

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ І ЗАСОБІВ
АВТОМАТИКИ

В.М.МАШІН
В.І.ЦАЦКО

ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИКИ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



Одеса – 2021

Машін В.М. Елементи автоматики. / В.М.Машін (розділи 3-5), В.І.Цацко (розділи 1,2 // Навчальний посібник. – Одеса: ОНМУ, 2021. – 230 с.

Навчальний посібник містить стислий виклад загальних відомостей про системи автоматичного управління, сприймаючих (датчики температури, частоти обертання, крутного моменту, тиску, куту неузгодженості, рівня, витрат рідини та ін.), задаючих, підсилюючих та перетворюючих (магнітні, електромеханічні, електронні), виконавчих (електромагнітні та електромашинні) елементів.

Відповідає вимогам для дипломування електромеханіків Розділу А-III/6 Кодексу з підготовки і дипломування моряків та несення ваhti (Кодекс ПДНВ), а також враховує рекомендації Типового курсу Міжнародної морської організації 7.08 «Електромеханік» (Electro-Technical Engineer, Model course 7.08, 2014 Edition).

Призначено для студентів електромеханічних спеціальностей при вивченні технічної експлуатації електричного та електронного обладнання суден. Може бути корисним викладачам у навчальному процесі.

Навчальний посібник розглянуто та схвалено
Вченою радою Навчально-наукового інституту морського флоту
(протокол №7 від 07.06.2021 р.)
Вченою радою Одеського національного морського університету
(протокол №3 від 06.10.2021 р.)

Рецензенти:

к.т.н., доцент Харченко Р.Ю.

к.т.н., доцент Букарос А. Ю.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ.....	7
1. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ (САУ).....	7
1.1. Основні визначення САУ.....	7
1.2.Різновиди систем автоматичного управління.....	8
2. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОМАТИКИ.....	26
2.1. Характеристики управління елементів.....	26
2.2. Основні параметри елементів.....	28
2.3. Динамічні властивості елементів.....	32
2.4. Надійність елементів.....	46
Розділ 2. СПРИЙМАЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИКИ.....	51
3. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА СТРУКТУРНІ СХЕМИ ДАТЧИКІВ.....	51
3.1. Загальні відомості про датчики.....	51
3.2. Класифікація датчиків.....	52
3.3. Структурні схеми датчиків.....	54
3.4. Характеристики датчиків.....	57
4. ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ І ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ.....	71
4.1. Класифікація датчиків температури.....	71
4.2. Термоперетворювачі опору.....	74
4.3. Термoeлектричні перетворювачі.....	79
5. ДАТЧИКИ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ.....	89
5.1. Тахогенератори постійного струму.....	89
5.2. Тахогенератори змінного струму.....	90
5.3. Тахометричні мости.....	91
5.4. Індукційний датчик швидкості.....	92
5.5. Датчики частоти обертання з індукційними перетворювачами.....	93
5.6. Електромеханічне реле контролю швидкості.....	95
6. ДАТЧИКИ ТИСКУ.....	97
6.1. Методи перетворення тиску та класифікація датчиків.....	97
6.2. Деформаційні датчики тиску.....	99
6.3. Електричні датчики тиску.....	102
7. ДАТЧИКИ КУТУ НЕУЗГОДЖЕНОСТІ.....	111
7.1. Сельсини.....	111
7.2. Поворотні трансформатори.....	114
8. ДАТЧИКИ КРУТНОГО МОМЕНТУ.....	117
8.1. Загальні відомості.....	117
8.2. Тензорезисторні датчики крутного моменту.....	118
8.3. Магнітопружні датчики крутного моменту.....	120
8.4. Датчики крутного моменту з індукційними перетворювачами.....	123
8.5. Датчики крутного моменту з індукційним редуктосином.....	125
9 ДАТЧИКИ РІВНЯ.....	127
9.1. Поплавкові датчики рівня.....	127
9.2. Мембранні датчики рівня.....	129
9.3. П'єзометричні датчики рівня.....	130

9.4. Поплавкові датчики важільного типу.....	130
9.5. Ємнісні датчики рівня.....	131
9.6. Омічні датчики.....	133
9.7. Радіохвильові датчики.....	134
10. ДАТЧИК ПЕРЕМІЩЕННЯ РЕЙКИ ПАЛИВНИХ НАСОСІВ ДИЗЕЛЯ.....	136
11. ДАТЧИКИ ВИТРАТИ РІДИНИ.....	138
11.1. Теплові витратоміри.....	138
11.2. Ультрахвильові витратоміри.....	139
11.3. Електромагнітні витратоміри.....	146
11.4. Коріолісові витратоміри.....	150
11.5. Витратоміри з мішенями.....	152
12. ДАТЧИКИ-ДЕТЕКТОРИ ПОЖЕЖІ.....	155
12.1. Біметалічні пожежні детектори.....	155
12.2. Ртутні термометри з електричними контактами.....	156
12.3. Димові (іонізаційні) детектори.....	156
12.4. Детектори полум'я.....	157
12.5. Схема пожежної сигналізації.....	157
Розділ 3. ЗАДАЮЧІ УСТРОЇ.....	157
13. ЗАДАЮЧІ УСТРОЇ САУ.....	159
13.1. Класифікація регуляторів за характером задаючого впливу.....	159
13.2. Основні види задаючих устроїв.....	159
13.3. САР та мікроЕОМ.....	161
Розділ 4. ПІДСИЛЮЮЧІ ТА ПЕРЕТВОРЮЮЧІ УСТРОЇ САУ.....	164
14. ПІДСИЛЮЮЧІ УСТРОЇ.....	164
14.1. Призначення, класифікація, основні характеристики.....	164
14.2. Магнітні підсилювачі.....	166
14.3. Електромеханічні підсилювачі.....	170
14.4. Електронні підсилювачі.....	184
Розділ 5. ВИКОНАВЧІ УСТРОЇ САУ.....	191
15. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ УСТРОЇ АВТОМАТИКИ.....	191
15.1. Електромагніти.....	191
15.2. Електромагнітні реле.....	194
15.3. Електромагнітні муфти.....	198
16. ЕЛЕКТРОМАШИННІ УСТРОЇ АВТОМАТИКИ.....	201
16.1. Асинхронні машини.....	201
16.2. Синхронні машини.....	209
16.3. Машини постійного струму.....	220
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	230

ВСТУП

Мета та завдання навчальної дисципліни

Місце дисципліни в навчальному процесі.

Навчальна дисципліна “Елементи автоматики ” є загальнонауковою дисципліною, що забезпечує підготовку бакалавра з напрямку підготовки 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Вона покликана дати студентам знання, уміння і навички, необхідні для вивчення і засвоєння подальших загально інженерних і профільюючих дисциплін. Зміст дисципліни в значній мірі визначає рівень загальнонаукової підготовки бакалавра.

Вивчення дисципліни базується на знаннях, одержаних з курсів «Теорія автоматичного управління». фізики (розділи: електрика і магнетизм). Знання, набуті в кредитних модулях «Елементи автоматики» , є базою для оволодіння такими дисциплінами: „Теоретичні основи електротехніки ”, , „Моделювання електромеханічних систем”, “Силова електроніка та перетворювачі“, „Електроприводи ПТМ”, „Електрообладнання ПТМ і портів” і ін.

Мета вивчення дисципліни.

Мета програми. Метою дисципліни є формування у студентів 3-го курсу базових знань про суттєві фізичні явища та властивості великої номенклатури елементів автоматики, які використовуються в устаткуванні електрообладнання сучасних суден та портів, а також розвинення можливостей використання набутих знань на практиці, при вивченні і аналізі безпосереднього устаткування, вибору матеріалів при виконанні ремонту, проектуванні та виготовленні електрообладнання.

Завдання програми. Задачею вивчення дисципліни є забезпечення розуміння та чіткого засвоєння студентами основних властивостей та характеристик елементів автоматики, навчання студентів правильно оцінювати вплив їх властивостей на технічні характеристики електрообладнання, знайомство студентів з впливом зовнішніх факторів на елементи, які застосовуються в електричному обладнанні, а також виробити навички роботи з учбовою та довідковою літературою.

Внаслідок вивчення дисципліни студенти повинні знати:

- фізичні основи дії елементів автоматики;
- напрямки розвитку та розробки елементів автоматики, хіміко-фізичні основи властивостей елементів, а також залежність цих властивостей від умов експлуатації;
- практичні прийоми експлуатації елементів автоматики при настройці та ремонті судового та портового обладнання.

Вміння і навички, що набувають студенти при вивченні дисципліни.

- обирати та порівнювати елементи автоматики за основними параметрами та критеріями їх експлуатації при ремонті судового та портового електрообладнання;
- підбирати сумісні необхідні елементи для реалізації конкретних блоків та вузлів;

- знати і самостійно використовувати необхідну довідкову літературу по елементам автоматики при ремонті та експлуатації обладнання портів та суден.

Внаслідок вивчення дисципліни студент повинен:

знати:

- класифікацію, основні параметри і характеристики елементів автоматики;
- методи дослідження параметрів елементів автоматики;

вміти:

- правильно класифікувати елементи автоматики, обирати їх для конкретних умов експлуатації;
- досліджувати параметри і характеристики елементів автоматики.

Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ (САУ)

Глава 1. СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ (САУ)

1.1 Основні визначення САУ

Алгоритм функціонування устрою (системи) – набір інструкцій, що описують порядок дій виконавця для досягнення результату рішення задачі за кінцеве число дій.

Наприклад, електрична система – сукупність устроїв, що забезпечують єдність процесів генерування, перетворення, передачі, розподілу та споживання електричної енергії для виконання вимог до параметрів режиму (частоти, напруги, потужності і т.д.). Електрична система спроектована таким чином, щоб при нормальних умовах експлуатації ці вимоги виконувались, тобто правильно виконувати технічний процес. В даному випадку алгоритм функціонування електричної системи реалізований в конструкції генераторів, трансформаторів, ліній електропередачі і т.д. та в визначеній схемі їх з'єднання.

Пристрій, машина і в цілому система звуться **автоматичними** якщо вони виконують свої основні функції без участі людини та **автоматизованими** в разі обмеженої участі людини в керуванні.

Автоматичним управлінням називається зміна будь-якої величини за певним законом без участі людини. Фізична величина, що підлягає керуванню зветься **керованою величиною**.

Технічний пристрій, в якому здійснюється автоматичне управління отримав назву **об'єкта управління (ОК) – устрою (системи), що виконує технічний процес та потребує спеціальних дій зовні для здійснення його алгоритму функціонування.**

Об'єктом управління є, наприклад, як окремі устрої електричної системи (турбогенератори, силові перетворювачі електричної енергії, навантаження), так і електрична система в цілому.

Алгоритм управління – сукупність інструкцій, що визначають характер дій зовні на об'єкт управління, що забезпечує його алгоритм функціонування.

Прикладами алгоритмів управління, є ті, що змінюють збудження синхронного генератора та витрати пару в їх турбінах з метою компенсації небажаного впливу зміни навантаження споживачів на рівні напруги в вузлових точках електричної системи та частоту цієї напруги.

Мета управління полягає в забезпеченні потрібного закону зміни керованої величини. Цей закон може бути різним.

В одних технічних задачах необхідна підтримка керованої величини на заданому рівні (наприклад, напруга і частота генератора), в інших, більш складних випадках, вимагається зміна керованої величини за певним наперед заданим законом. Досить часто закон зміни керованої величини може бути заздалегідь невідомим, тобто він є випадковою функцією часу.

В реальних ОК завжди існують причини, що відхиляють керовану величину від заданого закону управління. Ці причини називаються **збурюючими факторами** і

можуть бути позначені $f_1(t), f_2(t), \dots$. Збурення, що найбільше впливають на керовану величину, получили назву основних, інші – другорядними.

Системою автоматичного управління (САУ) називають сукупність об'єкту управління(робочої машини, механізму) та з'єднаних певним чином елементів, за допомогою яких забезпечується надане завдання управління об'єктом.

Стан об'єкта характеризується деякими кількісними величинами, що змінюються в часі, тобто змінними стану. В технологічних процесах у ролі таких змінних може виступати температура, густина, в'язкість сировини або механічні переміщення (кутові або лінійні) і їхня швидкість, електричні змінні, температура технологічного обладнання, у бізнес-процесах — курс цінних паперів тощо. Аналіз і синтез систем управління проводиться методами спеціального розділу математики — теорії управління.

Керуючий пристрій складається з вимірювального (чутливого); керуючого та виконуючого елементів.

Вимірювальний (чутливий) елемент фіксує зміни вихідної (регульованої) величини об'єкта та в багатьох випадках перетворює її на величини іншого роду. В деяких САУ чутливий елемент контролює зовнішні збурення. Як чутливий елемент САУ часто застосовують датчики, що перетворюють неелектричні величини (швидкість, тиск, температуру та ін.) на електричні (активний, індуктивний або ємнісний опори, частота, фаза та ін.).

Керуючий елемент дістає інформацію від чутливого елемента та формує потрібний сигнал для виконуючого елемента. Часто він виконує функцію підсилювача. Основними видами підсилювачів є напівпровідникові, електромашинні, електронні та іонні. З неелектричних найбільш поширенні гідравлічні та пневматичні підсилювачі.

Виконавчий елемент забезпечує режим роботи керуючих органів об'єкта. Залежно від технологічних особливостей об'єктів регулювання виконуючим елементом можуть бути різного роду серводвигуни обертового або поступального руху, що діють на відповідні технологічні регулюючі пристрої – засувки трубопроводів подачі стисненого повітря, пари, води, ручки управління, перемикачі швидкості та ін.

Крім наведених вище основних елементів до САУ можуть входити й інші, що виконують функції проміжних перетворювачів, підсилювачів тощо.

Якщо всі елементи САУ позначити прямокутниками, розмістивши їх у послідовності, що відповідає їх взаємодії, а напрямок цієї взаємодії означити стрілками, то дістанемо **функціональну схему** САУ.

Якщо на цій схемі відобразити характеристики (рівняння, криві залежності вихідних параметрів від часу або деякі інші), що визначають динамічні властивості елементів системи, то дістанемо так звану **структурну схему** САУ. Елементи відповідних схем називають **ланками**.

1.2 Різновиди систем автоматичного управління

Системи управління поділяють на два великі класи:

- автоматизовані системи управління (АСУ) – працюють за участю людини в контурі управління;

- системи автоматичного управління (САУ) – працюють без участі людини в системі управління.

За принципом управління САУ підрозділяють:

- системи, що працюють за принципом управління за збуренням;
- системи, що працюють за принципом управління за відхиленням;
- комбіновані САУ

Системи автоматичного управління розподіляють на:

- системи з повною початковою інформацією (часто називають звичайними САУ);
- системи з неповною початковою інформацією (інші назва таких САУ – кібернетичні).

На рисунку 1.1 наведений приклад класифікації САУ за особливостями здобуття та використання інформації.

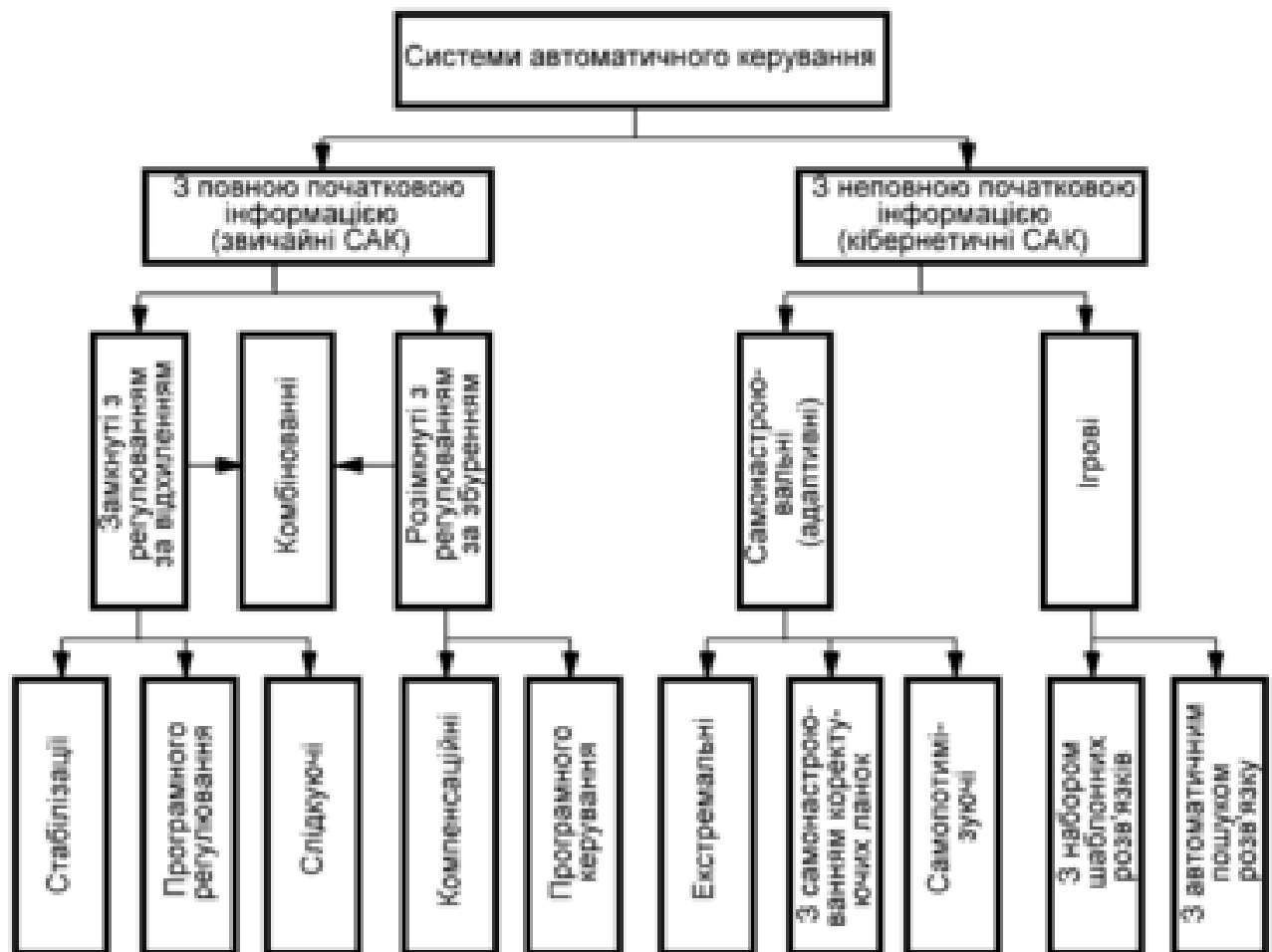


Рисунок 1.1 – Класифікація систем автоматичного управління

Системами з повною початковою інформацією звать такі, що мають початкову інформацію, яка достатня для розв'язання поставленого завдання на період всього часу роботи.

Розімкнуті САУ бувають двох видів: компенсаційні та програмного управління. Вони діють за принципом управління за збуренням (Понсоле-Чиколєва). Суть принципу управління за збуренням полягає в тому, що залежно від зміни збурення $f(t)$, що контролюється вимірювальним елементом ВЕ (рисунок 1.2) на

вхід об'єкта О надходить величина x , яка повинна діяти на об'єкт таким чином, щоб викликати зміну режиму його роботи, що компенсує дію збурення відносно вихідної (регульованої) величини об'єкта y .

У такій схемі немає автоматичного контролю вихідної величини об'єкта y ; команда управління формується лише залежно від зміни збурення. Перевагами управління за збуренням є відносна простота та надійність САУ при наявності одного (головного) збурення, якщо іншими збуреннями можна знехтувати.

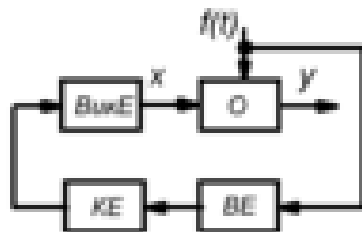


Рисунок 1.2 – Розімкнута САУ
ВикЕ – виконуючий елемент; О – об'єкт; ВЕ – вимірювальний елемент;
КЕ – керуючий елемент; $f(t)$ – збурення.

До недоліків цього принципу управління слід віднести труднощі контролю збурень у деяких технологічних об'єктах та дещо меншу точність. Ці недоліки особливо помітні коли на об'єкт діє декілька рівноцінних збурень, врахування яких підвищує складність та зменшує надійність САУ, а знехтування – різко знижує точність.

Компенсаційні системи забезпечують формування таких сигналів управління на вході об'єкта які компенсують дію на нього відповідного збурення $f(t)$. Прикладом є система компенсації зростання індуктивного навантаження підключенням батареї конденсаторів, що забезпечує підвищення коефіцієнта потужності.

Система програмного управління, повинні згідно із заданою програмою забезпечувати зміну режиму роботи об'єкта. Прикладом систем програмного управління є портові крани, де кінцеві вимикачі забезпечують необхідні зміни режиму роботи електропривода залежно від положення крана на пірсі.

Такі системи діють за принципом Ползунова-Уатта – **управління за відхиленням**.

Для реалізації принципу управління за відхиленням САУ має бути замкнутою. Основною особливістю та перевагою цього принципу є те, що САУ реагує на відхилення значення регульованої величини незалежно від причин, які зумовили це відхилення. Тому САУ враховує кінцевий результат всіх причин появи відхилення, отже має вищу точність управління.

САУ побудовані на принципі управління за відхиленням, мають більш складні методи свого розрахунку, дослідження та налаштування. Цей принцип управління використовується при потребі дістати високу точність як в статичних, так і динамічних режимах.

Розглянемо САУ, що підтримує навантаження робочої машини на однаковому рівні та забезпечує рівність його заданому навантаженню P_z . Побудуємо відповідну функціональну схему (рисунок 1.3, а).

