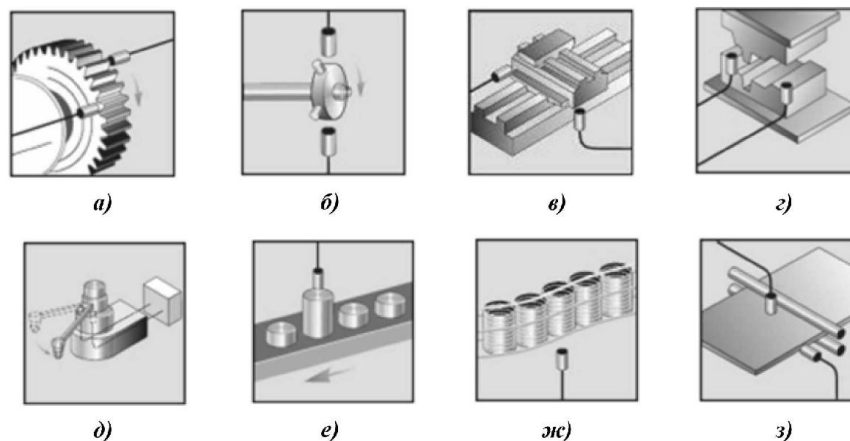


Рис. 2.113. Приклади застосування індуктивних датчиків з дискретним виходом:
а – контроль числа обертів і напрямку обертання зубчатих коліс; **б** – виявлення регулювальних гвинтів на колесі; **в** – позиціонування вузлів і частин верстатів; **г** – визначення повноти замикання штампа; **д** – контроль положення маніпулятора промислового робота; **е** – сортування металевих об'єктів за розміром; **ж** – підрахунок металевих предметів; **з** – визначення і позиціонування листа металу

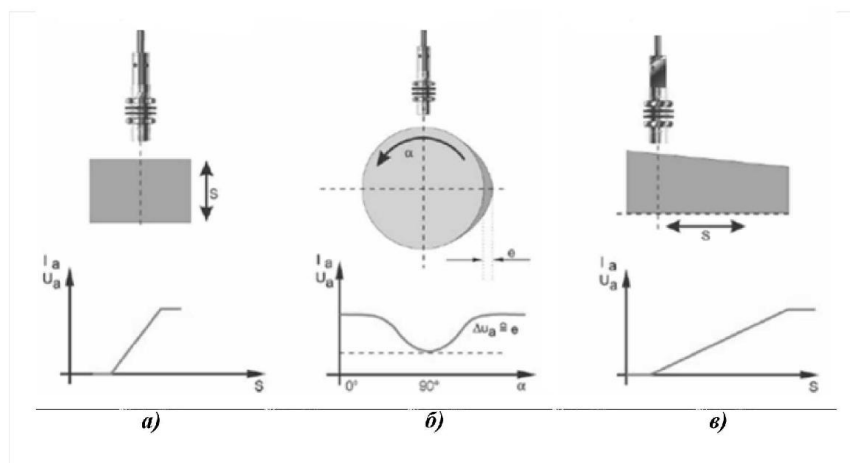


Рис. 2.114. Приклади застосування індуктивних датчиків з дискретним виходом:
а – сканування вертикального переміщення; **б** – сканування ексцентриситету;
в – сканування поздовжнього переміщення та відстані до об'єкта

Основними перевагами цих датчиків є невеликі габаритні розміри, простота монтажу, висока надійність і низька вартість.

Контрольні запитання і завдання до розділу 2

1. З яких структурних елементів складається датчик і які функції вони виконують?
2. У чому полягає різниця перервних і безперервних сигналів?
3. Чим відрізняються аналогові та дискретні сигнали?
4. Назвати основні типи електричних сигналів датчиків і дати їм характеристику.
5. Що таке статична характеристика вхід – вихід датчика?
6. Що таке чутливість датчика?
7. Що таке лінійність статичної характеристики датчика?
8. Що таке діапазон вимірювання датчика і що він характеризує?
9. Що таке динамічні характеристики датчика і що вони відображають?
10. Що таке похибка вимірювання?
11. Що характеризують абсолютна, відносна і наведена похибки?
12. У чому полягає різниця між статичними і динамічними похибками?
13. Які найбільш поширені вимірювальні схеми датчиків?
14. У чому полягає відмінність включення первинного перетворювача в потенційній і струмовій схемах?
15. Переваги і недоліки потенціометричної вимірювальної схеми.
16. Переваги і недоліки диференційної вимірювальної схеми.
17. Переваги і недоліки вимірювальної схеми одностороннього моста.
18. Переваги і недоліки вимірювальної схеми напівмоста.
19. Переваги і недоліки вимірювальної схеми квазінапівмоста.
20. Переваги і недоліки вимірювальної схеми повного моста.
21. У чому полягає різниця між параметричними і генераторними первинними перетворювачами?
22. Назвати різновиди параметричних первинних перетворювачів і дати їм характеристику.
23. Що таке резистивний перетворювач?
24. Основне призначення потенціометричних перетворювачів.
25. Що є первинним перетворювачем потенціометричних датчиків положення?
26. Як влаштований первинний перетворювач потенціометричних датчиків?
27. Що відображає статична характеристика потенціометричного перетворювача?
28. У чому полягає особливість сигналу потенціометричного датчика при використанні диференціальної схеми?
29. У чому відмінність дротяних потенціометрів від плівкових?
30. Які існують різновиди характеристик потенціометричних перетворювачів?
31. Переваги та недоліки потенціометричних перетворювачів.
32. Навести приклади датчиків, у яких як первинний перетворювач використовується потенціометричний перетворювач.
33. Що таке резистивний перетворювач?

34. Основне призначення терморезистивних перетворювачів.
35. Що є первинним перетворювачем терморезистивних датчиків температури?
36. Як влаштований первинний перетворювач терморезистивних датчиків з чутливим елементом з металу?
37. Що відображає статична характеристика терморезистивного перетворювача?
38. Що характеризує ТКО?
39. В чому полягає різниця терморезисторів NTC і PTC?
40. Що характеризує вольт-амперна характеристика терморезисторів?
41. Переваги та недоліки різноманітних терморезистивних перетворювачів.
42. Навести приклади датчиків, у яких як первинний перетворювач використовується терморезистивний перетворювач.
43. Що є первинним перетворювачем тензорезистивних датчиків?
44. У чому полягає тензорезистивний ефект?
45. Основне призначення тензорезистивних перетворювачів?
46. Що відображає статична характеристика тензорезистивного перетворювача?
47. Від яких параметрів залежить чутливість тензорезистивного перетворювача?
48. Які бувають види та конструкції тензорезистивних перетворювачів?
49. Які вимірвальні схеми використовуються для підключення тензорезистивних перетворювачів?
50. У чому відмінність металевих і напівпровідникових тензорезистивних перетворювачів?
51. Навести приклади датчиків, у яких як первинний перетворювач використовується тензорезистивний перетворювач.
52. Що є первинним перетворювачем магнітодатчиків?
53. Основне призначення магніторезистивних перетворювачів?
54. У чому полягає ефект Гаусса?
55. У чому полягає анізотропний ефект?
56. Поясніть залежність опору магніторезистивного перетворювача на ефекті Гаусса від співвідношення розмірів чутливого елемента?
57. Поясніть залежність опору анізотропного магніторезистивного перетворювача від кута між вектором індукції і площиною розташування чутливого елемента.
58. Що відображає статична характеристика магніторезистивного перетворювача на ефекті Гаусса?
59. Що відображає статична характеристика анізотропного магніторезистивного перетворювача?
60. Які вимірвальні схеми використовуються для підключення магніторезистивних перетворювачів?
61. Навести приклади датчиків, у яких як первинний перетворювач використовується магніторезистивний перетворювач.