Особливістю наведеної схеми САУ є замкнута функціональна схема. САУ, які мають замкнуту функціональну (структурну) схему, називаються системами автоматичного регулювання САР, або системами із зворотним зв'язком. Всі елементи замкнутої САУ, крім об'єкта, об'єднуються єдиним поняттям – **регулятор**.

Замикання САУ має виконуватися таким чином, щоб вихідна величина об'єкта, що змінюється під впливом збурень на вході регулятора була перетворена регулятором так, щоб вхідна величина діяла на об'єкт в напрямку, протилежному дії збурень. Даний зворотний зв'язок називають головним **від'ємним зворотним зв'язком** САР.

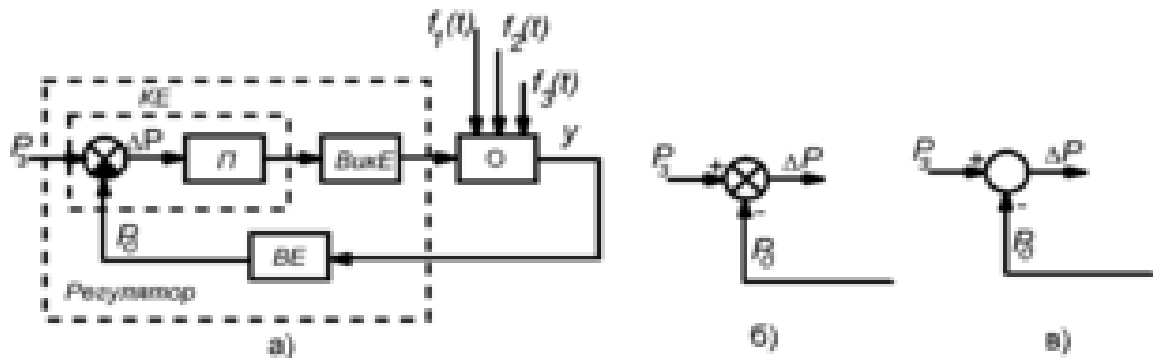


Рисунок 1.3 – Функціональна схема робочої машини (а), варіанти означення вузла порівняння (б), (в)

САР бувають трьох видів: стабілізації, програмні та слідкуючі.

Системи стабілізації повинні забезпечувати стаке значення вихідної величини об'єкта

$$y = const . \quad (1.1)$$

Прикладом таких систем може бути система стабілізації числа обертань гребного вала.

Програмні САР повинні забезпечувати зміну регульованої величини за заздалегідь відомою програмою

$$y = var = g(t) . \quad (1.2)$$

Прикладами таких систем є система автоматичного підйому та спуску навантажень при завантаженні або розвантаженні судна, авторульовий.

Слідкуючі системи також мають завдання забезпечити виконання (1.2), але потрібний закон в цьому випадку заздалегідь невідомий, а формується в ході роботи системи.

Характерним прикладом слідкуючої системи є система автоматичного швартування судна.

На практиці використовуються також системи з **комбінованим принципом управління** (рисунок 1.4)

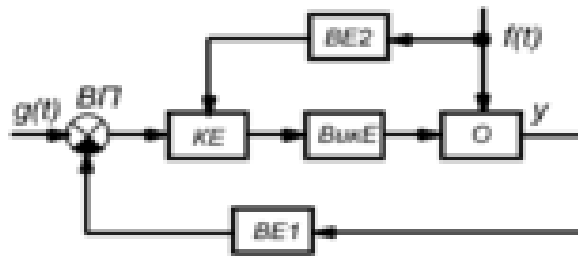


Рисунок 1.4 – Комбінована САУ

Ця система має два канали управління. Один з них діє за принципом управління за збуренням (BE2-KE-ВикЕ-О) і має розімкнутий контур, а другий – за принципом управління за відхиленням вихідної величини $x_{вих}$ від заданого значення $g(t)$ і має замкнутий контур (BE1-ВП-KE-ВикЕ-О).

Основною перевагою комбінованого управління є можливість дістати високу точність при кращих динамічних характеристиках, ніж у відповідній САУ, побудованій за принципом управління за відхиленням.

Системи з неповною початковою інформацією (кібернетичні) для розв’язання поставлених завдань повинні в процесі роботи діставати додаткову інформацію, аналіз якої дає змогу сформулювати потрібні команди управління.

Кібернетичні системи існують двох видів: самонастроювальні та ігрові.

Самонастроювальні системи (СНС) можуть при звичаюватись (адаптуватись) до зміни (часто випадкової) зовнішніх умов та забезпечувати потрібні показники якості управління.

Функціональна схема САУ наведена на рисунку 1.5. Основною її особливістю є додатковий регулятор ДР, на входи 1-4 котрого надходить інформація про зміни збурення (1), завдання (2), значення вихідної величини об’єкта (3), параметри об’єкта (4).

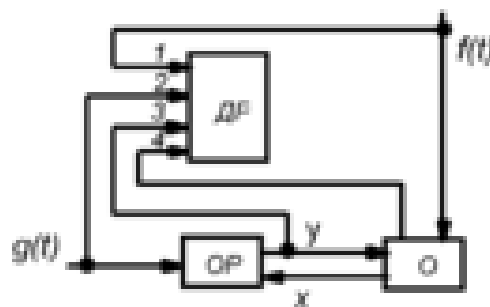


Рисунок 1.5 – Функціональна схема самонастроювальної системи

Додатковий регулятор в результаті аналізу здобутої інформації формує коригувальну дію, яка надходить на вхід основного регулятора ОР і забезпечує адаптацію системи. Додатковий регулятор у кібернетичних САУ, зазвичай, це ЕОМ, що забезпечує виконання логічних операцій і прийняття оптимальних у даних умовах рішень. Характерним прикладом СНС є авторульовий, який залежно від зміни сили й напрямку вітру та течій, навантаження судна, наявності інших суден та інших факторів забезпечує оптимальний рух корабля за заданим курсом.

Екстремальні СНС. На практиці досить часто постає завдання забезпечити управління на екстремумі деякої функції y (рисунок 1.6), яка є функцією двох величин.

Нехай

$$y = f(\lambda, \varphi), \quad (1.3)$$

де φ - регулюючий параметр; λ - параметр, що характеризує стан об'єкта.

При деякому стані об'єкта $\lambda = \lambda_1$ для забезпечення роботи на екстремумі функції $y_{1\max}$ необхідно мати в системі значення регулюючого параметра $\varphi = \varphi_1$. Якщо стан об'єкта зміниться і при цьому $\lambda = \lambda_2$, то для роботи на відповідному екстремумі система повинна забезпечити нове значення регулюючого параметра $\varphi = \varphi_2$. При ручному керуванні здійснити таку операцію практично неможливе. Тому розв'язання подібних задач потребує використання особливих екстремальних СНС, що забезпечують автоматичне настроювання на екстремум відповідної функції. Екстремальні СНС використовуються для забезпечення максимально можливої продуктивності, мінімального питомого рівня витрат енергії та ін.

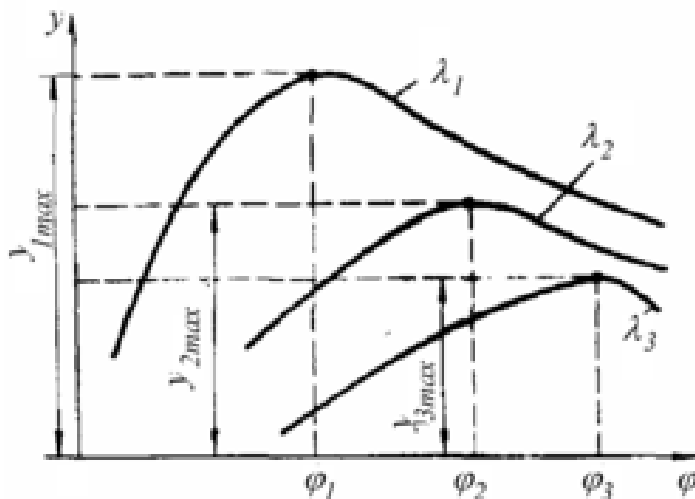


Рисунок 1.6 - Графік функції з екстремумом

Існують два види екстремальних СНС: з автоматичним пошуком екстремуму функції та без пошуку.

Основні методи автоматичного пошуку екстремуму функції є:

- метод послідовних кроків;
- метод знаходження похідних;
- спосіб запам'ятовування екстремуму;
- метод накладання вимушених коливань на вхід об'єкта.

Метод послідовних кроків (рисунок 1.7). В системі встановлюють деяке довільне значення $\varphi = \varphi_1$, після чого змінюють відповідне значення $y = y_1$, дають приріст $\Delta\varphi$ та вимірюють $y = y_2$.

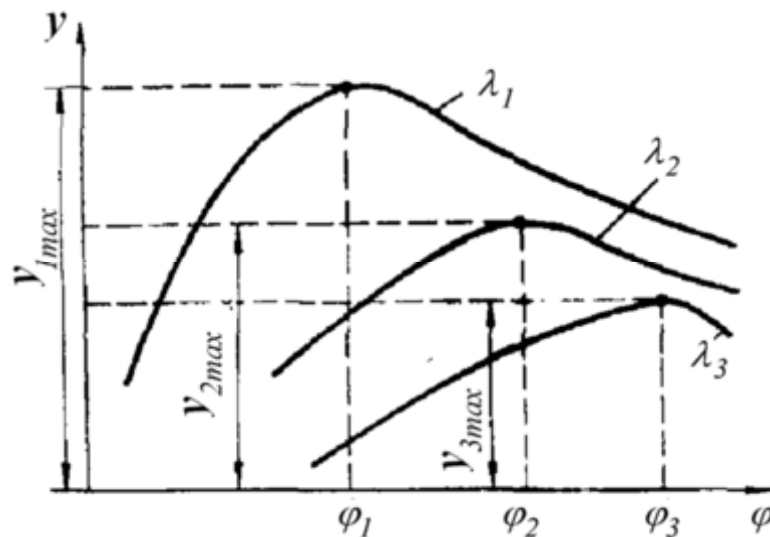


Рисунок 1.7 – Покрокове знаходження екстремуму

Якщо $y_2 > y_1$, то дають новий приріст величини y у тому самому напрямку (роблять новий «крок»). Якщо при цьому $y_3 < y_2$, то роблять зворотний крок, оскільки результат свідчить про проходження екстремуму функції. Внаслідок даної методики пошуку екстремуму виникають коливання навколо точки фактичного екстремуму $y = y_{\max}$ і забезпечується режим роботи з настроюванням, близьким до максимального значення функції $y_{\max}$.

Метод знаходження похідних. При цьому методі визначають знак похідної $dy/d\varphi$. Екстремум функції в даному випадку знаходиться в інтервалі, де похідна змінює свій знак. Якщо при переході зліва направо похідна змінює знак з «-» на «+», то це мінімум, навпаки – максимум.

Спосіб запам'ятовування екстремуму. В цьому разі система знаходить екстремум функції і запам'ятовує його, після чого відповідним чином реагує на відхилення функції від екстремального значення.

Метод накладання вимушених коливань на вхід об'єкта (рисунок 1.8). Характеристику об'єкта $y = f(\varphi)$ наведено на рисунку 1.8, а.

Якщо при роботі в точці a_0 на зростаючій частині характеристики на вхід об'єкта подати гармонічні коливання (крива 1, рисунок 1.8, в), то на виході об'єкта виникнуть періодичні коливання (крива 1, рисунок 1.8, б). Якщо буде пройдений екстремум функції $y = f(\varphi)$ і гармонічні коливання надходитимуть на вхід об'єкта при знаходженні його в точці b_0 вихідної характеристики, що відповідає «спадаючій» гілці, то фаза коливань на виході об'єкта зміниться на 180° (крива 2, рисунок 1.8, б). Така зміна фази коливань на виході об'єкта є ознакою проходження точки екстремуму. За допомогою фільтрів, що встановлюються на виході об'єкта, можна виділити змінну складову вихідного сигналу і використати її для управління виконавчим двигуном настроювання системи.

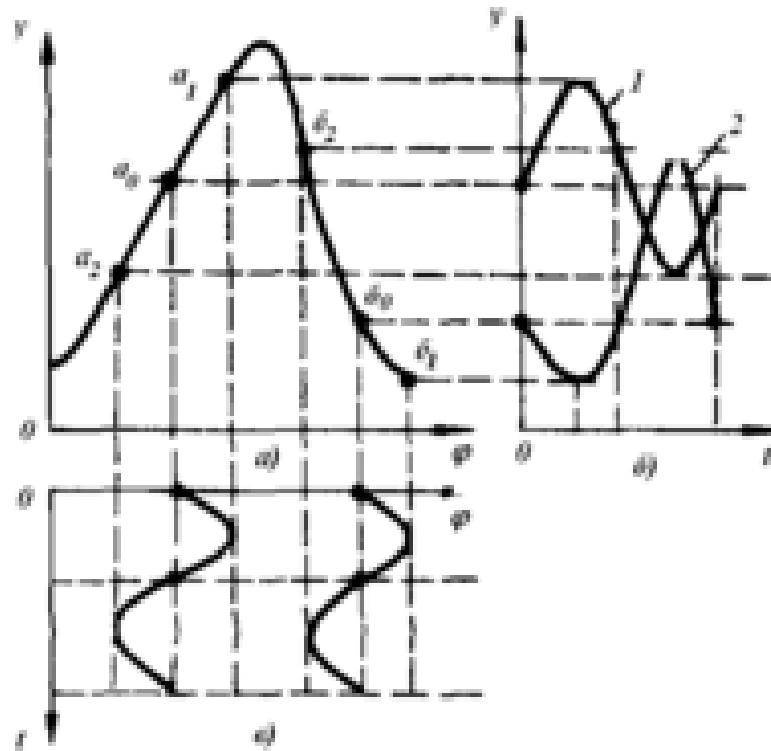


Рисунок 1.8 – Метод накладання вимушених коливань на вхід об'єкта

Тому треба використовувати безпошукові СНС. На рисунку 1.9 наведено функціональну схему такої СНС.

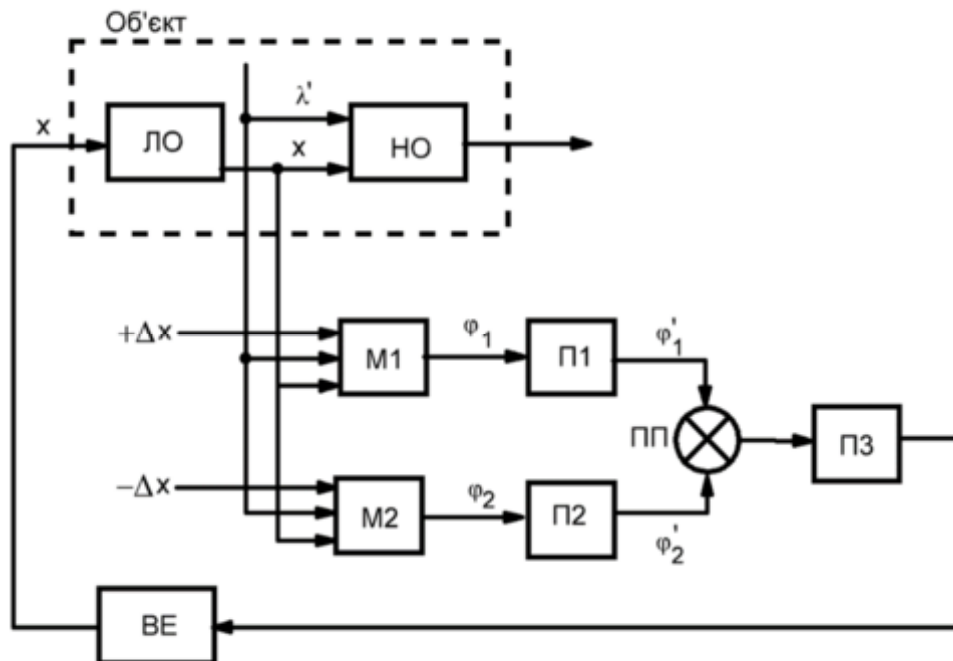


Рисунок 1.9 - Схема безпошукової СНС

ЛО, НО – лінійна та нелінійна частини об'єкта; М1, М2 – моделі нелінійної частини об'єкта; П1, П2, П3 – підсилювачі; ВЕ – виконуючий елемент

До кожної моделі прикладені одночасно збурення λ' і керуючі дії x . На модель також впливають додаткові керуючі дії $+\Delta x$ та $-\Delta x$.

Якщо на вхід НО подіє керуючий сигнал x_1 , то на першій моделі вихідна величина, що відповідає вхідному сигналу $x_1 + \Delta x$, дорівнюватиме після підсилення

ϕ'_1 , а на другій - ϕ'_2 . При цьому характеристики моделей зміщуються вліво та вправо відносно характеристики об'єкта. Вихідні величини моделей подаються на пристрій порівняння ПП. Після підсилення вихідна величина ПП з врахуванням її знаку формує сигнал управління, якій забезпечує рівність $\phi'_1 - \phi'_2 = 0$. Цю рівність можна отримати лише при значеннях x , що відповідають екстремуму характеристики об'єкта.

Отже, при наявності моделей і відповідної системи управління можна забезпечити роботу об'єкта з екстремальним значенням його вихідної величини ϕ незалежно від значення збурення λ .

СНС із самонастроюванням коригувальних ланок. Основною особливістю даних систем є те, що перехідний процес самонастроювання в контурі додаткового регулятора ДР (рисунок 1.5) більш тривалий ніж процес у контурі основного регулятора ОР. У зв'язку з цим результат самонастроювання можна використовувати лише на наступних етапах роботи об'єкта. Існують три основних види таких СНС: з екстремальним самонастроюванням, з розімкнутим та замкнутим контуром самонастроювання коригувальних ланок.

Самооптимізуючі СНС дозволяють використовувати результати самонастроювання системи в даному циклі. Це досягається завдяки тому, що тривалість перехідного процесу в контурі додаткового регулятора менша, ніж в контурі основного регулятора.

Ігрові системи автоматичного управління (ІСАУ) мають такі основні особливості:

- процес управління виконується в деякій системі з багатьма взаємопов'язаними об'єктами («велика система»);
- інтереси сторін (об'єктів) є протилежними;
- дії сторін і збурень в системі можуть відбуватися за відомими правилами (алгоритмами), а також мати випадковий характер.

Формування команд в ІСАУ може відбуватися за порівнянням багатьох можливих розв'язків (виборів) на окремих етапах – кроках.

Критерієм для порівняння окремих виборів є функція вигоди, яка визначається заздалегідь на основі аналізу керованої операції в даній системі за допомогою методів теорії дослідження операцій.

Розв'язок, що відповідає найбільшому значенню функції вигоди, називається **оптимальним**.

Основним елементом ІСАУ є керуюча машина КМ (рисунок 1.10), яка має забезпечити на основі робочої та наявної початкової інформації формування найбільш вигідного (оптимального в даних умовах та прийнятих обмеженнях) процесу управління.

Початкова інформація про першу сторону повинні мати необхідні відомості про властивості керованого процесу і бути достатньою для знаходження виборів і функцій вигоди.

Інформація про другу сторону, зазвичай, мінімальна. Робоча інформація має поточні відомості про стан і дії сторін.



Рисунок 1.10 – Функціональна схема ІСАУ

ІСАУ бувають двох видів: з набором шаблонних розв’язок; з автоматичним пошуком оптимального розв’язку.

В системі з набором шаблонних розв’язків оптимальні розв’язки для конкретних умов знаходяться заздалегідь і зберігаються в пам’яті КМ. Знаходження оптимального розв’язку забезпечується перебором відомих розв’язків і вибором такого, який найбільшою мірою відповідає конкретним умовам. Особливостями САУ даного виду є відносно тривалий процес знаходження розв’язку; приблизний характер знаходження завдяки скінченій кількості знайдених раніш розв’язків, необхідність мати велику пам’ять ЕОМ.

Кращими ІСАУ з **автоматичним пошуком оптимального розв’язку** є такі, що на основі інформації про другу сторону з більшою швидкістю і точністю знаходять оптимальний розв’язок.

На основі принципів дії ІСАУ розроблено автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСК ТП); виробництва (АСК В); управління галузями промисловості (АСК Г) та ін.

Коротко зупинимось на класифікації САУ за іншими критеріями та їх основними особливостями.

Системи прямої та непрямої дії.

В системах прямої дії вимірювальний елемент самостійно діє на регулюючий орган. Приклад такої САУ показаний на рисунку 1.11.

Контур регулювання складається з термометричної системи та регулювального клапана. Термометрична система уявляє собою паро-рідинний манометричний термометр. Термобалон 1 цього термометра встановлюється на об’єкті управління ОУ, де повинна підтримуватись постійна задана температура. Із підвищенням температури частина рідини в термобалоні випарюється, тиск насиченого пара над рідиною зростає, що приводить до зростання тиску в капілярі 2, отже, й усередині корпусу 5, де розміщений сильфон 10. Капілярна трубка, а також простір між внутрішніми стінками корпусу та сильфоном заповнені тією ж рідиною, що й термобалон. З підвищенням тиску сильфон стискається, приєднаний до нього шток переміщує донизу плунжер 16. Це приводить до зменшення кільцевого зазору між плунжером та сідлом 8 та зменшенню витрати теплоносія, що протікає через клапан 12. Зменшення подачі теплоносія приведе до того, що температура усередині об’єкта управління почне падати, повертаючись до заданого значення. Пружина 4 сильфона 3 врівноважує зусилля, що розвиває сильфон, а також служить для

настроювання регулятора на задану величину. Це робиться шляхом зміни натягу пружини 4. Корпус клапана регулятора 6 за допомогою фланців монтується на трубопроводі Тр (регулятори деяких типів встановлюють за допомогою різьбових з'єднань) поблизу об'єкта управління. Довжина капіляра – не більш трьох метрів.

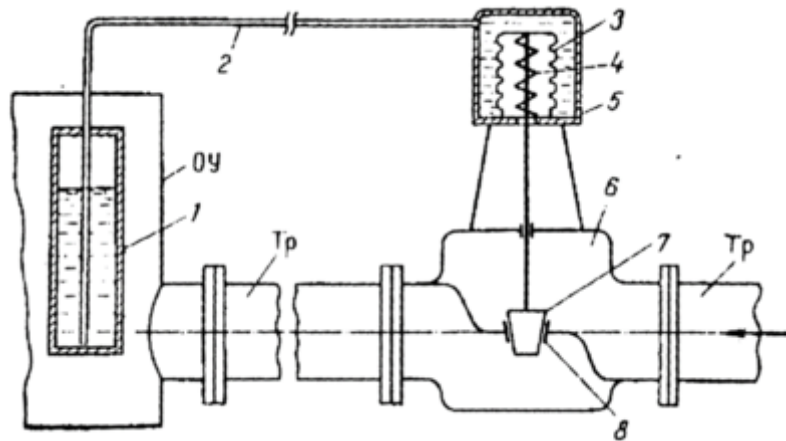


Рисунок 1.11 – Терморегулятор прямої дії

ОУ – об’єкт управління; Тр – трубопровід; 1 – термобалон; 2 – капіляр; 3 – сильфон; 4 – пружина; 5 – корпус; 6 – клапан; 7 – плунжер; 8 – сидло

Основною перевагою систем прямої дії є простота та надійність, недоліком – необхідність мати потужний і, внаслідок цього, малочутливий, досить інерційний вимірювальний елемент, який може безпосередньо переміщувати керуючий (регулюючий) орган об’єкта. При цьому низькій чутливості вимірювального елемента відповідає мала точність управління, а значна інерційність негативно впливає на динамічні властивості системи.

В системах непрямої дії вихідний сигнал вимірювального елемента підсилюється за допомогою підсилювача. На рисунку 1.12 показана САУ непрямої дії стабілізації напруги постійного струму.

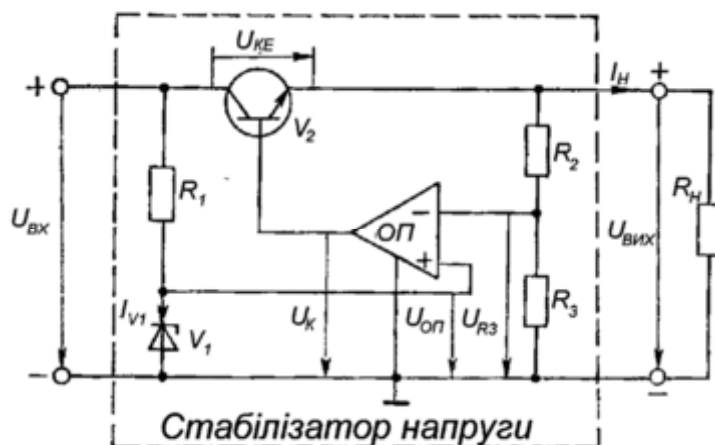


Рисунок 1.12 – Компенсаційний стабілізатор напруги

На вхід стабілізатора напруги поступає нестабілізована напруга U_{BX} . За другим законом Кірхгофа

$$U_{BUX} = U_{BX} - U_{KE}, \quad (1.4)$$

де $U_{ВИХ}$ - вихідна напруга стабілізатора напруги, $U_{КЕ}$ - напруга між колектором та емітером транзистора.

Стан транзистора залежить від напруги U_K , яка поступає на транзистор з виходу операційного підсилювача ОП. Ця напруга залежить від напруги на входах ОП. На неінвертуючий вхід ОП подана опорна напруга $U_{оп}$, що знімається зі стабілітрона V_I . Опір резистора R_I обирається так, щоби струм крізь стабілітрон змінювався у межах ділянки стабілізації. Вхідний опір ОП великий, його вхідний струм можна рахувати рівним нулю. В цьому випадку, як було показано при аналізі роботи параметричного стабілізатора напруги, опорна напруга при зміні вхідної напруги практично не змінюється. На інвертуючий вхід ОП поступає напруга з дільника напруги на резисторах R_2, R_3 . У відповідності із властивостями ОП можна отримати:

$$U_K = K_U \left(U_{оп} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{ВИХ} \right). \quad (1.5)$$

Припустимо, що за будь-якої причини зменшиться вихідна напруга. Це викликає зростання U_K , колекторного струму транзистора та падіння напруги $U_{КЕ}$. Внаслідок цього $U_{ВИХ}$ зростає.

Якщо $U_{ВИХ}$ зростає, то U_K зменшується, що викликає зростання $U_{КЕ}$ та зменшення $U_{ВИХ}$. Таким чином, ОП керує напругою $U_{КЕ}$ так, щоби забезпечити стабільний рівень напруги $U_{ВИХ}$. Коефіцієнт підсилення ОП дуже великий, тому схема забезпечує таку напругу $U_{ВИХ}$, при якій $U_{оп} - [R_3 / (R_2 + R_3)] U_{ВИХ} = 0$. Тоді вихідна напруга стабілізатора буде $U_{ВИХ} = \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) U_{оп}$.

Змінюючи співвідношення між резисторами дільника напруги або обираючи стабілітрон із відповідною напругою стабілізації, можна отримати необхідну напругу $U_{ВИХ}$ на виході стабілізатора. Слід відзначити що ця напруга може бути тільки менше за $U_{ВХ}$. Для нормальної роботи стабілізатора потрібно, щоби мінімальне значення $U_{ВХ}$ було на 1-2 В більше ніж задане значення $U_{ВИХ}$.

Компенсаційні стабілізатори напруги мають коефіцієнт стабілізації до декількох тисяч й здатні працювати при струмах до декількох ампер. Колекторний струм транзистора стабілізатора дорівнює струму навантаження, а напруга $U_{КЕ}$ за величиною досить велика, то втрати потужності на транзисторі значні, ККД компенсаційного стабілізатора невеликий – 60-70 %.

Статичні та астатичні САУ. Основною із ознак даних систем є вигляд регульовальної характеристики, що показує залежність регульованої величини в статичному положенні від збурення.

Статичною САУ називають систему, в якій регульована величина при зміні зовнішніх збурень на об'єкт, змінюючись в деяких допустимих межах, після закінчення перехідного процесу залежно від зовнішнього збурення має різні значення.

Регульовальна характеристика в загальному випадку має вигляд

$$y = C + \Delta(x), \quad (1.6)$$

де C – середнє значення регульованої величини x ; $\Delta(x)$ - функція збурення, яка визначає відхилення регульованої величини від її середнього значення в межах зони регулювання. Необхідна умова якісного регулювання $C \gg \Delta(x)$. Прикладом статичної САУ може служити частотне автопідстроювання частоти (АПЧ).

Астатичною САУ називають систему, в якій регульована величина при зміні зовнішніх збурень після завершення перехідного процесу набуває строго сталого значення при різних величинах зовнішніх збурень.

Прикладом астатичної САУ може бути фазова АПЧ.

Точність підтримання заданого значення регульованої величини в статичних системах визначається коефіцієнтом нерівномірності або статизмом δ . У випадку частотного АПЧ статизм визначається за формулою

$$\delta = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\text{сеп}}}, \quad (1.7)$$

де $f_{\max}$, $f_{\min}$, $f_{\text{сеп}}$ - максимальна, мінімальна, середня частоти.

У відносно грубих САР величина статизму може становити 10-20%.

В астатичних системах після завершення перехідного процесу ФАПЧ порівнює фази вхідного і опорного сигналів і видає сигнал похибки, відповідно різниці між цими фазами. Сигнал похибки проходить далі через фільтр низьких частот і використовується в якості керуючого для генератора, керованого напругою (ГКН), який генерує в колі від'ємного зворотного зв'язку. Якщо вихідна частота відхиляється від опорної, то сигнал похибки збільшується, діючи на ГКН в сторону зменшення похибки. В стані рівноваги вихідний сигнал фіксується на частоті опорного. Для технічної реалізації цієї особливості в астатичних системах повинні бути так звані астатичні ланки,

Системи неперервної та перервної дії.

Неперервною САР є система, в якій структура всіх зв'язків у процесі роботи не змінюється і величина на виході кожного елемента є неперервною функцією збурення та часу.

У **перервних САУ** при роботі системи можливі зміни структури зв'язків, через що сигнал на виході елемента чи об'єкта є перервною функцією часу, а також вхідної величини. Існує два види перервних систем – релейні та імпульсні.

Релейною називають систему, в складі якої є хоча б одна релейна (імпульсна) ланка, тобто ланка, яка має релейну (імпульсну) характеристику. Основні види релейних характеристик наведені на рисунку 1.13.

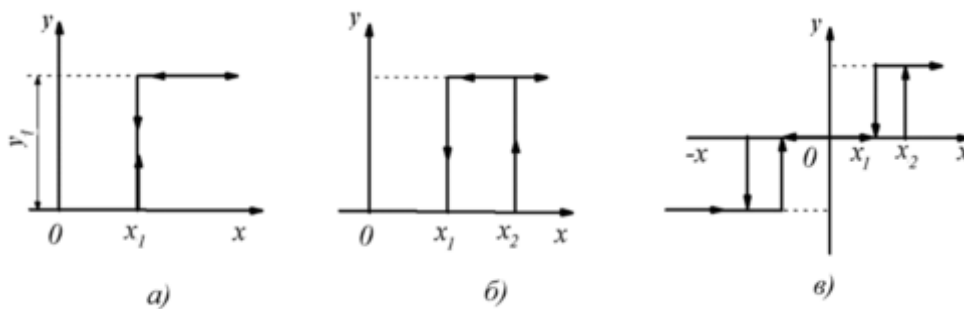


Рисунок 1.13 – Основні види релейних характеристик

Як видно з рисунку 1.13, а при зростанні вхідної величини до певного значення $x = x_1$ вихідна величина стрибком змінюється до значення u_1 . При

подальшому зростанні x , y_1 релейного елемента не зміниться. При зменшенні x , коли $x = x_1$, виникає стрибкоподібна зміна вихідної величини до початкового рівня.

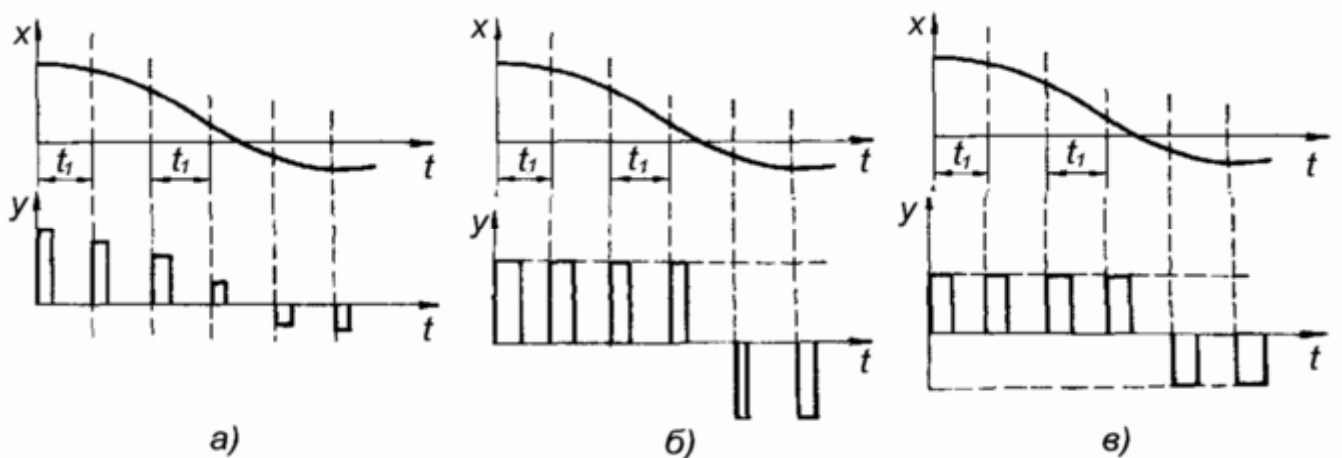
Значення вхідної величини при її зростанні, при якому відбувається стрибкоподібна зміна величини на виході ланки, називають величиною **спрацьовування (зрушення)** реле, а відповідне значення вхідної величини при її зменшенні – величиною **відпускання (повернення)**. На рисунку 1.13, б показано релейну характеристику, в якій величина спрацьовування x_1 не дорівнює величині відпускання x_2 .

Відношення x_2 / x_1 називають коефіцієнтом повернення. На рисунку 1.13, в показано характеристики реле, які реагують на полярність вхідного сигналу. Принцип дії релейних елементів може бути різний, але в найзагальнішому випадку вони застосовуються для фіксації відповідних значень вхідних величин. Вони мають різне функціональне призначення. Їх використовують як пристрої захисту, управління, у вигляді технологічних реле та ін.

Імпульсна ланка перетворює неперервний вхідний сигнал (рисунк 1.14, верхні криві) в ряд короткодійючих імпульсів з періодом t_1 .

Існують три види імпульсних ланок (імпульсних характеристик):

- з амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ) (рисунк 1.14, а), де амплітуда вихідного сигналу пропорційна значенню вхідної величини у відповідний період часу (ширина імпульсу незмінна);
- з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) (рисунк 1.14, б); у даному випадку амплітуда вихідних імпульсів залишається незмінною, а ширина імпульсу пропорційна значенню вхідної величини на відповідному інтервалі часу;
- з частотно-імпульсною модуляцією (ЧІМ) (рисунк 1.14, в); у цьому випадку на виході ланки згідно із зміною полярності вхідного сигналу змінюється лише полярність сигналів на виході.



Рисунк 1.14 – Характеристики імпульсних ланок з різними видами модуляції

На рисунку 1.15 показано принципову схему імпульсної САР температурі деякого середовища. Завдання САР – підтримати температуру у відповідному

середовищі на певному заданому (приблизно сталому) рівні за рахунок зміни кількості охолоджуючого повітря Q .

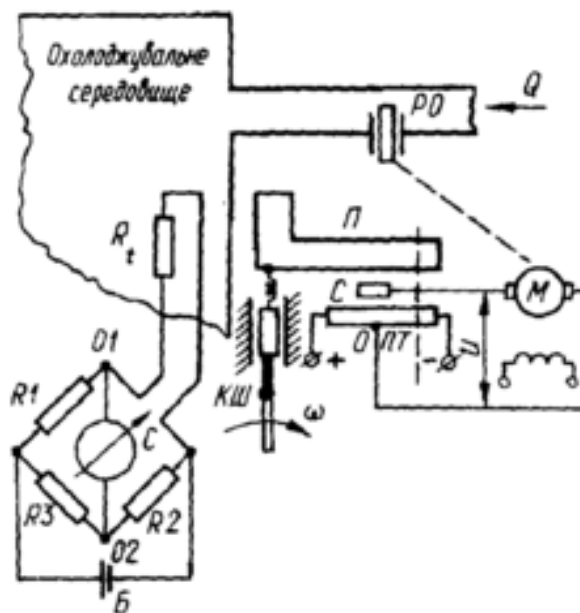


Рисунок 1.15 – Принципова схема імпульсної САР

Контроль температури охолоджуваного середовища здійснюється за допомогою датчика температури у вигляді термоопору R_t , який використовується як одне із плечей вимірювального моста, підключеного до батареї B . У діагональ моста 01-02 ввімкнений вимірювальний прилад, відхилення стрілки C якого пропорційне відхиленню температури охолоджуваного середовища від заданого значення. Ця стрілка періодично (залежно від положення кривошипно-шатунного механізму КШ, що обертається зі сталою швидкістю ω під дією падаючої дужки Π замикає якірне коло двигуна M і забезпечує подачу відповідної напруги з потенціометра ПТ.

Якщо температура охолоджуваного середовища відповідає заданому значенню, то стрілка C знаходиться проти нульової точки 0 потенціометра і в момент натискання на неї дужкою Π напруга на якірному колі двигуна M дорівнюватиме нулю. При цьому регулюючий орган системи РО, а також кількість охолоджуючого повітря залишаються незмінними. При відхиленні температури середовища від заданого значення рівновага вимірювального моста порушується ($R1 \cdot R2 \neq R3 R_t$) і на його діагоналі виникає напруга. При цьому стрілка C приладу відхиляється вліво чи вправо від нульової точки потенціометру, на якірному колі виникає напруга відповідної полярності. За час контакту стрілки з потенціометром двигун M повертає регулюючий орган на деякий кут, пропорційний відхиленню стрілки C від нейтрального положення, що приводить до зміни кількості охолоджуючого повітря Q . Якщо за час тривалості робочого імпульсу температура не наблизиться до заданого значення, а стрілка C не займе нейтральне положення, то за час наступного контакту стрілки з потенціометром на якір двигуна M знову буде подано напругу, пропорційну новому (меншому) відхиленню, двигун знову поверне регулюючий орган на деякий кут у потрібному напрямку та змінить величину Q .

У результаті ряду послідовних імпульсних сигналів, які діють на регулюючий орган системи, температуру середовища буде приведено до потрібного значення.

Переваги перервних (імпульсних) систем полягають у періодичному характері їх дії, що дає змогу зменшити знос елементів системи і збільшити їх надійність, підвищити техніко-економічні показники системи управління, виготовити вимірювальні елементи більшої чутливості, збільшити точність системи.

Системи перервної дії в основному використовують при малій швидкості дії, де їх переваги виявляються найбільшою мірою.

Системи одно- і багато контурні, одно- і багатовимірні, зв'язані та незв'язані.

Одноконтурною системою називають систему з одним регулюючим органом. При наявності кількох регулюючих органів, відповідно кількох контурів дії на об'єкт систему називають **багатоконтурною** (рисунк 1.16).

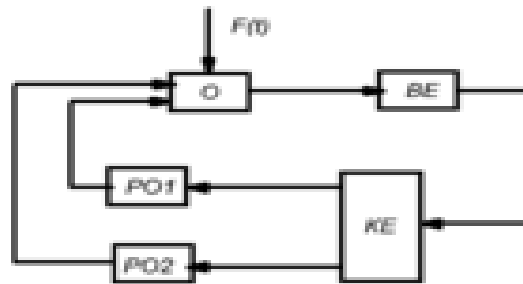


Рисунок 1.16 – Схема багатоконтурної САУ

Характерним прикладом багатоконтурних систем можуть бути системи регулювання тиску пару в паровому котлі. У цьому випадку вимірювальний елемент ВЕ контролює тільки один параметр – тиск пари, залежно від якого керуючий елемент КЕ діє на регулюючі елементи надходження води і енергоносія в котел.

Одновимірною називають систему з одним регульованим параметром, а **багатовимірною** – з кількома одночасно регульованими параметрами, що має відповідну кількість контурів дії на об'єкт.

На рисунку 1.17 показано багатовимірну систему регулювання вихідних величин об'єкта x_1, x_2 .

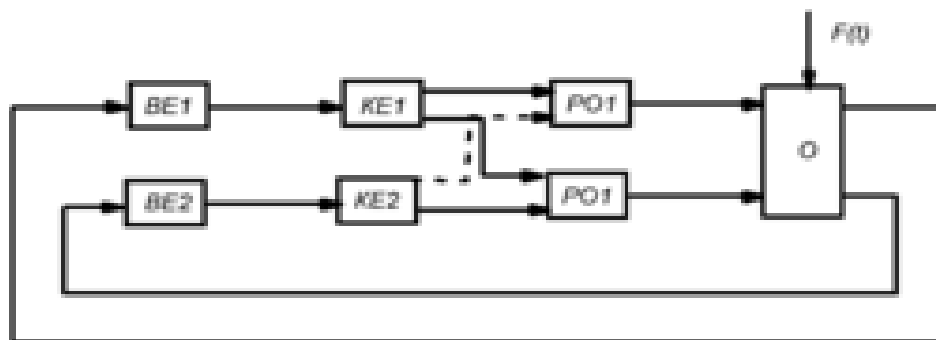


Рисунок 1.17 – Схема багатовимірної САУ

У цій системі канали управління функціонують незалежно один від одного; кожен з них керує одним параметром – це система **незв'язаного регулювання**.

В багатьох випадках, завдяки тому, що об'єкт управління є одним і тим самим, зміна одного з параметрів і дія відповідного контуру управління може привести до небажаної зміни інших вихідних параметрів об'єкта. Щоб уникнути цього, використовують компенсуючі зв'язки між керуючими елементами і регулюючими органами різних контурів (що показано пунктирними лініями на рисунку 1.17). Таку систему називають системою **зв'язаного регулювання**. Прикладом системи зв'язаного регулювання можуть бути САУ авторульового, де автомати курсу одночасно діють на різні рулі.

Якщо при регулюванні однієї величини не відбувається зміни інших регульованих параметрів об'єкта, то таке регулювання має назву **автономного**.

Системи із змінною та незмінною структурою.

Системою із змінною структурою називають таку, в якій у процесі роботи може змінюватись вид, кількість, характеристики, спосіб з'єднання ланок одна з однією. В протилежному разі система є **системою з незмінною структурою**.

На рисунку 1.18 показано функціональну схему системи із змінною структурою.

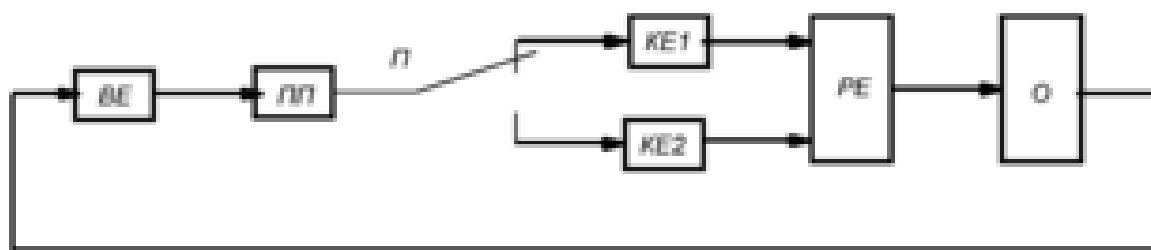


Рисунок 1.18 – САУ із змінною структурою

Вимірювальний елемент ВЕ контролює вихідну величину об'єкта О і видає сигнал на перемикаючий пристрій ПП. Залежно від параметрів сигналу перемикач П вмикає різні керуючі елементи КЕ1 або КЕ2, які діють на регулюючий елемент системи РЕ. При зміні положення П виникає зміна структури системи управління.