62. Що є первинним перетворювачем фоторезистивних датчиків?
63. Основне призначення фоторезистивних перетворювачів.
64. У чому полягає внутрішній фотоэффект?
65. У чому полягає зовнішній фотоэффект?
66. Що відображає статична характеристика фоторезистивного перетворювача?
67. Що відображає вольт-амперна характеристика фоторезистивного перетворювача?
68. Що відображає люкс-амперна характеристика фоторезистивного перетворювача?
69. Що відображає спектральна характеристика фоторезистивного перетворювача?
70. Які вимірювальні схеми використовуються для підключення фоторезистивних перетворювачів?
71. Навести приклади датчиків, у яких як первинний перетворювач використовується фоторезистивний перетворювач.
72. Який електричний елемент являє собою первинний перетворювач ємнісних датчиків?
73. Який принцип дії ємнісних первинних перетворювачів на зміні діелектричної проникності між обкладинками конденсатора?
74. Який принцип дії ємнісних первинних перетворювачів на зміні площі перекриття обкладинок конденсатора?
75. Який принцип дії ємнісних первинних перетворювачів на зміні відстані між обкладинками конденсатора?
76. У чому полягає особливість диференційних ємнісних перетворювачів?
77. Наведіть приклади використання ємнісних первинних перетворювачів у вимірювальних датчиках.
78. Які вимірювальні схеми використовуються для роботи з ємнісними перетворювачами?
79. Проведіть аналіз статичних характеристик ємнісних перетворювачів з різним принципом дії.
80. Дайте визначення індуктивності.
81. Який принцип дії індуктивних перетворювачів?
82. Характеристика індуктивного перетворювача залежно від повітряного зазору.
83. Характеристика індуктивного перетворювача залежно від площі осердя.
84. Конструкція і характеристика соленоїдного перетворювача.
85. Конструкція і характеристики диференціального соленоїдного перетворювача.
86. Навести мостову схему підключення диференціального соленоїдного датчика.
87. У чому полягає ефект Холла?
88. Основне призначення перетворювачів, що діють на ефекті Холла.

89. Що відображає статична характеристика перетворювача, діючого на ефекті Холла?
90. Чим визначається чутливість елемента Холла?
91. Який вигляд має залежність ЕРС Холла від зміни частоти магнітного поля?
92. Яку залежність має ЕРС Холла при змінах величини магнітної індукції та при зміні напрямку вектора магнітної індукції?
93. У чому полягає метод безпосереднього вимірювання струму в колі за допомогою перетворювача, діючого на ефекті Холла?
94. У яких випадках переважно використовувати безпосередній метод і метод непрямого вимірювання струму в колі за допомогою перетворювача на ефекті Холла?
95. Яка найбільш розповсюджена вимірювальна схема для перетворювачів на ефекті Холла?
96. Навести приклади датчиків, у яких як первинний перетворювач використовується перетворювач на ефекті Холла.
97. Що є первинним перетворювачем в електроконтактних датчиках?
98. Основне призначення електроконтактних датчиків з механічним контактом.
99. Основне призначення електроконтактних датчиків з біметалевим контактом.
100. Основне призначення електроконтактних датчиків з герконами.
101. Що відображає статична характеристика електроконтактних датчиків?
102. Які за типом електричного контакту бувають електроконтактні первинні перетворювачі та якими скороченнями їх позначають у технічній літературі?
103. Які за конструктивним виконанням бувають електричні контакти?
104. У чому полягає принцип дії електроконтактного перетворювача з біметалевим контактом?
105. У чому полягає принцип дії геркона?
106. Які існують способи керування геконом за допомогою постійного магніту і чим пояснюється наявність цих способів?
107. Яке основне призначення тахогенераторних датчиків?
108. Які існують різновиди тахогенераторних датчиків?
109. У чому полягає принцип дії тахогенераторів постійного струму?
110. У чому полягає принцип дії синхронних тахогенераторів змінного струму?
111. У чому полягає принцип дії асинхронних тахогенераторів змінного струму?
112. Що відображає статична характеристика тахогенератора?
113. Надати порівняльну характеристику в розрізі переваг і недоліків різновидів тахогенераторних датчиків.
114. Основне призначення термоелектричних перетворювачів.
115. У чому полягає ефект Зеєбека?

116. З яких складових утворюється термо-ЕРС?
117. Що відображає статична характеристика термоелектричного перетворювача?
118. Від чого залежить чутливість термоелектричного перетворювача?
119. Як формулюються закони термоелектричного контуру?
120. У чому полягає принцип дії термоелектричного перетворювача?
121. Які особливості конструкції датчика температури з використанням термоелектричного перетворювача?
122. У чому полягає суть компенсації похибки, яка виникає при коливанні температури холодного спаю?
123. Які переваги і недоліки властиві датчикам температури з термоелектричними перетворювачами?
124. Навести приклади використання датчиків з термоелектричними перетворювачами.
125. Основне призначення п'єзоелектричних перетворювачів.
126. У чому полягає п'єзо ефект?
127. Які основні принципи побудови датчиків на основі п'єзоелектричних перетворювачів?
128. Основне призначення енкодерів.
129. Яку інформацію несе абсолютний і відносний перетворювачі кутових переміщень?
130. Які первинні перетворювачі використовують у вимірювальній системі енкодерів?
131. Конструкція і принцип дії вимірювальної системи абсолютного енкодера.
132. Конструкція і принцип дії вимірювальної системи відносного енкодера.
133. Чим визначається напрямок обертання в абсолютному і відносному енкодерах?
134. Чим визначається точність вимірювання енкодера?
135. У чому перевага використання в енкодерах кода Грея?
136. Які переваги і недоліки мають абсолютні й відносні енкодери?
137. Навести приклади використання енкодерів.