Завдяки зміні складу елементів на окремих етапах роботи виникає можливість дістати динамічні характеристики системи, які не можна дістати при тому чи іншому варіанті роботи системи незмінної структури.. Прикладом системи із змінною структурою є САУ портового крана, що змінює швидкість опускання навантаження при наближенні до місця його встановлення.

Контрольні питання та завдання до глави 1

1. Назвіть види автоматичних пристроїв, їхні функції і особливості.
2. Перелічіть елементи електромеханічної системи автоматичного управління і назвіть їхні функції.
3. Чим відрізняються принципи управління за відхиленням і за збуренням?
4. Що таке зворотний зв'язок, його види і особливості?
5. Перелічіть види систем автоматичного управління згідно з інформативним принципом класифікації і назвіть їх особливості.
6. Назвіть основні види й особливості кібернетичних систем автоматичного управління.

7. Нарисуйте функціональні схеми систем автоматичного управління (САУ) прямої і непрямой дії.
8. Нарисуйте функціональну схему комбінованої САУ.

Глава 2. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОМАТИКИ

2.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕМЕНТІВ

Основною характеристикою елемента в усталеному режимі роботи є *характеристика управління*, що визначає функціональний зв'язок між вхідним та вихідним сигналами в статиці.

Зміна вхідної та вихідної величин, що характеризують стан елемента системи неможлива без зміни запасу енергії або речовини, яка утримується в даному елементі, відбувається не миттєво, а на протязі визначеного проміжку часу. Тому процеси, котрі мають місце в системах автоматичного управління (САУ) та в їх елементах у більшості випадків описуються диференціальними рівняннями, що пов'язують між собою залежні величини та їх похідні за часом. Диференціальне рівняння математичне виражає фізичні процеси формування вихідного сигналу елемента при збудженні його вхідним сигналом.

Процеси, що протікають в системі, в загальному випадку описуються нелінійним диференціальним рівнянням

$$F(x, \dot{x}, \dots, x^{(n)}; y, \dot{y}, \dots, y^{(m)}; t) = \varphi(f, \dot{f}, \dots, f^{(k)}; t), \quad (2.1)$$

де x, y - відповідно вхідна та вихідна величини, f - збуджуючий вплив, t - час.

В елементі можлива наявність декількох вхідних та вихідних величин, може бути і декілька збуджуючих впливів.

Якщо збуджуючий вплив відсутній або їм можна знехтувати, рівняння (2.1) має вигляд

$$F(x, \dot{x}, \dots, x^{(n)}; y, \dot{y}, \dots, y^{(m)}; t) = 0. \quad (2.2)$$

Для усталеного (статичного) режиму мають місце співвідношення

$$\dot{x} = \ddot{x} = \dots = x^{(n)} = 0; \dot{y} = \ddot{y} = \dots = y^{(m)} = 0,$$

і рівняння (2.2) набуває вигляд $F(x, y) = 0$, рішення якого відносно y дає

$$y = f(x). \quad (2.3)$$

Отримана залежність називається характеристикою управління елемента (іноді статичною характеристикою). Для реальних елементів автоматики властиві в основному нелінійні характеристики управління. Елементи з лінійними характеристиками практично зустрічаються рідко. Нелінійність характеристики обумовлена фізичними властивостями елементів, тобто наявністю в них насичення, зони нечуйності, зазорів, тертя і т.п.

В загальному випадку характеристика управління уявляє собою безперервну криву або криву, що має розриви безперервності.

На рисунку 2.1 наведені деякі типові нелінійні характеристики управління елементів. Характеристика наведена на рисунку 2.1, а, зображує безперервний функціональний зв'язок, коли безперервній зміні вхідної величини відповідає безперервна повільна зміна вихідної величини, при цьому крутизна характеристики зменшується зі зростанням x . Така характеристика властива багатьом елементам із насиченням.

На рисунку 2.1, б наведена ідеалізована характеристика управління із обмеженою зоною лінійності (від $-x_l$ до x_l). Область $|x| > x_l$ називають зоною насичення ($y = \pm y_{max}$). Ця характеристика властива різним елементам з насиченням,

наприклад магнітним, електронним, електромашинним підсилювачам, а також електродвигунам, що мають обмеження за швидкістю обертання.

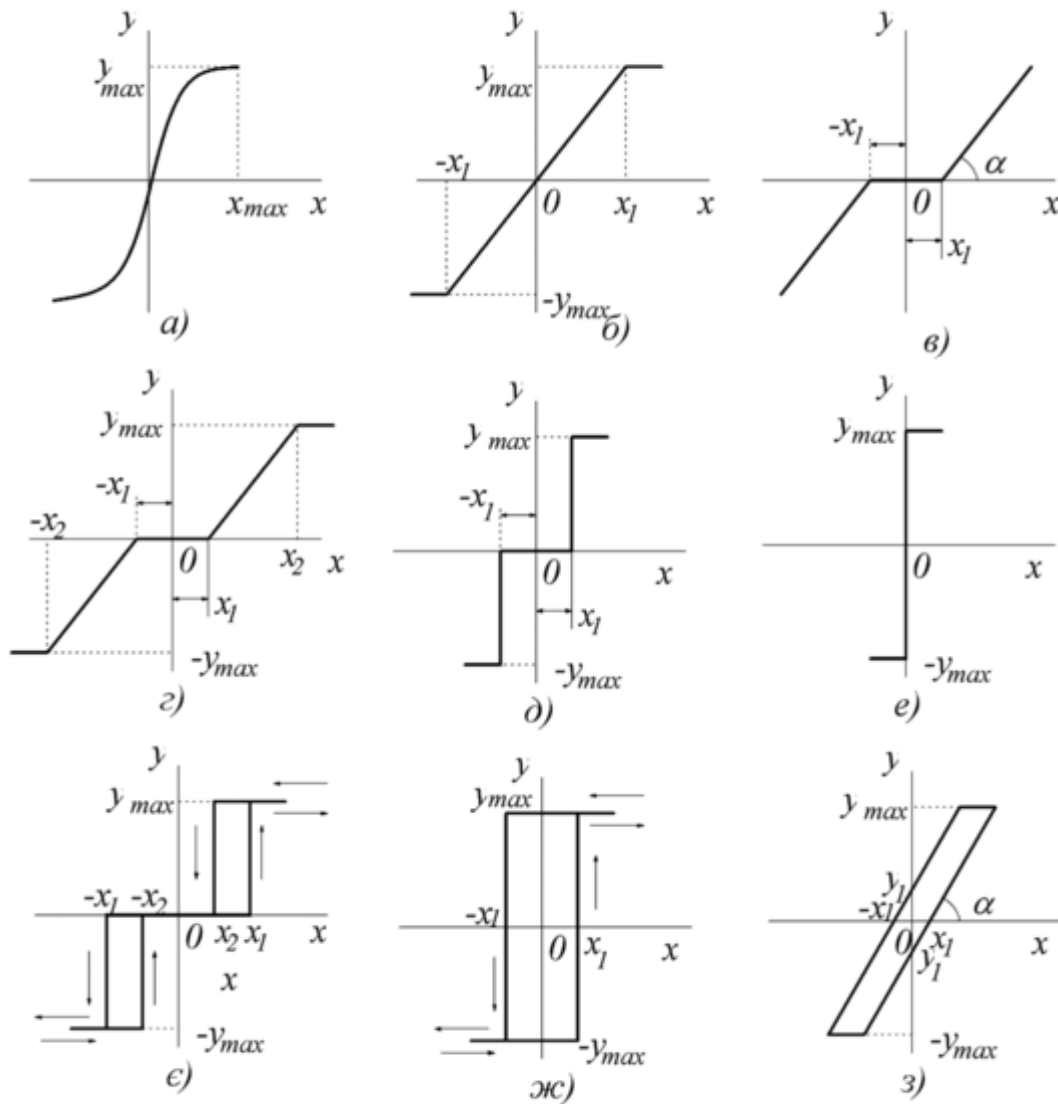


Рисунок 2.1 – Різновиди характеристик управління елементів

На рисунку 2.1, в зображена ідеалізована характеристика управління з зоною нечуйності, тобто з зоною в межах якої зміна вхідної величини не викликає появлення вихідної величини. В елементах з такою характеристикою відсутній сигнал на виході при $|x| < x_l$. Мінімальна абсолютна зміна вхідної величини (x_l), яка необхідна для появи вихідної величини отримала назву **порогу чуйності**, а інтервал зміни вихідної величини від $-x_l$ до x_l - **зони нечуйності**. Таку характеристику із нечуйністю до малих сигналів мають деякі схеми із напівпровідниковими діодами, електродвигуни із напругою рушання, яка залежить від моменту опору.

Для характеристики, наведеної на рисунку 2.1, г, властива наявність як зони нечуйності (від $-x_l$ до x_l), так і зони насичення ($|x| > x_2$).

Функціональна залежність $y = f(x)$, в якій при безперервній зміні вхідної напруги тільки при деяких визначених значеннях вихідна величина змінюється стрибком отримала назву **релейної характеристики**. Релейна характеристика із зоною нечуйності наведена на рисунку 2.1, д. При вхідній величині $x = x_l$ або

$x = -x$, відбувається стрибок вихідної величини до постійного значення y_{max} (або $-y_{max}$). Характеристику такого роду мають, наприклад, перемикаючі електронні пристрої.

Якщо зона нечуйності мала, то можна отримати ідеальну релейну характеристику, яка наведена на рисунку 2.1, е, котра іноді використовується для приблизного аналізу процесів в релейних пристроях.

Часто характеристика управління елемента є неоднозначною, тобто вихідна величина залежить не тільки від зміни вхідної величини, але й від напрямку її зміни (рисунк 2.1, є, ж, з). Неоднозначність, яка приводить до появи в характеристиці двох гілок, одна з яких відповідає зростанню вхідної величини, а інша – її падінню, можна пояснити втратами енергії усередині елемента на перемагнічування, тертя, нагрів і т.д. Неоднозначність може мати місце як в безперервних, так і в релейних характеристиках управління.

На рисунку 2.1, ж представлена релейна характеристика з неоднозначністю, а на рисунку 2.1, є – з зоною нечуйності та неоднозначністю. Перша характеристика притаманна двопозиційним реле, друга – трипозиційним електромагнітним поляризованим реле.

Неоднозначність характеристики управління, зображеної на рис. 2.1, з притаманна елементом з наявністю люфту та сухого тертя в рухомих частинах, наприклад, повідковим муфтам, редукторам та іншим механічним передачам. Подібна характеристика, яка доповнена зоною насичення, зустрічається в пристроях із петлею гістерезису магнітного кола.

Слід відзначити, що характеристики управління $y = f(x)$ можуть проходити і не проходити через початок координат, що притаманне зазвичай для реверсивних та неревверсивних елементів відповідно.

Від багатьох елементів автоматики потрібна нелінійна характеристика управління. Таку характеристику повинні мати стабілізатори, елементи пам'яті і т.п. Суттєво нелінійною релейною характеристикою повинні володіти реле, тригери, імпульсні підсилювачі.

Однак іноді нелінійність характеристики управління є небажаною. В цих випадках або обирають режими роботи елементів в обмеженій зоні характеристики, яка може бути прийнята за лінійну, або використовують спеціальні пристрої для того, щоб отримати лінійну чи близьку до неї характеристику управління.

Застосовують різні методи лінеаризації: метод малих відхилень (розклад нелінійної функції у ряд Тейлора), метод гармонічної лінеаризації, метод вібраційної лінеаризації (для лінеаризації релейних характеристик), метод статистичної лінеаризації і т.д. Всі ці питання розглянуті в курсах теорії автоматичного управління та регулювання.

2.2 ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ

Елементи автоматики в усталеному режимі характеризуються рядом параметрів, частина яких визначається за характеристикою управління елемента, яка є основною характеристикою усталеного режиму.

За виглядом цієї характеристики всі елементи можна поділити на дві групи:

- елементи з безперервною характеристикою управління (датчики, чуйні елементи, підсилювачі);
- елементи з релейною характеристикою управління (реле, тригери)).

2.2.1 Елементи з безперервною характеристикою управління

Ці елементи характеризуються такими параметрами:

- коефіцієнт перетворення (передачі);
- граничні значення вхідної та вихідної величин;
- коефіцієнт передачі потужності;
- величини вхідного та вихідного опорів.

Безперервна характеристика управління $y = f(x)$ елемента, що може проходити (див. рисунок 2.1, а) або не проходити (рисунок 2.2) через початок координат, може бути виражена як $y = K_{\pi} x$, де K_{π} - змінний коефіцієнт, що отримав назву **коефіцієнта перетворення**.

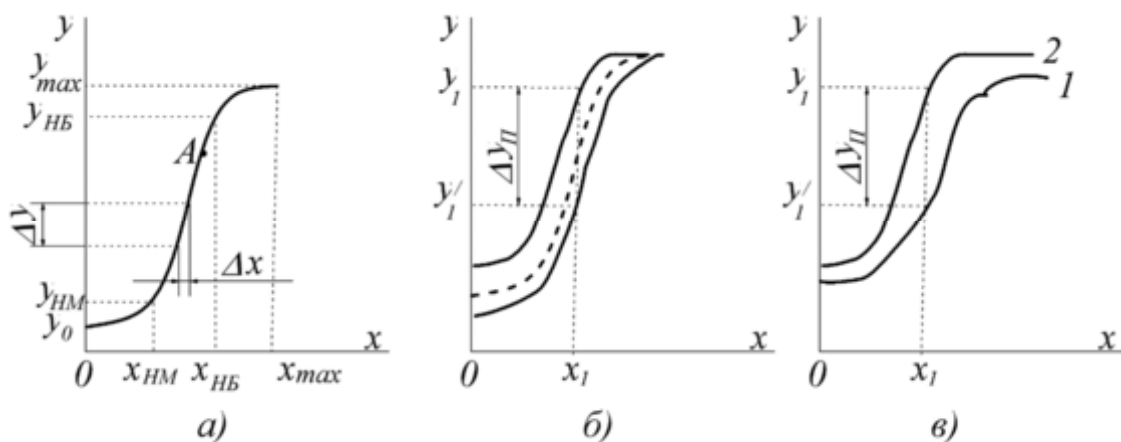


Рисунок 2.2 – Безперервні характеристики управління елемента

а – однозначна, б – неоднозначна, в зміна характеристики під дією збурюючих впливів

Зазвичай користуються диференціальним коефіцієнтом перетворення елемента, під яким розуміють ліміт відношення приростів вихідної Δy та вхідної Δx величин

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta y / \Delta x = dy / dx. \quad (2.4)$$

Диференціальний коефіцієнт перетворення в загальному випадку змінюється від точки до точки та визначається кутом нахилу дотичної до характеристики. Для елемента з лінійною характеристикою управління $K_{\pi} = K = \text{const}$.

Якщо величини x, y мають різну розмірність, то коефіцієнт K буде розмірним.

Якщо на характеристиці управління виділити ділянку, яку приблизно можна рахувати лінійною, то в межах цієї ділянки відношення найбільшої вихідної величини до найменшої, тобто y_{HB} / y_{HM} (див. рисунок 2.2, а) буде представляти собою **динамічний діапазон**. В динамічному діапазоні диференціальний коефіцієнт перетворення може бути прийнятий приблизно за постійний, а режим роботи елемента, при якому робоча точка A не виходить за межі цього діапазону – за лінійний.

Характеристика управління обмежується нижніми (x_{min}, y_{min}) та верхніми (x_{max}, y_{max}) *граничними значеннями вхідної x та вихідної y величин*. Кожному з граничних значень величин x та y відповідають визначені значення вхідної (P_{xmin}, P_{xmax}) та вихідної (P_{ymin}, P_{ymax}) потужностей.

Важним параметром елемента є *коефіцієнт передачі потужності*, що дорівнює відношенню прирощень потужностей вихідної та вхідної величин: $K_p = \Delta P_y / \Delta P_x$.

Робота елемента пов'язана з безперервним споживанням енергії із вихідного кола, тому потрібно знати величину *вхідного опору* z_{BX} . Величина *вихідного опору* $z_{ВИХ}$ необхідна для вибору параметрів вихідного кола.

За характеристикою управління елемента можуть бути визначені нелінійність, ширина зони нечуйності $\Delta x_H = 2x_I$ (див. рисунок 2.1, в,г,д), ширина петлі неоднозначності $\Delta x_r = 2x_I$ (див. рисунок 2.1, ж,з), область насичення, поріг чуйності (роздільна здатність) і т.п.

За наявності неоднозначності різниця ординат прямої та зворотної гілок характеристики нелінійного елемента (див. рисунки 2.1, з і 2.2, б) для кожного значення x дає визначені величини похибок $\Delta y_{II} = y_I - y'_I$.

Необхідно враховувати, що в реальних умовах роботи крім основного впливу з боку вхідної величини на елемент діють різні збурюючі фактори: зовнішнє середовище, внутрішні процеси в деталях елемента, які можуть змінювати в деяких межах характеристику управління і параметри елемента.

До них можна віднести зміну температури Θ , тиску p , вологості Z_B оточуючого середовища, коливання напруги U джерела живлення елемента, дію вібрації F та прискорення a , старіння та знос матеріалу.

В загальному випадку вихідна величина є функцією перерахованих збурюючих впливів $y = f(x, \Theta, p, Z_B, U, F, a, \dots)$. Тоді зміна вихідної величини може

бути описана як $\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial y}{\partial \Theta} \Delta \Theta + \dots + \frac{\partial y}{\partial a} \Delta a + \dots$. Позначивши парціальні

коефіцієнти перетворення за кожним з факторів: $K_\Theta = \frac{\partial y}{\partial \Theta}$; $K_p = \frac{\partial y}{\partial p} \Delta p$; ...; $K_a = \frac{\partial y}{\partial a} \Delta a$

можна отримати

$$\Delta y = K_x \left[\Delta x + \frac{K_\Theta}{K_x} \Delta \Theta + \frac{K_p}{K_x} \Delta p + \dots + \frac{K_a}{K_x} \Delta a + \dots \right], \quad (2.5)$$

де K_x - коефіцієнт перетворення за основним параметром.

Чим менше значення коефіцієнтів перетворення, тим менше вплив збурюючих дій.

На рисунку 2.2, в в якості прикладу наведені характеристики управління елемента безперервної дії без врахування (крива 1) та з врахуванням (крива 2) збурюючих впливів. Як видно з рисунку, при незмінній вхідній величині ($x_I = const$) значення вихідної величини y різні (y, y'_I), при цьому зміна вихідної величини Δy_{II} представляє собою погрішність перетворення.

Погрішності перетворення поділяють на дві основні групи: систематичні та випадкові. Систематичні погрішності виникають закономірно під впливом відомих факторів, випадкові – незакономірно під дією різних непостійних величин, що не пов'язані з процесом перетворення. Випадкові погрішності визначаються методами математичної статистики і теорії ймовірності (шляхом вивчення ряду повторних вимірювань).

2.1.1 Елементи з релейною характеристикою управління

Елементи з релейною характеристикою характеризуються параметрами спрацьовування та відпускання, коефіцієнтом повернення, коефіцієнтом управління.

Релейна характеристика управління $y = f(x)$ елемента при деякому значенні вхідної величини має розрив ($K \rightarrow \infty$), тому вихідна величина змінюється стрибком (див. рисунок 2.1, д-ж і рисунок 2.3).

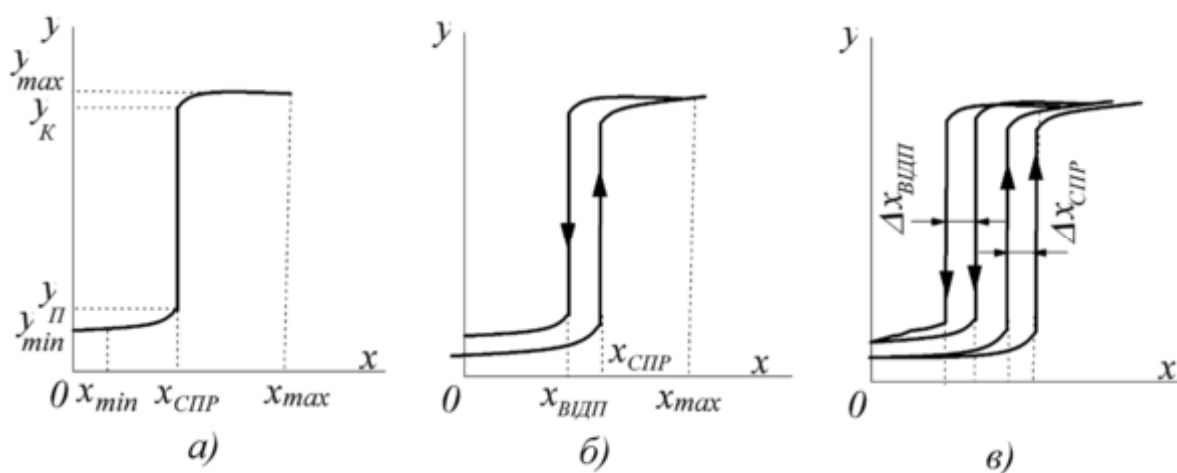


Рисунок 2.3 – Релейні характеристики управління елемента
а – при зростанні вхідної величини; б – при зростанні та спаданні вхідної величини;
в – зміна характеристики збурюючими впливами

Значення вхідної величини (рисунок 2.3, а), при досягненні якої вихідна величина змінюється стрибком від $y_{\min}$ до $y_{\max}$, називається **параметром спрацьовування** x_{CSP} . Значення вхідної величини (рисунок 2.3, б), при досягненні якої в процесі подальшого зменшення x відбувається стрибок вихідної величини, тобто повернення елемента, називається **параметром відпускання** $x_{\text{ВДП}}$. Цей параметр менше за x_{CSP} ; їх відношення називається коефіцієнтом повернення елемента релейної дії:

$$K_{\text{пов}} = x_{\text{ВДП}} / x_{\text{CSP}} < 1. \quad (2.6)$$

Коефіцієнт повернення визначає ширину петлі релейної характеристики.

Відношення $x_{\text{max}} / x_{\text{CSP}} = K_z$ називається коефіцієнтом запасу при спрацьовуванні елемента релейної дії, а відношення $y_{\text{max}} / y_{\min}$ - кратністю релейної характеристики (див. рисунок 2.3, а).

Важним параметром елемента релейної дії є коефіцієнт управління:

$$K_y = y_{\text{max}} / x_{\text{CSP}}, \quad (2.7)$$

де y_{max} - максимально допустиме значення вихідної величини y .

На величину параметра спрацьовування та відпускання оказують впливи збурюючі дії, наприклад, зміна температури та вологості оточуючого середовища, коливання напруги джерела живлення, дія прискорення та вібрації. Отже, $x_{СПР} = f_1(\Theta, Z_B, U, a, F, \dots)$ і $x_{ВДП} = f_2(\Theta, Z_B, U, a, F, \dots)$. Зміна параметрів спрацьовування та відпускання можуть бути виражені таким чином:

$$\Delta x_{СПР} = \frac{\partial f_1}{\partial \Theta} \Delta \Theta + \frac{\partial f_1}{\partial Z_B} \Delta Z_B + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial a} \Delta a + \dots,$$

$$\Delta x_{ВДП} = \frac{\partial f_2}{\partial \Theta} \Delta \Theta + \frac{\partial f_2}{\partial Z_B} \Delta Z_B + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial a} \Delta a + \dots$$

Значення коефіцієнта запасу повинно бути обране таким, щоб виконувалась

умова $\frac{x_{max}}{x_{СПР} + \Delta x_{СПР}} > 1.$

Погрішність елементів релейної дії представляє собою розкиди $\Delta x_{СПР}, \Delta x_{ВДП}$ параметрів спрацьовування та відпускання (рисунок 2.3, в).

2.3 ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ

Характеристики управління дозволяють оцінити властивості елементів виходячи із їх роботи в усталених режимах. Однак на практиці елементи автоматики працюють в динамічному, тобто неусталеному режимі, так як на вхід елемента зазвичай поступають сигнали, які безперервно змінюються в часі. Тому для будь-якого елемента важно оцінити його динамічні властивості. Ця оцінка здійснюється за допомогою диференціальних рівнянь, що пов'язують вхідні та вихідні величини.

Зв'язок між вхідною та вихідною величинами в загальному випадку описуються нелінійним диференціальним рівнянням виду (2.1) або (2.2).

В ряді випадків нелінійні диференціальні рівняння замінюють більш простими лінійними диференціальними рівняннями. При цьому характер зміни вихідних величин практично зберігається.

Залежність між миттєвими значеннями вхідної $x(t)$ та вихідної $y(t)$ величин в перехідних режимах для лінійних та лінеаризованих елементів (систем) в загальному випадку може бути описане лінійним диференціальним рівнянням n – го порядку с постійними коефіцієнтами в операторній формі:

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) Y(p) = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) X(p), \quad (2.8)$$

де $X(p), Y(p)$ - відповідно зображення вхідної $x(t)$ та вихідної $y(t)$ величин; n, m - цілі позитивні числа (зазвичай $n \leq m$); $a_0, a_1, \dots, a_n; b_0, b_1, \dots, b_m$ - постійні коефіцієнти, що визначаються параметрами схеми.

При відомому законі зміни вхідної величини рішенням диференціального рівняння можна визначити зміну вихідної величини в процесі роботи елемента.

В реальних умовах роботи САУ вхідний сигнал кожного елемента є випадковою функцією часу. При дослідженні та зіставленні динамічних властивостей різних лінійних та лінеаризованих елементів зазвичай використовують типові (стандартні) сигнали, що відражають впливи вхідних випадкових сигналів. Вхідні сигнали називають збурюючими, а вихідні, що виникають в результаті їх дії, - реакцією на ці збурення.

2.3.1 Типові сигнали елементів

Велика різноманітність конструкцій та умов роботи САУ визначає різноманітність впливів та сигналів. Аналіз конкретних САУ істотно спрощується, якщо користуватися розробленим в теорії автоматичного управління (ТАУ) типізацією впливів та сигналів.

Розглянемо основні типи сигналів та впливів.

В залежності від характеру зміни в часі розрізняють сигнали:

- регулярний (детермінований);
- нерегулярний.

Регулярний (детермінований) сигнал – сигнал, який змінюється за визначеним законом і може бути описаний конкретною математичною функцією часу.

Приклад регулярного сигналу приведений на рисунку 2.4, а.

Нерегулярний сигнал – сигнал, який змінюється в часі випадковим чином і не може бути представлений конкретною математичною функцією.

Приклад зміни випадкового сигналу наведений на рисунку 2.4, б.

В залежності від визначеності в часі розрізняють сигнали:

- безперервний (аналоговий);
- дискретний.

Безперервний (аналоговий) сигнал – сигнал, який визначений в будь-який момент часу. Приклади таких сигналів наведені на рисунку 2.4, а, б.

Дискретний сигнал – сигнал, який визначений лише в деякі моменти часу. Приклад дискретного сигналу приведений на рисунку 2.4, в.

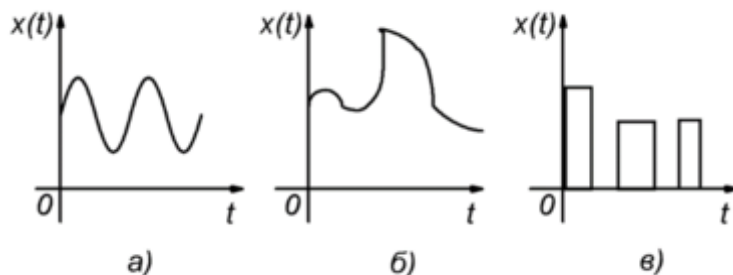


Рисунок 2.4 – Види різних сигналів

При дослідженні САУ та їх елементів виконують ряд стандартних сигналів, що зветься **типовими впливами**. Ці дії описуються простими математичними функціями й легко відтворюються при дослідженні САУ. Використання типових впливів дозволяє уніфікувати аналіз різних систем та полегшує зрівняння їх передаточних властивостей.

Найбільше застосування в ТАУ знаходять наступні типові впливи:

- ступеневі;
- імпульсні;
- гармонічні;
- лінійні.

Ступенева дія – дія, яка миттєво зростає від нуля до деякого значення і далі залишається постійним (рисунком 2.5, а).

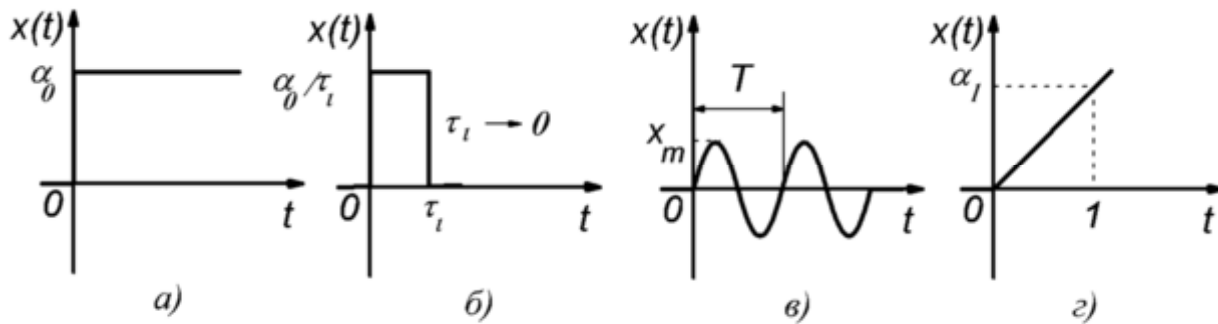


Рисунок 2.5 – Види типових впливів

Ступеневому впливу відповідає функція

$$x(t) = \begin{cases} 0; & t < 0; \\ a_0; & t > 0. \end{cases} \quad (2.9)$$

При аналізі та розрахунку систем доцільно використовувати ступенева дія, у якої величина $a_0 = 1$. Її називають **одиначним ступеневим впливом** та визначають $1(t)$. Математичний вираз, одиначний ступеневий вплив, має вигляд

$$x(t) = \begin{cases} 0; & t < 0; \\ 1; & t > 0. \end{cases} \quad (2.10)$$

Будь-який неодиначний ступеневий вплив можна означити $a_0 1(t)$. Одиначний ступеневий вплив, що виникає в момент часу $t-t_1$, означають $1(t-t_1)$.

Ступеневий вплив найчастіше використовують при дослідженні систем стабілізації параметрів, бо такі дії найбільше близькі до реальних (задаючих та збурюючих) впливів таких систем.

Імпульсна дія – одиначний імпульс прямокутної форми (рисунок 2.5, б), що має достатньо велику висоту та малу тривалість (по зрівнянню з інерційністю досліджуєної системи) із площею a_0 .

При математичному аналізі САУ використовують **одиначний імпульсний вплив**, що описується так званою **дельта-функцією**.

$$\delta(t) = \begin{cases} 0; & t < 0; \\ \infty; & t > 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

Причому

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (2.12)$$

Останні два вирази дозволяють розглядати дельта-функцію, як імпульс, що має нескінченно велику висоту, нескінченно малу тривалість та одиначну площу. Дельта-функцію можна визначити як похідну одиначного ступеневого впливу.

$$\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt}. \quad (2.13)$$

Неодиначний імпульсний ступеневий вплив з площею a_0 означає

$$x(t) = a_0 \delta(t). \quad (2.14)$$

Гармонічна дія – сигнал синусоїдальної форми, що описується функцією (рисунок 2.5, в)

$$x(t) = x_m \sin \omega t, (-\infty < t < \infty), \quad (2.15)$$

де x_m - амплітуда сигналу; $\omega = 2\pi / T$ - кутова швидкість; T – період сигналу.

Гармонічний сигнал, що починає діяти в момент часу $t = 0$, описують за допомогою одиночної ступеневої функції:

$$x(t) = I(t)x_m \sin \omega t, (0 \leq t < \infty). \quad (2.16)$$

Лінійна дія – вплив, що описується функцією (рисунк 2.5, з)

$$x(t) = I(t)a_1 t, (0 \leq t < \infty). \quad (2.17)$$

Коефіцієнт a_1 характеризує швидкість зростання дії $x(t)$.

За характером зміни вихідної величини в часі розрізняють наступні режими елемента САУ:

- статичний;
- динамічний.

Статичний режим – стан елемента САУ, при якому вихідна величина не змінюється в часі, тобто $y(t) = \text{const}$.

Статичний режим (або стан рівноваги) може мати місце лише тоді, коли вхідні впливи постійні в часі. Зв'язок між вхідними та вихідними величинами у статичному режимі описують алгебраїчними рівняннями.

Динамічний режим – стан елемента САУ, при якому вхідна величина безперервно змінюється в часі, тобто $y(t) = \text{var}$.

Динамічний режим має місце, коли в елементі після прикладення вхідного впливу відбуваються процеси встановлення заданого стану або заданої зміни вихідної величини. Ці процеси описуються в загальному випадку диференціальними рівняннями.

Динамічний режим в свою чергу поділяється на:

- неусталений (перехідний);
- усталений (чи квазіусталений).

Неусталений перехідний режим існує від моменту початку зміни вхідного впливу до моменту, коли вхідна величина починає змінюватись за законом цього впливу.

Усталений режим настає після того, як вихідна величина починає змінюватись за таким же законом, що й вхідний вплив, тобто після закінчення перехідного процесу.

В усталеному режимі елемент виконує вимушений рух. Вочевидь, що статичний режим є окремим випадком усталеного (вимушеного) режиму при $x(t) = \text{const}$.

Поняття «перехідний режим» і «усталений режим» ілюструються графіками зміни вихідної величини $y(t)$ при двох типових вхідних впливах $x(t)$ (рисунк 2.6). Межа між перехідним та усталеним режимами показана вертикальною пунктирною лінією.

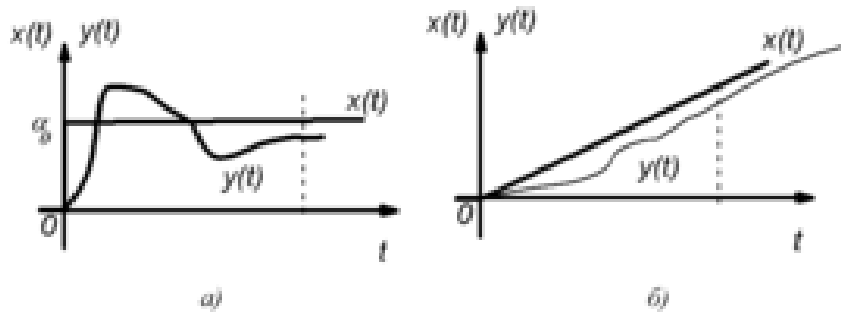


Рисунок 2.6 – Перехідні та усталені режими при типових впливах

2.3.2 Звичайне диференціальне рівняння

Звичайне диференціальне рівняння є найбільш загальною та повною формою опису передаточних властивостей елементів САУ.

Для елемента, що має один вхідний сигнал $x(t)$ та один вихідний $y(t)$ звичайне диференціальне рівняння в загальному випадку має вигляд

$$\Phi[e(t), y_1(t), \dots, y^n(t); x(t), \dots, x^m(t), t] = 0, \quad (2.18)$$

де t - незалежна змінна (зазвичай час).

Для реальних систем $m \leq n$.

Це рівняння динаміки (руху) елемента. Тут під рухом розуміється будь яка зміна сигналів.

Диференціальне рівняння може бути:

- лінійним;
- нелінійним.

Лінійне диференціальне рівняння – рівняння, в якому функція Φ лінійна по відношенню до всіх аргументів.

Наприклад, передаточні властивості чотириполіусника з лінійними елементами (рисунок 2.7) описуються лінійним диференціальним рівнянням вигляду

$$RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) - I(t) = 0. \quad (2.19)$$

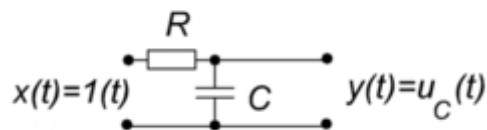


Рисунок 2.7 – Чотириполіусник з лінійними елементами

Нелінійне диференціальне рівняння – рівняння, в якому функція Φ утримує добутки, степені і т.д. змінних $y(t), x(t)$ та їх похідних.

Так, наприклад, передаточні властивості чотириполіусника з нелінійним резистором (рисунок 2.8) описуються нелінійним диференціальним рівнянням виду

$$R(t)C \frac{du_c}{dt} + u_c(t) - I(t) = 0. \quad (2.20)$$

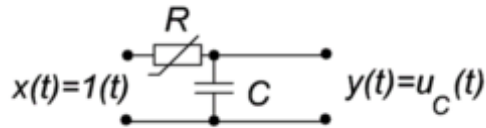


Рисунок 2.8 – Схема чотирьохполюсника з нелінійним резистором

До функції Φ (диференціальне рівняння) входять також величини, що звуться **параметрами**. Вони пов'язують між собою аргументи та характеризують властивості елемента з кількісного боку. Наприклад параметрами є маса тілу, активний опір, індуктивність, ємність провідника і т.д.

Більшість реальних елементів описуються нелінійними диференціальними рівняннями, що ускладнює наступний аналіз САУ. Тому намагаються від нелінійних рівнянь перейти до лінійних рівнянь виду

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y(t) = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_m x(t). \quad (2.21)$$

Для всіх реальних елементів виконується умова $m \leq n$.

Коефіцієнти $a_0, \dots, a_n; b_0, \dots, b_m$ в рівнянні (2.21) звуться **параметрами**. Іноді параметри змінюються з часом, тоді елемент називають **нестационарним** або **із змінними параметрами**.

Далі ми будемо розглядати тільки елементи із **постійними** параметрами.

Якщо при складанні лінійного диференціального рівняння здійснюється лінеаризація статичної характеристики, то воно відповідає дійсності лише поблизу точки лінеаризації і може бути записано у відхиленнях змінних. Однак із метою спрощення запису, відхилення змінних в лінеаризованому рівнянні будемо позначати тими ж символами, що й у вихідному рівнянні, але без символу Δ .

Практичною перевагою лінійного рівняння (2.21) є можливість застосування **принципу накладення**, згідно якого зміна вихідної величини $y(t)$ при дії на елемент декількох вхідних сигналів $x_i(t)$ дорівнює сумі змін вихідних величин y_i , що викликані кожним сигналом окремо (рисунок 2.9).

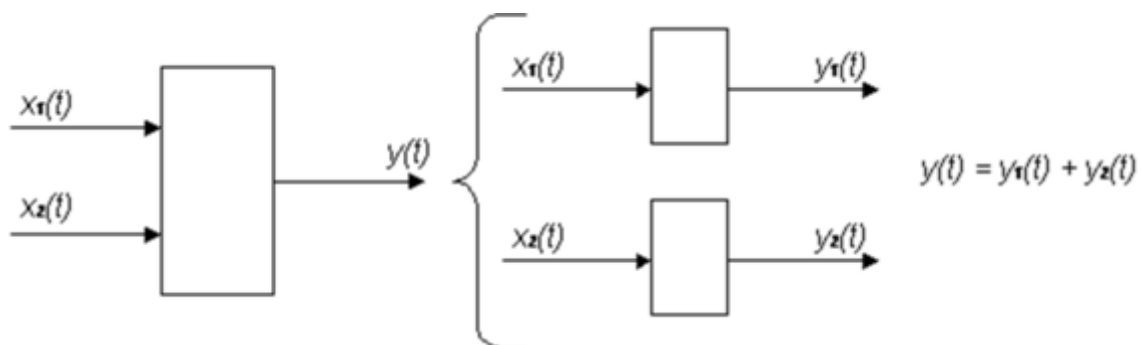


Рисунок 2.9 – Ілюстрація принципу накладення

2.3.3 Часові характеристики

Диференціальне рівняння не дає наочного уявлення про динамічні властивості елемента, але таке уявлення дає функція $y(t)$, тобто рішення цього рівняння.

Однак одне диференціальне рівняння може мати безліч рішень, що залежать від початкових умов і характеру вхідного впливу $x(t)$, що незручно при зіставленні динамічних властивостей різних елементів. Тому було вирішено характеризувати ці

властивості елемента тільки одним рішенням диференціального рівняння, отриманим при нульових початкових умовах і одному з типових впливів: одиничному ступінчастому, дельта-функції, гармонійному, лінійному. Найбільш наочне уявлення про динамічні властивості елемента дає його перехідна функція $h(t)$.

Перехідна функція $h(t)$ елемента - зміна в часі вихідної величини $y(t)$ елемента при одиничному ступінчастому впливі і нульових початкових умовах.

Перехідна функція може бути задана:

- у вигляді графіка;
- в аналітичному вигляді.

Перехідна функція, як і будь-яке рішення неоднорідного (з правою частиною) диференціального рівняння (2.20), має дві складові:

- вимушену $h_{вим}(t)$ (дорівнює сталому значенню вихідної величини);
- вільну $h_{в}(t)$ (рішення однорідного рівняння).

Вимушену складову можна отримати вирішуючи рівняння (3.4) при нульових похідних і $x(t) = 1$

$$h_{вим}(t) = y(\infty) = \frac{b_m}{a_n}. \quad (2.22)$$

Вільну складову отримуємо рішенням рівняння (2.21) при нульовій правій частині

$$h_{в}(t) = \sum C_k e^{p_k t}, \quad (2.23)$$

де p_k - k -й корінь **характеристичного рівняння** (в загальному випадку комплексне число), C_k - k -я постійна інтегрування (залежить від початкових умов).

Характеристичне рівняння - алгебраїчне рівняння, степені та коефіцієнти якого співпадають із порядком та коефіцієнтами лівої частини рівняння типу (2.21)

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y(t) = 0. \quad (2.24)$$

2.3.4 Передаточна функція

Найбільш поширеним методом опису і аналізу АСК є операційний метод (метод операційного числення), в основі якого лежить пряме інтегральне перетворення Лапласа для безперервних функцій

$$F(p) = Z \{ f(t) \} = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt. \quad (2.25)$$

Це перетворення встановлює відповідність між функцією дійсної змінної t і функцією комплексної змінної $p = \alpha + j\beta$. Функцію $f(t)$, що входить в інтеграл Лапласа, називають **оригіналом**, а результат інтегрування - функцію $F(p)$ - **зображенням** функції $f(t)$ за Лапласом.

Перетворення здійснимо лише для функцій, які дорівнюють нулю при $t < 0$. Формально це забезпечується множенням функції $f(t)$ на одиничну ступінчасту функцію $1(t)$ або вибором початку відліку часу з моменту, до якого $f(t) = 0$.

Найбільш важливими властивостями перетворення Лапласа при нульових початкових умовах є:

$$Z\{f'(t)\} = pF(p); \quad (2.26)$$

$$Z\left\{\int f(t)dt\right\} = F(p)/p. \quad (2.27)$$

Операційний метод в ТАК отримав широке поширення, тому що з його допомогою визначають так звану передавальну функцію, яка є самою компактною формою опису динамічних властивостей елементів і систем.