Список літератури

1. Автоматизация процессов подземных горных работ: учебник / под ред. А.А. Иванова. – Киев: Вища шк., 1987. – 327 с.
2. Автоматика и управление в технических системах: в 11 кн. Кн. 1. Электрические элементы систем управления промышленными роботами / А.А. Краснопрошина, В.А. Скаржена, В.Б. Яковлев; под ред. А.А. Краснопрошиной. – Киев: Вища шк. 1990. — 248 с.
3. Агейкин Д.И. Датчики контроля и регулирования: справ. материалы / Д.И. Агейкин, Е.Н. Костина, Н.Н. Кузнецова. – Москва.: Машиностроение, 1965. – 928 с.
4. Бабилов М.А. Элементы и устройства автоматики: учеб. пособие для студ. вузов / М.А. Бабилов, А.В. Косинский. – Москва: Высш. шк., 1975. – 464 с.
5. Бусурин В.И. Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения / В.И. Бусурин, Ю.Р. Носов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
6. Датчики для автоматизации в угольной промышленности / под ред. В.А. Ульшина. – Москва : Недра, 1984. – 245 с.
7. Зак Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е.А. Зак. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
8. Иванов В.И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы / В.И. Иванов. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 447 с.
9. Коробков Ю.С. Электромеханические аппараты автоматики / Ю.С. Коробков, В.Д. Флора, – Москва.: Энергоатомиздат, 1991. – 344 с.
10. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики: учебник для вузов / В.П. Миловзоров. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва. : Высш. шк., 1983. – 408 с.
11. Осипович Л.А. Датчики физических величин / Л.А. Осипович. – Москва. : Машиностроение, 1979. – 159 с.
12. Пашков Е.В. Электропневмо-автоматика в производственных процессах: учеб. пособие / Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский, А.А. Четверкин; под ред. Е.В. Пашкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – 496 с.
13. Маликов В.Т. Современные методы и средства измерительной техники: учеб. пособие / В.Т. Маликов, В.А. Поджаренко. – Киев. : УМК ВО, 1988. – 188 с.
14. Справочник по средствам автоматики / под ред. В.Э. Низэ, В.И. Анина. – Москва.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.
15. Шаруда В.Г. Практикум з теорії автоматичного управління: навч. посіб. / В.Г. Шаруда. – Дніпропетровськ.: Національний гірничий університет, 2002. – 414 с.
16. ДСТУ 2780-94. Засоби вимірювань та автоматизації. Сигнали частотні електричні безперервні вхідні та вихідні.

17. ДСТУ ІЕС 60381-1-2001. Сигнали неперервні для автоматизованих систем керування процесами. Частина 1. Сигнали постійного струму.

18. ДСТУ ІЕС 60381-2-2001. Сигнали неперервні для автоматизованих систем керування процесами. Частина 2. Сигнали напруги постійного струму.

19. ДСТУ 2838-94. Перетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом. Загальні технічні вимоги.

20. ДСТУ 6651-2014. Термоперетворювачі опору з платини, міді і нікелю. Загальні технічні вимоги та методи випробувань.

21. ДСТУ 2857-94. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворювання.

22. ДСТУ 7223:2011. Датчики силовимірювальні тензорезисторні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань.

Навчальне видання

Ткачов Віктор Васильович
Стаднік Микола Іванович
Шевченко Владислав Іванович
Козарь Микола Володимирович
Карпенко Олег Вікторович

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ
Частина перша
СЕНСОРНА ТЕХНІКА

Навчальний посібник

Друге видання, доповнене та перероблене

Редактор Ю.В. Рачковська

Підписано до друку 05.09.2018. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 8,2.
Обл.-вид. арк. 8,2. Тираж 30 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.