Застосовуючи пряме перетворення Лапласа до диференціального рівняння (2.21) з використанням властивості (2.26) отримаємо алгебраїчне рівняння

$$D(p)Y(p) = K(p)X(p), \quad (2.28)$$

де

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n - \text{власний оператор}; \quad (2.29)$$

$$K(p) = b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m - \text{вхідний оператор}. \quad (2.30)$$

Введемо поняття передаточної функції.

Передаточна функція - відношення зображення вихідної величини до зображення вхідної величини при нульових початкових умовах:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (2.31)$$

Тоді з урахуванням рівняння (2.28) і позначень (2.29, 2.30) вираз для передаточної функції приймає вигляд:

$$W(p) = \frac{K(p)}{D(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}. \quad (2.32)$$

Значення змінної p , при якій передаточна функція $W(p)$ звертається в нескінченність, називається **полюсом передаточної функції**. Очевидно, що полюсами є корені власного оператора $D(p)$.

Значення змінної p , при якій передаточна функція $W(p)$ звертається в нуль, називається **нулем передаточної функції**. Очевидно, що нулями є корені вхідного оператора $K(p)$.

Якщо коефіцієнт $a_0 \neq 0$, то передаточна функція не має нульового полюса ($p = 0$), що характеризується її елемент називають **астатичним** і передаточна функція цього елемента при $p = 0$ ($t = \infty$) дорівнює передаточному коефіцієнту

$$k = W(0) = \frac{b_m}{a_n}. \quad (2.33)$$

Передаточний коефіцієнт визначається із загальної статичної характеристики $y = f(x)$. При цьому відношення $K_c = \frac{y}{x}$ називають **передаточним статичним коефіцієнтом**, якщо y, x є усталені значення величин.

Динамічним передаточним коефіцієнтом є похідна $K_d = \frac{dy}{dx}$.

Для елементів з лінійними характеристиками $K_c = K_d$.

Для датчиків цей коефіцієнт називають коефіцієнтом чутливості, а для підсилювачів – коефіцієнтом підсилення.

2.3.5 Частотні характеристики

Частотні характеристики описують передаточні властивості елементів і САУ в режимі сталих гармонійних коливань, викликаних зовнішнім гармонійним впливом.

Вони знаходять застосування в ТАК, так як реальні збурення, а отже і реакції на них елемента або САУ можуть бути представлені як сума гармонійних сигналів.

Розглянемо сутність і різновиди частотних характеристик. Нехай на вхід лінійного елемента (рисунок 2.10, а) в момент часу $t=0$ поданий гармонійний вплив з частотою ω

$$x(t) = x_m \sin \omega t. \quad (2.34)$$

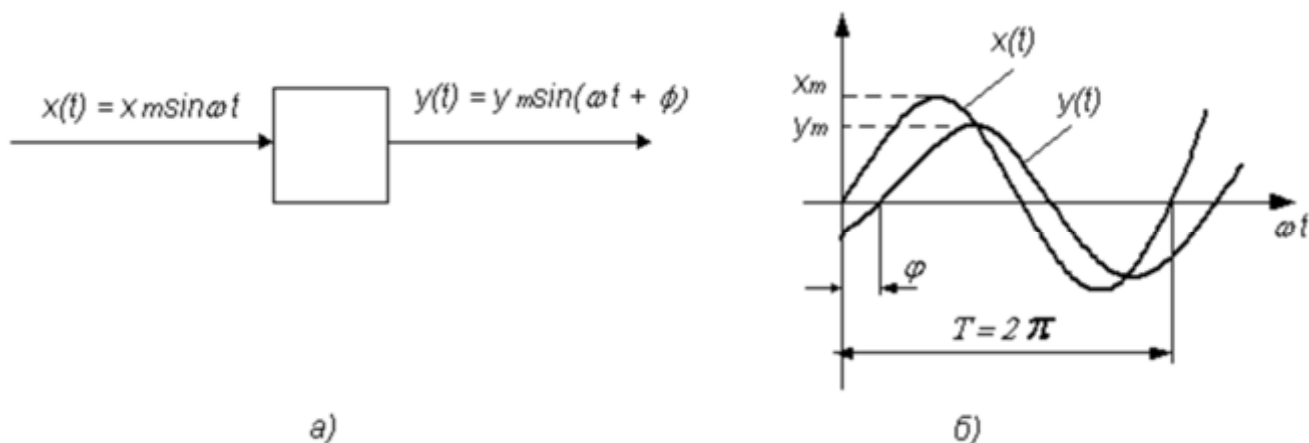


Рисунок 2.10 – Схема та криві, що пояснюють суть частотних характеристик

По завершенні перехідного процесу встановиться режим вимушених коливань і вихідна величина $y(t)$ буде змінюватися за тим же законом, що і вхідна $x(t)$, але в загальному випадку з іншою амплітудою y_m і з фазовим зсувом ϕ по осі часу відносно вхідного сигналу (рис. 2.10, б):

$$y(t) = y_m \sin(\omega t + \phi). \quad (2.35)$$

Провівши аналогічний експеримент, але при іншій частоті ω , можна побачити, що амплітуда y_m і фазовий зсув ϕ змінилися, тобто вони залежать від частоти. Можна переконатися також, що для іншого елемента залежності цих параметрів від частоти інші. Тому такі залежності можуть служити характеристиками динамічних властивостей елементів.

В ТАУ найбільш часто використовують такі частотні характеристики:

- амплітудна частотна характеристика (АЧХ);
- фазова частотна характеристика (ФЧХ);
- амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ).

Амплітудна частотна характеристика (АЧХ) - залежність відношення амплітуд вихідного і вхідного сигналів від частоти

$$A(\omega) = \frac{y_m}{x_m}. \quad (2.36)$$

АЧХ показує, як елемент пропускає сигнали різної частоти. Приклад АЧХ наведено на рисунку 2.11, а.

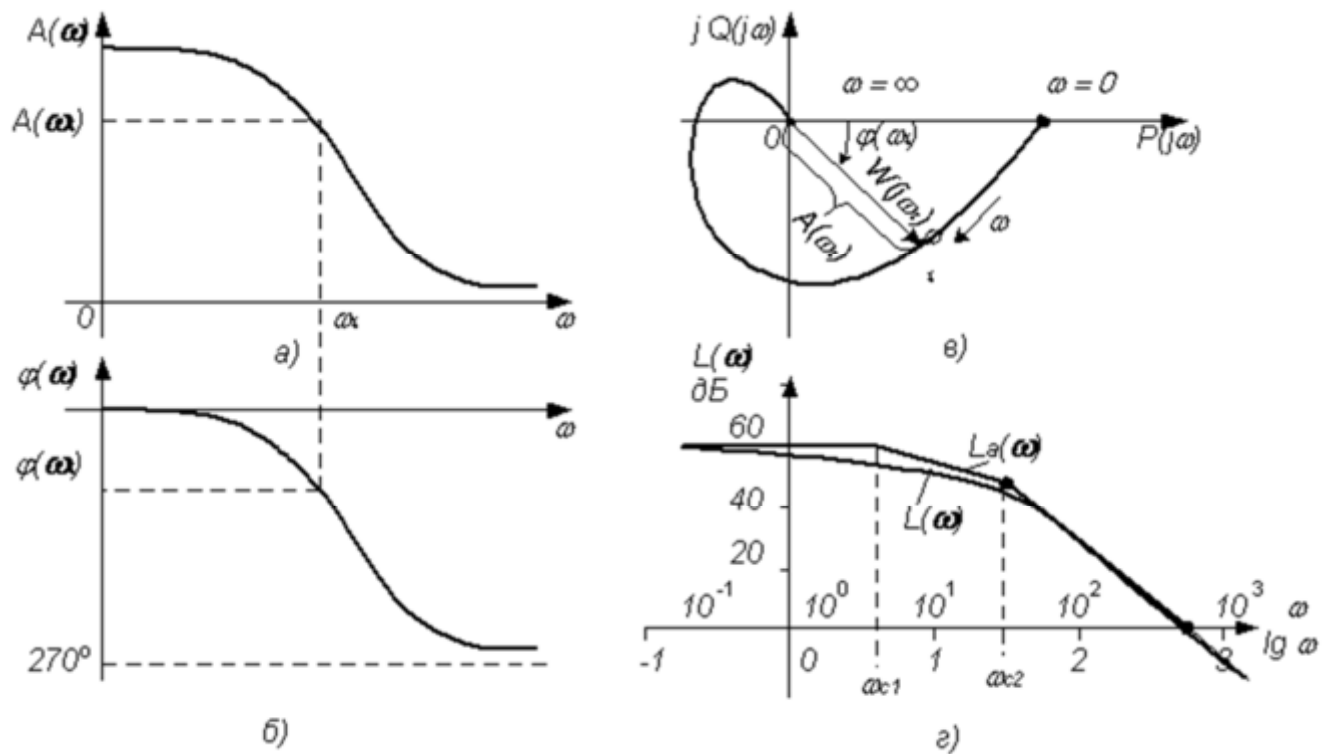


Рисунок 2.11 – Частотні характеристики:
а- амплітудна; б- фазова; в – амплітудно-фазова; логарифмічна

Фазова частотна характеристика ФЧХ - залежність фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами від частоти.

ФЧХ показує, яке відставання або випередження вихідного сигналу по фазі створює елемент при різних частотах. Приклад ФЧХ наведений на рисунку 2.11, б.

Амплітудну і фазову характеристики можна об'єднати в одну загальну - амплітудно-фазову частотну характеристику (АФЧХ). АФЧХ являє собою функцію комплексного змінного $j\omega$:

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (\text{показова форма}), \quad (2.37)$$

де $A(\omega)$ - модуль функції; $\varphi(\omega)$ - аргумент функції.

Кожному фіксованому значенню частоти ω_i відповідає комплексне число $W(j\omega_i)$, яке на комплексній площині можна зобразити вектором, що має довжину $A(\omega_i)$ і кут повороту $\varphi(\omega_i)$ (рисунку 2.11, в). Негативні значення $\varphi(\omega)$, що відповідають відставанню вихідного сигналу від вхідного, прийнято відраховувати за годинниковою стрілкою від позитивного напрямку дійсної осі.

При зміні частоти від нуля до нескінченності вектор $W(j\omega)$ повертається навколо початку координат, при цьому одночасно змінюється довжина вектору. Крива, яку при цьому опише кінець вектору, і є АФЧХ. Кожній точці характеристики відповідає певне значення частоти.

Проекції вектору $W(j\omega)$ на дійсну і уявну осі називають відповідно **дійсною і мнимю частотними характеристиками** і позначають $P(\omega)$, $Q(\omega)$. Це дозволяє записати АФЧХ в алгебраїчній формі:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (2.38)$$

АФЧХ, як і будь-яку комплексну величину, можна також представити в тригонометричній формі

$$W(j\omega) = A(\omega)\cos\varphi(\omega) + jA(\omega)\sin\varphi(\omega). \quad (2.39)$$

Аналітичний вираз для АФЧХ конкретного елемента можна отримати з його передаточної функції шляхом підстановки $p = j\omega$:

$$W(j\omega) = W(p) \big|_{p=j\omega}. \quad (2.40)$$

Зв'язок між різними частотними характеристиками наступний:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}, \quad (2.41)$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (2.42)$$

При практичних розрахунках САУ (без застосування електронних обчислювальних машин) зручно використовувати частотні характеристики, побудовані в логарифмічній системі координат. Такі характеристики називають **логарифмічними**. Вони мають меншу кривизну і тому можуть бути наближено замінені ламаними лініями, складеними з декількох прямолінійних відрізків. Причому, ці відрізки в більшості випадків вдається побудувати без громіздких обчислень за допомогою деяких простих правил. Крім того, в логарифмічній системі координат легко знаходити характеристики різних сполучень елементів, так як множення і ділення звичайних характеристик відповідає додавання і віднімання ординат логарифмічних характеристик.

За одиницю довжини по осі частот логарифмічних характеристик беруть декаду.

Декада - інтервал частот, укладений між довільним значенням частоти ω_i і його десятикратним значенням $10\omega_i$.

Відрізок логарифмічної осі частот, відповідний одній декаді, дорівнює 1.

Зазвичай в розрахунках використовують **логарифмічну амплітудну частотну характеристику (ЛАЧХ)**

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega), \quad (2.43)$$

ординати якої вимірюють в логарифмічних одиницях - Белах (Б) або децибелах (дБ).

Бел - одиниця виміру потужностей двох сигналів.

Якщо потужність одного сигналу більше (менше) потужності іншого сигналу в 10 разів, то ці потужності відрізняються на 1 Б, ($\lg 10 = 1$). Так як потужність гармонійного сигналу пропорційна квадрату його амплітуди, то при застосуванні цієї одиниці для вимірювання відношення амплітуд перед логарифмом з'являється множник 2. Наприклад, якщо на деякій частоті $A(\omega) = 100$, то це означає, що потужності вхідного і вихідного сигналів відрізняються в 100^2 разів, тобто на $2\lg 100 = 4$ Б або на 40 дБ, відповідно і $L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 40$ дБ.

При побудові фазової частотної характеристики логарифмічний масштаб застосовують тільки для осі абсцис (осі частоти).

На рисунку 2.11, г показані ЛАЧХ $L(\omega)$ (товста лінія) і відповідна їй наближена (асимптотична) характеристика $L_a(\omega)$ у вигляді прямолінійних відрізків (тонка лінія). Частоти, відповідні точкам стикування відрізків, називають **сполученими** і позначають ω_c .

За видом частотних характеристик всі елементи діляться на дві групи:

- мінімально-фазові;
- немінимально-фазові.

Мінімально-фазовий елемент - елемент, у якого все полюси і нулі передаточної функції $W(p)$ мають негативні дійсні частини.

Мінімально-фазові елементи дають мінімальний фазовий зсув порівняно з будь-якими іншими елементами, що мають таку ж амплітудну характеристику, але у якої дійсна частина хоча б одного полюса або нуля позитивна.

Мінімально-фазові елементи мають важливу для практичних розрахунків властивість: їх частотна передатна функція повністю визначається однією з трьох складових - $A(\omega)$, $P(\omega)$ і $Q(\omega)$. Це істотно спрощує завдання аналізу і синтезу мінімально-фазових систем.

2.3.6 Характеристики та моделі типових динамічних ланок САУ.

Типові динамічні ланки

Функціональні елементи, використовувані в САУ, можуть мати самі різні конструктивне виконання і принципи дії. Однак спільність математичних виразів, що зв'язують вхідні і вихідні величини різних функціональних елементів, дозволяє виділити обмежене число так званих **типових алгоритмічних ланок**. Кожній типовій алгоритмічній ланці відповідає певне математичне співвідношення між вхідною і вихідною величинами. Якщо це співвідношення є елементарним (наприклад, диференціювання, множення на постійний коефіцієнт), то і ланка називається **елементарною**. Алгоритмічні ланки, які описуються звичайними диференціальними рівняннями першого і другого порядку, отримали назву **типових динамічних ланок**. Типові динамічні ланки є основними складовими частинами алгоритмічних схем безперервних САУ, тому знання їх характеристик істотно полегшує аналіз таких систем.

Класифікація типових динамічних ланок

Класифікацію типових динамічних ланок зручно здійснити при розгляді різних форм диференціального рівняння

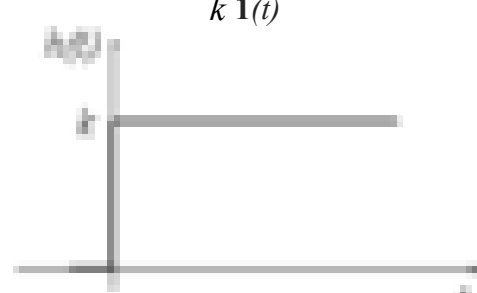
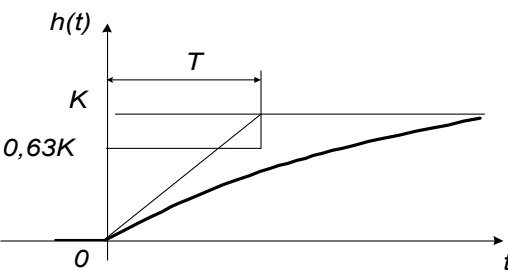
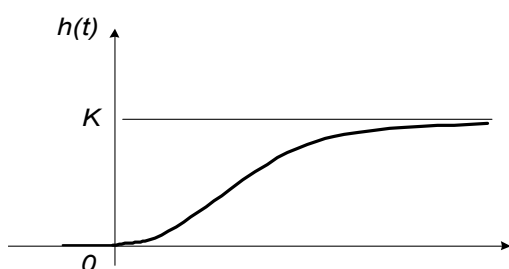
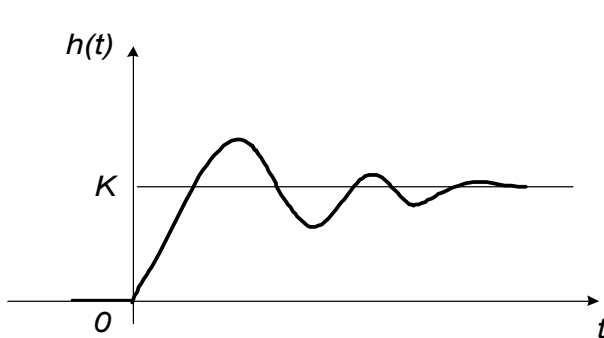
$$a_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 y(t) = b_0 \frac{dx}{dt} + b_1 x(t). \quad (2.44)$$

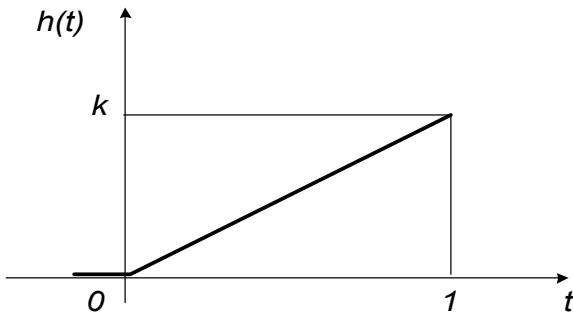
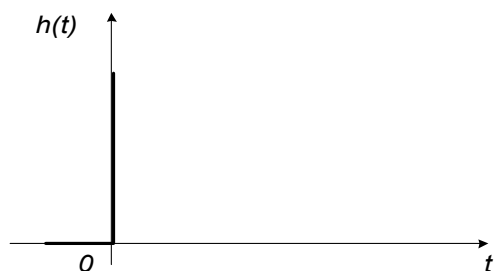
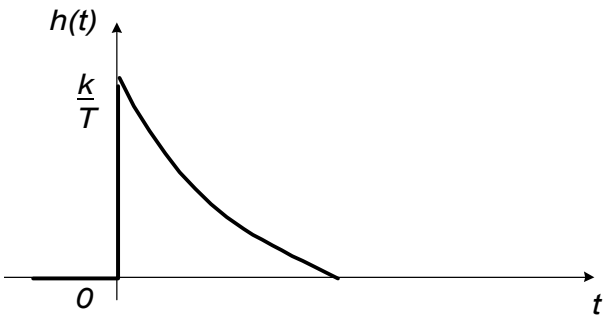
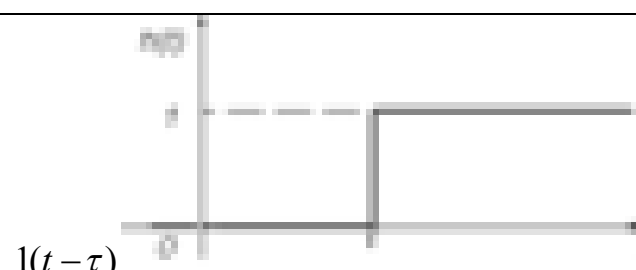
Значення коефіцієнтів рівняння (2.44) та назви ланок, що найбільш часто використовуються в САУ, наведені в таблиці 2.1, а їх передаточні та перехідні функції в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнтів рівняння (2.44)

№ п/п	Найменування ланки	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примітка
1	Безінерційна(пропорційна)	0	0	1	0	k	
2	Інерційна 1-го порядку (аперіодична)	0	T	1	0	k	
3	Інерційна 2-го порядку (аперіодична)	T_2^2	T_1	1	0	k	$T_1 \geq 2T_2$
4	Інерційна 2-го порядку (коливальна)	T_2^2	T_1	1	0	k	$T_1 < 2T_2$
5	Ідеальна інтегруюча	0	1	0	0	k	
6	Ідеальна диференційна	0	0	1	k	0	
7	Реальна інтегруюча	T	1	0	0	k	
8	Реальна диференційна	0	T	1	k	0	

Таблиця 2.2 – Передаточні та перехідні функції типових динамічних ланок

№	Найменування ланки та її рівняння	Передаточна функція $W(p)$	Перехідна функція $h(t)$
1	Безінерційна (пропорційна) $y(t) = kx(t)$	k	$k \cdot 1(t)$ 
2	Інерційна 1-го порядку (аперіодична) $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$	$\frac{k}{Tp + 1}$	$k(1 - e^{-t/T})1(t)$ 
3	Інерційна 2-го порядку (аперіодична) $T_2^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ $T_1 \geq 2T_2$	$\frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$ $T_1 \geq 2T_2$	$k(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-t/T_3} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-t/T_4})1(t)$, де $T_3 + T_4 = T_1$; $T_3 T_4 = T_2^2$ 
4	Інерційна 2-го порядку (коливальна) $T_2^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ $T_1 < 2T_2$	$\frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$ $T_1 < 2T_2$	$k \left[1 - \frac{1}{\beta T_2} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi) \right] 1(t)$, де $\beta = \sqrt{1 - \xi^2} / T_2$; $\varphi = \arccos \xi$; $\xi = T_1 / 2T_2$ 

№	Найменування ланки та її рівняння	Передаточна функція $W(p)$	Перехідна функція $h(t)$
5	Ідеальна інтегруюча $\frac{dy(t)}{dt} = kx(t)$	$\frac{k}{p}$	$kt1(t)$ 
6	Ідеальна диференціююча $y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$	kp	$k\delta(t)$ 
7	Реальна інтегруюча $T \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = kx$	$\frac{k}{p(Tp + 1)}$	$h(t) = k[t - T(1 - e^{-t/T})]$ 
8	Реальна диференціююча $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$	$\frac{kp}{Tp + 1}$	$(k/T)e^{-t/T}$ 
9	Ланка із запізненням $y(t) = x(t - \tau)$	$e^{-p\tau}$	

2.4 НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ

Елементи та устрої автоматики, з яких складаються різні САУ, повинні мати високу надійність, так як несправне виконання функції будь-яким елементом системи може привести до виходу її з ладу. Тому при проектуванні, створенні та експлуатації елементів автоматики необхідно приділяти увагу питанням забезпечення їх високої надійності.

Під надійністю розуміють властивість елемента зберігати свої параметри в визначених межах при заданих режимах роботи та умовах експлуатації.

Надійність оцінюють різними критеріями. ***Кількісне значення критерію надійності для конкретного елемента називається характеристикою надійності.*** Однак жодна з кількісних характеристик в загальному випадку не може бути повною характеристикою надійності, оскільки поняття надійності більш глибоке ніж будь-яка кількісна характеристика.

Слід відмітити, що хоч надійність елемента можна рахувати за технічний параметр подібно коефіцієнту підсилення або чутливості, однак кількісний опис цього параметра зустрічає ряд труднощів. Це пояснюється тим, що на надійність впливає значно більше факторів чим на інші параметри елемента. До таких факторів відносяться число та якість деталей, з яких складається елемент, режими роботи елемента, умови експлуатації, якість технічного обслуговування та багато інших, більшість з котрих є випадковими. Тому надійність елементів і пристроїв САУ повно охарактеризувати можна тільки декількома кількісними характеристиками.

Математичною основою теорії надійності є теорія ймовірності та математична статистика, тому всі критерії характеризують надійність визначеного класу елементів, а не конкретного зразку.

2.4.1 Класифікація відмов

Під відмовою в загальному випадку розуміють подію, після появи якої елемент стає ненадійним. Отже відмова має місце не тільки в випадку виходу елемента з ладу, але й при відхиленнях його параметрів від допустимих меж.

За типом відмови вони поділяються на

- функціональний (виконання основних функцій об'єктом припиняється, наприклад, поломка зубів шестерні);
- параметричний (деякі параметри об'єкта змінюються в неприпустимих межах, наприклад, втрата точності верстата).

За природою відмови бувають

- випадкові, обумовлені непередбачуваними перевантаженнями, дефектами матеріалу, помилками персоналу або збоями системи управління і т. п. ;
- систематичні, обумовлені закономірними і неминучими явищами, що викликають поступове накопичення пошкоджень: втома, знос, старіння, корозія і т. п.

За характером виникнення розподіляють відмови

- раптові - відмови, що характеризуються швидкою (стрибкоподібною) зміною значень одного чи декількох параметрів об'єкта, що визначають його якість. В більшості випадків вона обумовлена скритими дефектами матеріалів та деталей і є результатом виходу з ладу елемента за рахунок, наприклад, електричного або механічного пошкодження. Поступова відмова виникає в

результаті тривалої зміни параметрів елемента до значень, що перевищують встановлені норми, що обумовлене старінням та зносом деталей, зміною температури, тиску, вологості оточуючого середовища, напруг живлення і т.п.

- поступові - відмови, що характеризується повільною (поступовою) зміною параметрів об'єкта. Характер відмов в багатьох залежить від типу елемента та його конструктивних особливостей. Наприклад для контактних електромеханічних реле характерні як раптові відмови (перегорання обмоток реле, обрив проводу), так й поступові відмови, що викликані зносом контактів (розрегулювання та обгорання контактів).

За причиною виникнення розрізняють

- конструктивну відмову, викликану недоліками і невдалою конструкцією об'єкта;
- виробничу відмову, пов'язану з помилками при виготовленні об'єкта через недосконалість або порушення технології;
- експлуатаційну відмову, викликану порушенням правил експлуатації.

За характером усунення відмови діляться на

- стійкі (остаточні) (втрата надійності на час, що необхідний для усунення відмови в процесі ремонту);
- що перемежуються (виникають та зникають) (відмова продовжується короткий час, після чого елемент самовідновлюється і стає надійним). Зазвичай наявність такої відмови свідчить про наближення остаточної поступової відмови.

За наслідками поділяють

- легкі відмови (що легко усунути);
- середні відмови (що не викликають відмови суміжних вузлів - вторинні відмови);
- важкі відмови (що викликають вторинні відмови чи що призводять до загрози життю і здоров'ю людини).

За подальшим використанням об'єкта виділяють

- повні відмови, що виключають можливість роботи об'єкта до їх усунення;
- часткові відмови, при яких об'єкт може частково використовуватися.

За легкістю виявлення

- очевидні (явні) відмови;
- приховані (неявні) відмови.

За часом виникнення

- відмови при прироблянні;
- відмови при нормальній експлуатації;
- зносові відмови, викликані незворотними процесами зносу деталей, старіння матеріалів тощо

Як й всі випадкові події, відмови можуть бути **незалежними та залежними**.

Якщо відмова елемента системи не змінює ймовірності відмови інших елементів, то така відмова є незалежною, в іншому випадку – залежною.

Поряд з відмовою розрізняють також ушкодження. Несуттєве пошкодження не порушує працездатність (наприклад, перегоріла сигнальна лампа). Істотне ж пошкодження є відмова. Наслідками відмови можуть бути: невиконання заданих

показників продуктивності; позаплановий ремонт; дострокова заміна вузла; завищений обсяг робіт при плановому ремонті.

Внаслідок того, що відмови є подіями випадковими, кількісні характеристики надійності носять статистичний характер.

2.4.2 Кількісні характеристики надійності

Ймовірність безвідмовної роботи – ймовірність того, що елемент буде зберігати параметри в заданих межах на протязі визначеного часу при визначених умовах експлуатації. Якщо позначити через $P(t)$ ймовірність безвідмовної роботи на протязі часу t , а через $Q(t)$ - ймовірність відмови за той же час, то

$$P(t) = 1 - Q(t). \quad (2.45)$$

Величину $P(t)$ на основі експериментальних даних можна визначити з відношення

$$P(t) \approx \frac{n(t)}{N_0}, \quad (2.46)$$

де $n(t)$ - кількість елементів, що працювали без відмови на протязі часу t , N_0 - число елементів на початку випробування.

Середній час безвідмовної роботи – математичне очікування часу безвідмовної роботи.

$$t_{CP} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.47)$$

На основі експериментальних даних цей параметр визначається за формулою

$$t_{CP} \approx \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}, \quad (2.48)$$

де t_i - час безвідмовної роботи i -го елемента; N - кількість елементів.

За цією величиною можна судити о надійності елементів, визначати кількість запасних елементів для роботи на протязі календарного часу. Однак математичне очікування не надає повної оцінки часу безвідмовної роботи.

Частота відмов – щільність ймовірності часу роботи елемента з моменту включення до відмови. Ймовірність безвідмовної роботи пов'язана з частотою відмов $a(t)$ співвідношенням

$$1 - P(t) = \int_0^t f(t) dt = Q(t). \quad (2.49)$$

Для визначення частоти відмов на основі експериментальних даних користуються співвідношенням

$$a(t) \approx \Delta n / N_0 \Delta t, \quad (2.50)$$

де Δn - число елементів, які відмовили за інтервал часу Δt ; N_0 - початкова кількість елементів.

По величині частоти відмов можна судити о кількості елементів, які можуть вийти з ладу за деякий проміжок часу.

Небезпека (інтенсивність) відмов – це умовна щільність ймовірності часу до відмови в момент часу t за умови, що елемент не відмовив до моменту часу t .

Небезпека відмов $\lambda(t)$ пов'язана з частотою відмов та ймовірністю безвідмовної роботи співвідношенням

$$\lambda(t) = a(t) / P(t). \quad (2.51)$$

Величина $\lambda(t)$ на основі експериментальних даних визначається співвідношенням

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n}{N(t) \Delta t}, \quad (2.52)$$

де Δn - число елементів, що відмовили за час Δt ; $N(t) = \frac{N_{II} + N_{III}}{2}$; N_{II}, N_{III} - число справних елементів на початку та кінці цього інтервалу часу.

При будь-якому законі розподілу відмов існує наступна залежність між кількісними характеристиками $\lambda(t), P(t)$:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (2.53)$$

Якщо відома небезпека відмов, то можна визначити ймовірність безвідмовної роботи та визначити інші кількісні показники надійності.

Тому небезпека відмов є основною кількісною характеристикою надійності елементів.

Небезпека відмов більшості елементів змінюється на протязі часу (рисунок 2.12)

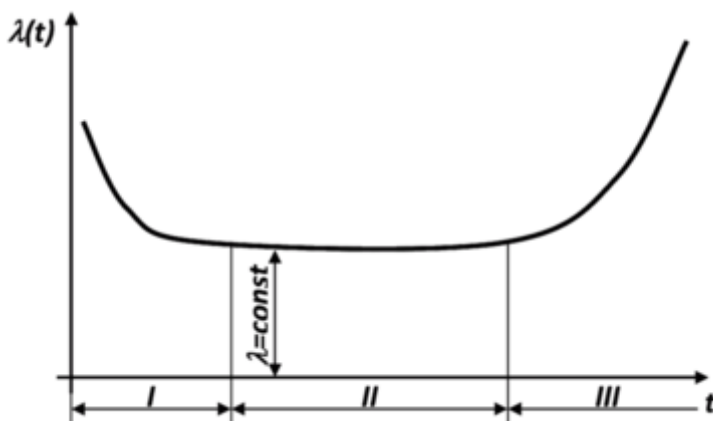


Рисунок 2.12 – Графік небезпеки відмов

Зазвичай чітко виражені три характерних ділянки на цьому графіку. I – період прироблення та ранніх відмов, характеризується великою кількістю відмов завдяки скритим дефектам; II – ділянка нормальної роботи, під час якої небезпека відмов зменшується і стає майже постійною величиною; III – ділянка старіння, на якій небезпека відмов зростає.

Небезпека відмов залежить від виду та якості елементів, режиму їх роботи та умов експлуатації. Навіть для однотипних елементів, що працюють в одному режимі та однакових умовах експлуатації, небезпека відмов може коливатися в досить широких межах. Це пояснюється різницею якості елементів. Тому наявні дані о величині небезпеці для конкретних елементів варіюються в дуже широких межах.

Узагальнені дані по інтенсивності відмов деяких компонентів наведені в таблицях 2.3-2.5.

Таблиця 2.3 – Мінімальні та максимальні значення інтенсивності відмов резисторів

Тип резисторів	Інтенсивність відмов, 10^{-6} 1/год	
	λ_{min}	λ_{max}
Постійні вуглецеві	0,005	0,9
Постійні композиційні	0,005	0,3
Постійні металоплівкові	0,01	0,06
Постійні дровові	0,02	0,1
Змінні композиційні	0,02	0,3

Таблиця 2.4 - Мінімальні та максимальні значення інтенсивності відмов конденсаторів

Тип конденсаторів	Інтенсивність відмов, 10^{-6} 1/год	
	λ_{min}	λ_{max}
Паперові	0,003	0,29
Керамічні	0,042	1,64
Слюдяні	0,005	0,132
Скляні	0,0005	0,87
Повітряні змінні	0,01	0,082
Електролітичні	0,003	0,513

Таблиця 2.5 - Інтенсивності відмов котушок індуктивності

Група котушок	Діаметр сердечника, мм	Діаметр проводу обмотки, мм	λ , 10^{-6} 1/год
Котушки високої стабільності та крупних габаритів	-	Більше 0,5	0,001-0,01
Котушки середніх габаритів на броньових сердечниках	Більше 10	Більше 0,1	1-10
Котушки мініатюрні на тороїдальних та броньових сердечниках	Менше 10	Менше 0,1	10-100

Контрольні питання та завдання до глави 2

1. Що визначає характеристика управління елемента?
2. Перелічіть відомі вам характеристики управління.
3. Якими параметрами характеризуються елементи з безперервною характеристикою управління?
4. Якими параметрами характеризуються елементи з релейною характеристикою управління?
5. Що таке динамічні характеристики елемента їх види і особливості?
6. Які типові зовнішні впливи вам відомі?
7. Перелічіть типові динамічні ланки, вкажіть їхні передаточні функції.
8. Що таке часові та частотні характеристики елемента?
9. Якими параметрами можна оцінити надійність елементів САУ?

Розділ 2. СПРИЙМАЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ АВТОМАТИКИ

Глава 3. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА СТРУКТУРНІ СХЕМИ ДАТЧИКІВ

3.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДАТЧИКИ

Датчик – устрій, що функціонально перетворює контрольовану вхідну величину у вихідний сигнал, зручний для подальшої обробки та дистанційної передачі.

Датчик - засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки і (або) зберігання, але не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем. Датчики, виконані на основі електронної техніки, називаються електронними датчиками. Окремо взятий датчик може бути призначений для вимірювання (контролю) та перетворення однієї фізичної величини або одночасно декількох фізичних величин.

До складу датчика входять чутливі і перетворювальні елементи. Основними характеристиками електронних датчиків є чутливість і похибка.

Датчики широко використовуються в наукових дослідженнях, випробуваннях, контролі якості, телеметрії, системах автоматизованого управління і в інших областях діяльності і системах, де потрібне отримання вимірювальної інформації.

Датчики є елементом технічних систем, призначених для вимірювання, сигналізації, регулювання, управління пристроями або процесами. Датчики перетворюють контрольовану величину (тиск, температура, витрата, концентрація, частота, швидкість, переміщення, напруга, електричний струм і т. п.) в сигнал (електричний, оптичний, пневматичний), зручний для вимірювання, передачі, перетворення, зберігання та реєстрації інформації про стан об'єкта вимірювань.

Історично датчики пов'язані з технікою вимірювань і вимірювальними приладами, наприклад термометри, витратоміри, барометри, прилад «авіагоризонт» і т. д. Узагальнюючий термін датчик зміцнився у зв'язку з розвитком автоматичних систем управління, як елемент узагальненої логічної концепції датчик - пристрій управління - виконавчий пристрій - об'єкт управління. В якості окремої категорії використання датчиків в автоматичних системах реєстрації параметрів можна виділити їх застосування в системах наукових досліджень і експериментів.

Визначення датчика

Широко зустрічаються такі визначення:

- чутливий елемент, приймач, що перетворює параметри середовища в придатний для технічного використання сигнал, зазвичай електричний, хоча можливо і інший по природі, наприклад - пневматичний сигнал;
- закінчений виріб на основі зазначеного вище елемента, що включає, залежно від потреби, пристрої посилення сигналу, лінеаризації, калібрування, аналого-цифрового перетворення та інтерфейсу для інтеграції в системи управління. У цьому випадку чутливий елемент датчика сам по собі може називатися сенсором.
- датчиком називається частина вимірювальної або керуючої системи, що представляє собою конструктивну сукупність вимірювальних перетворювачів, що включає перетворювач виду енергії сигналу, розміщену в зоні дії факторів,

що впливають об'єкта і сприймає природно закодовану інформацію від цього об'єкта.

- датчик - конструктивне відокремлена частина вимірювальної системи, що містить один або кілька первинних перетворювачів, а також один або кілька проміжних перетворювачів.

Застосування датчиків

Датчики використовуються в багатьох галузях економіки - видобутку та переробки корисних копалин, промисловому виробництві, транспорті, комунікаціях, логістиці, будівництві, сільському господарстві, охороні здоров'я, науці та інших галузях - будучи в даний час невід'ємною частиною технічних пристроїв.

Останнім часом у зв'язку із здешевленням електронних систем все частіше застосовуються датчики зі складною обробкою сигналів, можливостями налаштування і регулювання параметрів і стандартним інтерфейсом системи управління. Є певна тенденція розширювального трактування та перенесення цього терміну на вимірювальні прилади, що з'явилися значно раніше масового використання датчиків, а також за аналогією - на об'єкти іншої природи, наприклад, біологічні.

Датчики за своїм призначенням і технічною реалізацією близькі до поняття «вимірювальний інструмент» («вимірювальний прилад»). Однак показання приладів сприймаються людиною, як правило, безпосередньо (за допомогою дисплеїв, табло, панелей, світлових і звукових сигналів та ін.), у той час як показники датчиків вимагають перетворення у форму, в якій вимірювальна інформація може бути сприйнята людиною. Датчики можуть входити до складу вимірювальних приладів, забезпечуючи вимір фізичної величини, результати якого потім перетворюються для сприйняття оператором вимірювального приладу.

В САУ датчики можуть виступати в ролі ініціюючих пристроїв, приводячи в дію обладнання, арматуру та програмне забезпечення. Показання датчиків в таких системах, як правило, записуються на накопичувач для контролю, обробки, аналізу і виводу на дисплей або друкуючий пристрій. Величезне значення датчики мають у робототехніці, де вони виступають у ролі рецепторів, за допомогою яких роботи та інші автоматичні пристрої отримують інформацію з навколишнього світу і своїх внутрішніх органів.

У побуті датчики використовуються в термостатах, вимикачах, термометрах, барометрах, смартфонах, посудомийних машинах, кухонних плитах, тостерах, прасках та іншій побутової техніці.

3.2 КЛАСИФІКАЦІЯ ДАТЧИКІВ

Датчики поділяються на дві великі групи:

- Активні (генераторні)
- Пасивні (параметричні)

За вимірюваним параметром розрізняють датчики:

- тиску;
 - абсолютного тиску;
 - надлишкового тиску;
 - розрідження;

- тиску-розрідження;
- різниці тиску;
- гідростатичного тиску;
- витрат;
 - механічні лічильники витрати;
 - перепадоміри;
 - ультразвукові витратоміри;
 - електромагнітні витратоміри;
 - коріолісові витратоміри;
 - вихрові витратоміри;
- рівня;
 - поплавкові;
 - ємнісні;
 - радарні;
 - ультразвукові;
- температури;
 - термопари;
 - термометри опору;
 - пірометри;
 - теплового потоку;
- концентрації;
 - кондуктометри;
- радіоактивності (також іменуються детекторами радіоактивності або випромінювань);
 - іонізаційні камери;
 - прямого заряду;
- переміщення;
 - абсолютні шифратори;
 - відносні шифратори;
 - LVDT;
- положення
 - контактні;
 - безконтактні;
- фотодатчики;
 - фотодіоди;
 - фото сенсори;
- кутового положення;
 - сельсини;
 - перетворювачі кут-код;
 - RVDT;
 - вібрації;
 - п'єзоелектричні;
 - вихрострумів;
 - механічних величин;

- відносного розширення ротора;
- абсолютного розширення;
- вологості
- дугового захисту

За принципом дії

- оптичні датчики (фотодатчики);
- магнітоелектричні датчики (на основі ефекту Холла);
- п'єзоелектричні датчики;
- тензоперетворювачі;
- ємнісні датчики;
- потенціометричні датчики;
- Індуктивний датчик.

За характером вихідного сигналу

- дискретні;
- аналогові;
- цифрові;
- імпульсні.

За середовищем передачі сигналів

- провідні;
- бездротові.

За кількістю вхідних величин

- одновимірні;
- багатовимірні.

За технологією виготовлення

- елементні;
- інтегральні.

3.3 СТРУКТУРНІ СХЕМИ ДАТЧИКІВ

3.3.1 Найпростіші перетворювальні ланки

Дослідження властивостей датчиків, а також розробка нових видів істотно полегшуються, якщо розглядати датчики як сукупність найпростіших ланок. Кожна ланка являє собою самостійний перетворювач однієї величини в іншу. Датчик може складатися як з однієї такої ланки (термопара, термометр опору), так і з декількох, з'єднаних між собою в певному порядку.

Елементарні перетворювальні ланки можуть бути розбиті на групи, що відрізняються принципами перетворення, властивостями і видом характеристик.

1. За характером енергетичних перетворень розрізняють: ланки-перетворювачі, що здійснюють безпосереднє енергетичне перетворення вхідного сигналу у вихідний (рисунки 3.1), і ланки - модулятори, в яких вхідна величина тим чи іншим способом модулює енергію зовнішнього джерела (рисунки 3.2).
2. За видом статичної характеристики: лінійні (без початкового сигналу $y = Sx$ і з початковим сигналом $y = y_0 + Sx$), нелінійні (зі зростаючою або падаючою характеристикою), релейні. Нелінійну характеристику у вузькому діапазоні змін

вхідних величин ($x_0 \pm x$) можна розглядати як лінійну $y = y_0 + Sx$, де S - чутливість в точці $x = x_0$.

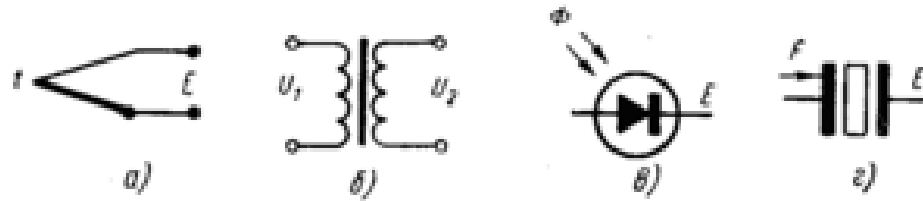


Рисунок 3.1 – Приклади ланок-перетворювачів; а - термопара; б - трансформатор; в - фотодіод в вентильному режимі; г - п'єзокристал.

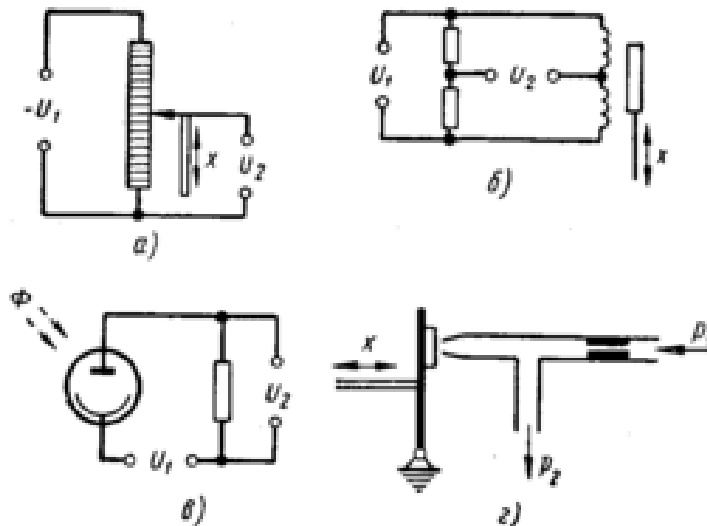


Рисунок 3.2 – Приклади ланок-модуляторів: а - реостатний датчик; б - індуктивний датчик; в – фотоелемент; г - сопло-заслінка.

3. За реакцією на зміну знака вхідної величини розрізняють ланки з непарною характеристикою: $f(-x) = -f(x)$, з парною характеристикою $f(-x) = f(x)$ і ланки з несиметричною характеристикою (вентильні) $|f(-x)| \neq |f(x)|$

4. За можливості здійснення зворотного перетворення: ланки оборотні (трансформатор, п'єзокристал) і необоротні (електромагніт, всі ланки-модулятори).

5. За динамічними властивостями.

3.3.2 Класифікація датчиків за структурою

Структурно датчики можна розділити на

- датчики прямого перетворення,
- диференціальні датчики,
- логометричні датчики,
- компенсаційні датчики.

У датчиках прямого перетворення (рисунок 3.3, а) сигнал поширюється в одному напрямку. При цьому можливий ланцюжок перетворень.

В **каскадних датчиках** (рисунок 3.3, б) з'єднання датчиків у послідовне коло характеризується тим, що вихідна величина кожної ланки є вхідною величиною наступної. Приймаючи характеристики лінійними, вигляду $x_{i+1} = F_{i+1}x_i$, отримаємо сумарну характеристику $A_{ВНХ} = F_1 F_2 \dots F_n A_{ВХ}$. При нелінійних характеристиках, наприклад, $x_1 = F_1(A_{ВХ})$, $x_2 = F_2(x_1)$, якщо ці функції є зворотними за своїм

характером, то загальна характеристика перетворювача лінійна. Ця обставина використовується для лінеаризації характеристик датчиків.

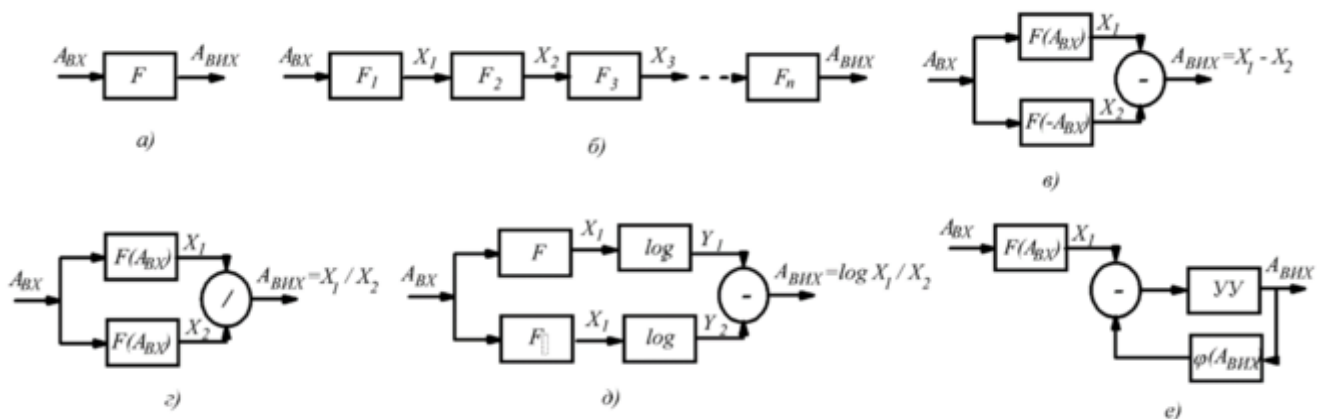


Рисунок 3.3 – Структурні схеми датчиків

В **диференціальних датчиках** (рисунок 3.3, в) паралельно працюють два чутливих елемента. Вхідний вплив A_{BX} на елементи подається з різними знаками: стиснення-розтягнення; переміщення вліво-вправо; струм позитивний-негативний і т.п. Передбачається, що статичні характеристики елементів не є парними, тобто $F(A_{BX}) = -F(-A_{BX})$. Вихідний сигнал датчика формується як різницевий сигнал

$$A_{BHX} = F(A_{BX}) - F(-A_{BX}). \quad (3.1)$$

Припустимо, що статичні характеристики сенсорів лінійні: $F(x) = ax + b$. Тоді, $x_1 = aA_{BX} + b$; $x_2 = a(-A_{BX}) + b$; $A_{BHX} = x_1 - x_2 = 2aA_{BX}$.

З отриманого виразу випливає, що статична характеристика проходить через початок координат (тобто знак вихідного сигналу визначається знаком вхідного) і передавальний коефіцієнт (чутливість) датчика вдвічі більше передавальних коефіцієнтів сенсорів.

Ще одна позитивна властивість диференціальних датчиків полягає в їх більшій стабільності. Припустимо, що на сенсори діє дестабілізуючий фактор, наприклад, підвищується температура. Це збурення проявляється в сенсорах як вхідний вплив ΔA_{BX} . При цьому,

$$x_1 = a(A_{BX} + \Delta A_{BX}) + b; x_2 = a(-A_{BX} + \Delta A_{BX}) + b; A_{BHX} = x_1 - x_2 = 2aA_{BX}. \quad (3.2)$$

Отриманий вираз показує, що диференціальна структура датчика виключає вплив дестабілізуючого чинника.

В **логометричних датчиках** вихідна величина пропорційна відношенню двох інших, одна з яких (або обидві) є функцією вхідної величини. За структурною схемою логометричний перетворювач відрізняється від диференціального тим, що ланка вирахування двох величин замінено ланкою відношення (рисунок 3.3, г). Основна перевага логометричної схеми полягає в тому, що багато додаткових факторів, що однаково впливають на точність обох перетворювачів, можуть бути компенсовані у всьому діапазоні змін вхідної величини.

Так, якщо $x_1 = F_1 \psi A_{BX}$, $x_2 = F_2 \psi A_{BX0}$, то $A_{BHX} = \frac{F_1 A_{BX}}{F_2 A_{BX0}}$, де ψ - множник, що

виражає вплив зовнішніх факторів, наприклад, температури, напруги живлення.

Компенсація успішно відбувається при лінійній характеристиці первинних перетворювачів, що проходить через 0. Якщо обраний принцип перетворення не забезпечує такої характеристики, то можна в логометричну схему включити два здвоєних диференціальних перетворювача.

Найбільш відповідальною та трудно отримуваною частиною логометричного перетворювача є ділильна ланка, тому часто використовують схему, наведену на рисунку 3.3, д, де використовується звичайна ланка відрахування при попередньому логарифмуванні сигналів.

Компенсаційна схема датчика (рисунк 3.3, е) містить контур зворотного зв'язку, що містить пристрій управління УУ і формувач компенсуючого впливу Φ ($A_{\text{вих}}$). Вихідний сигнал сенсора x_1 порівнюється з компенсуючим впливом x_2 . Різницевий сигнал $d = (x_1 - x_2)$ надходить на пристрій управління, яке формує сигнал $A_{\text{вих}}$. Цей сигнал подається на формувач компенсуючих впливів, який створює сигнал $x_2 = x_1$. При цьому, сигнал неузгодженості $d = 0$. Величина вихідного сигналу $A_{\text{вих}}$ визначається вихідним сигналом сенсора x_1 . Похибки компенсаційних схем визначаються похибками кола зворотного зв'язку.

3.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКІВ

Може знадобитися кілька етапів перетворень, перш ніж вхідний сигнал, що надходить на датчик, перетвориться у вихідний електричний сигнал. Для прикладу розглянемо оптоволоконний датчик тиску. Зовнішній тиск, що діє на датчик, викликає деформацію волоконного світловода, що в свою чергу призводить до зміни його показника заломлення, через що змінюються характеристики оптичної лінії передачі і відбувається модуляція щільності фотонів. Результуючий потік фотонів детектується і перетвориться в електричний струм. Далі будуть розглядатися загальні характеристики датчиків, незалежно від їх фізичної природи та кількості необхідних проміжних етапів перетворень. При цьому датчики будуть представлені у вигляді «чорних ящиків», де важливими будуть тільки співвідношення між сигналами на їх входах і виходах.

3.4.1 Статичні характеристики

Передавальна функція

Для кожного датчика можна вивести ідеальне або теоретичне співвідношення, яке зв'яже сигнали на його вході і виході. Якщо була б можливість ідеально спроектувати датчик, виготовити його з ідеальних матеріалів і ідеальними інструментами, при цьому всі роботи виконувалися б ідеальними працівниками, то сигнал на виході такого датчика завжди би відповідав реальному значенню зовнішнього впливу. Виведене ідеальне співвідношення між вхідним і вихідним сигналом можна виразити у вигляді або таблиці, або графіка, або математичного виразу. Цей ідеальний (теоретичний) вираз часто називають функцією передачі.

Передавальна функція встановлює взаємозв'язок між вихідним електричним сигналом датчика y і зовнішнім впливом x : $y = f(x)$. Ця функція може бути як лінійною, так і нелінійною (наприклад, логарифмічною, експонентною або ступеневою). У багатьох випадках передавальна функція є одномірною (тобто пов'язує вихідний сигнал тільки з одним зовнішнім впливом).

Одномірну лінійну функцію можна представити у вигляді виразу:

$$y = a + bx, \quad (3.3)$$

де a - постійна складова (тобто значення вихідного сигналу при нульовому вхідному впливі), b - нахил прямої, який часто називають чутливістю датчика.

Параметр y - ця та характеристика електричного сигналу, яку системи збору даних сприймають в якості вихідного сигналу датчика. В залежності від властивостей датчика це може бути амплітуда, частота або фаза.

Логарифмічна передавальна функція має вигляд:

$$y = a + b \ln x, \quad (3.4)$$

експоненціальна -

$$y = ae^{kx}, \quad (3.5)$$

ступенева -

$$y = a_0 + a_1 x^k, \quad (3.6)$$

де k - постійне число.

Однак датчик може мати передавальний функцію, яку неможливо описати вищенаведеними апроксимаційними виразами. У таких випадках застосовуються апроксимації у вигляді поліномів більш високих порядків.

Для нелінійних передавальних функцій чутливість не є константою, як це було у випадку лінійних залежностей. Для кожного конкретного значення вхідного сигналу x_0 її можна визначити у вигляді:

$$b = \frac{dy(x_0)}{dx}. \quad (3.7)$$

У багатьох випадках нелінійні датчики можуть вважатися лінійними всередині обмеженого діапазону значень. Для більш широкого діапазону значень нелінійна передавальна функція представляється у вигляді відрізків декількох прямих ліній. Це називається кусково-лінійною апроксимацією. Для того, щоб визначити, чи може дана передавальна функція бути представлена у вигляді лінійної залежності, спостерігають за зміною вихідних сигналів в лінійній і реальній моделях при поступовому збільшенні вхідного сигналу. Якщо різниця сигналів не виходить за допустимі межі, передавальну функцію даного датчика можна вважати лінійною.

У випадках, коли на вихідний сигнал датчика впливають кілька зовнішніх впливів, його передавальна функція стає багатовимірною. Прикладом датчика з двовимірною передавальною функцією є інфрачервоний датчик температури. Його передавальна функція пов'язує дві температури (T_b - абсолютну температуру об'єкта вимірювання і T_s - абсолютну температуру поверхні сенсорного елементу) з вихідною напругою U :

$$U = G(T_b^4 - T_s^4), \quad (3.8)$$

де G - константа. З виразу видно, що залежність між температурою об'єкта та вихідною напругою (передавальна функція) є не тільки нелінійною (параболою четвертого порядку), але вона також залежить від температури поверхні чутливого елемента. Для визначення чутливості такого датчика по відношенню до температури об'єкта, треба взяти приватну похідну від виразу (3.8).

Діапазон вимірюваних значень.

Динамічний діапазон зовнішніх впливів, який датчик може сприйняти, називається діапазоном вимірюваних значень (FS - повна шкала). Ця величина показує максимально можливе значення вхідного сигналу, яке датчик може перетворити в електричний сигнал, не виходячи за межі допустимих похибок. Для

датчиків з дуже широкою і нелінійною амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) динамічний діапазон зовнішніх впливів часто виражається в децибелах, які є логарифмічним заходом відносин або потужності, або напруг. Завжди необхідно пам'ятати, що децибели виражають не абсолютні значення, а тільки відносини величин. Сигнали, відображені в логарифмічному вигляді, мають набагато менші значення, ніж вихідні, що на практиці в ряді випадків буває дуже зручно. Оскільки логарифмічна шкала є нелінійною, сигнали низького рівня в ній представляються з великою роздільною здатністю, тоді як сигнали високого рівня зазнають більше стиснення. Іншими словами, логарифмічна шкала для малих сигналів працює як мікроскоп, а в разі великих сигналів – як телескоп. За визначенням децибел дорівнює десяти логарифмам відносини потужності двох сигналів.

Діапазон вихідних значень.

Діапазон вихідних значень (FSO) - алгебраїчна різниця між електричними вихідними сигналами, виміряними при максимальному і мінімальному зовнішньому впливі. У цю величину повинні входити всі можливі відхилення від ідеальної передавальної функції.

Точність.

Точність - дуже важлива характеристика будь-якого датчика. Правда, коли говорять про точність датчика, найчастіше мають на увазі його неточність або похибку вимірювань. Під похибкою вимірювань, як правило, розуміють величину максимальної розбіжності між показаннями реального та ідеального датчиків. Вважається, що виміряне значення відповідає реальному з певним ступенем достовірності.

Похибку датчика можна також представити у вигляді різниці між значенням, обчисленим за вихідним сигналом датчика, і реальним значенням поданого вхідного сигналу. Наприклад, розглянемо лінійний датчик переміщень. В ідеальному випадку, якщо його чутливість б дорівнювала 1 мВ / мм, при зміщенні об'єкта на 1 мм напруга на виході мала змінитися на 1 мВ. Однак на практиці при переміщенні об'єкта на відстань $x = 10$ мм вихідна напруга змінилася на 10,5 мВ, тобто $y = 10,5$ мВ. Перетворивши це значення за допомогою інверсної передавальної функції, отримаємо, що при такій напрузі переміщення об'єкта має бути рівним $Sx = S / B = 10,5$ мм, тобто на 0,5 мм більше дійсного. Ось ці 0,5 мм і є похибкою вимірювань. Отже, можна стверджувати, що в межах діапазону 10 мм абсолютна похибка вимірювань даного датчика складає 0,5 мм, а у відносних одиницях вона дорівнює: $(0,5 \text{ мм} / 10 \text{ мм}) * 100\% = 5\%$. Якщо при відсутності випадкових помилок кожен раз при повторенні цього експерименту буде спостерігатися похибка, що дорівнює 0,5 мм, кажуть, що датчик в діапазоні 10 мм має систематичну похибку, рівну 0,5 мм. Але, як правило, випадкові помилки завжди присутні, тому на практиці систематична похибка найчастіше представляється в вигляді середнього значення з безлічі експериментальних значень.

На точність датчиків впливають такі характеристики як: гістерезис, мертва зона, параметри калібрування, повторюваність датчиків від партії до партії і відтворюваність похибок, які будуть розглянуті далі. Гранично допустимі похибки зазвичай відповідають найгіршим робочим характеристикам датчиків. При більше коректному проведенні калібрування (наприклад, при проведенні калібрування на більшій кількості точок), калібрувальна крива проходить ближче до реальних передавальних функцій, що означає підвищення точності вимірювань. На практиці

межі допустимих похибок встановлюються не навколо ідеальної передавальної функції, а щодо калібрувальної кривої. Межі стають менше, якщо вони не містять у собі похибки, пов'язані з відмінностями датчиків від партії до партії, а також коли вони відносяться тільки до одного спеціально відкаліброваного датчику. Все це підвищує точність вимірювань, проте значно підвищує вартість, через що в багатьох ситуаціях ці методи не можуть бути застосовані.

Похибка датчиків може бути представлена в наступних видах:

1. Безпосередньо в одиницях вимірюваної величини (Δ),
2. У відсотках від значення максимального вхідного сигналу,
3. В одиницях вихідного сигналу.

У сучасних датчиках точність часто характеризується величиною статистичної помилки вимірювань, що враховує вплив як систематичних, так і випадкових похибок, і незалежних від помилок, допущених при визначенні передавальних функцій.

Калібрування.

Якщо виробничі допуски на датчик і допуски на інтерфейс (схеми перетворення сигналів) перевищують необхідну точність системи, завжди необхідно проводити калібрування. Наприклад, потрібно виміряти температуру з точністю $\pm 0,5^\circ \text{C}$ датчиком, який за довідковими даними володіє похибкою $\pm 1^\circ \text{C}$. Це можна зробити тільки після проведення калібрування конкретного датчика, що необхідно для знаходження його індивідуальної передавальної функції, а також після проведення повного калібрування системи. У процесі проведення повного калібрування визначаються коефіцієнти, які описують передавальну функцію всієї системи в цілому, включаючи датчик, пристрій інтерфейсу і АЦП. Математичний опис передавальної функції необхідно знати до початку проведення калібрування. У процесі калібрування необхідно визначити коефіцієнти передавальної функції, проводячи калібрувальні вимірювання в декількох точках в залежності від виду передавальної функції. Для проведення калібрування датчиків важливо мати точні фізичні еталони, що дозволяють моделювати відповідні зовнішні впливи. Наприклад, при калібруванні контактного датчика температури його необхідно поміщати або в резервуар з водою, або в «сухий колодязь», в яких є можливість точно регулювати температуру. При калібруванні інфрачервоних датчиків потрібна наявність чорного тіла, а для калібрування гігрометрів - набір насичених розчинів солей, використовуваних для підтримки постійної відносної вологості в закритому контейнері і т.д. Звідси ясно видно, що точність наступних вимірювань безпосередньо пов'язана з точністю проведення калібрування.

Гістерезис.

Гістерезис - це різниця значень вихідного сигналу для одного і того ж вхідного сигналу, отриманих при його зростанні і убутті. Наприклад, нехай показання датчика переміщень при русі об'єкта зліва направо відрізняються на 20 мВ від його значень при русі в тій же самій точці справа наліво. Якщо чутливість датчика складає 10 мВ / мм, помилка гістерезису буде дорівнює 2 мм. Типовою причиною виникнення гістерезису є тертя і структурні зміни матеріалів.

Нелінійність.

Нелінійність визначається для датчиків, передавальну функцію яких можливе апроксимувати прямою лінією. Під нелінійністю розуміється максимальне

відхилення реальної передавальної функції від апроксимуючої прямої лінії. Під терміном «лінійність» на самому справі розуміється «нелінійність».

При проведенні декількох циклів калібрування вибирається найгірше з отриманих значень нелінійності. Нелінійність зазвичай виражається або у відсотках від максимального вхідного сигналу, або в одиницях вимірюваних величин (наприклад, в кПа). Залежно від способу проведення апроксимуючої лінії розрізняють кілька типів лінеаризації. Один із способів - проведення прямої через кінцеві точки передавальної функції. Для цього спочатку визначаються вихідні значення, відповідні найбільшому і найменшому зовнішнім впливам, а потім через ці точки проводиться пряма лінія. При такій лінеаризації помилка нелінійності мінімальна в кінцевих точках і максимальна десь у проміжку між ними. Існують інші способи лінеаризації, засновані на застосуванні методу найменших квадратів, методу незалежної лінеаризації та ін.

Насичення.

Кожен датчик має межі робочих характеристик. Навіть якщо він вважається лінійним, при певному рівні зовнішнього впливу його вихідний сигнал перестане відповідати лінійній залежності. У цьому випадку говорять, що датчик увійшов в зону нелінійності або в зону насичення.

Відтворюваність.

Відтворюваність - це здатність датчика при дотриманні однакових умов видавати ідентичні результати. Причинами поганої відтворюваності результатів часто є: тепловий шум, поверхневі заряди, пластичність матеріалів і т.д.

Мертва зона.

Мертва зона - це нечутливість датчика в певному діапазоні вхідних сигналів. У межах цієї зони вихідний сигнал залишається постійним (часто рівним нулю).

Роздільна здатність.

Роздільна здатність характеризує мінімальну зміну вимірюваної величини, яку може відчувати датчик. При безперервній зміні зовнішнього впливу в межах діапазону вимірюваних значень вихідні сигнали датчик не будуть завжди абсолютно гладкими, навіть за відсутності шумів. На них завжди будуть видні невеликі сходинки. Особливо чітко це видно в потенціометричних датчиках, інфрачервоних датчиках контролю території з сітчастою маскою та інших пристроях, в яких вихідні сигнали змінюються лише при певних змінах зовнішніх впливів. На додаток до цього при перетворенні будь-якого сигналу в цифровий код відбувається його розбивка на маленькі сходинки, кожній з яких приписується конкретне значення. Величина зміни вхідного сигналу, що призводить до появи мінімальної сходинки на вихідному сигналі датчика при певних умовах, називається його роздільною здатністю. Наприклад, для інфрачервоного датчика контролю території можна дати наступне визначення роздільної здатності: «роздільна здатність – можливість виявлення об'єкта на відстані 5 м при його переміщенні на 20 см». Для дротяного потенціометричного датчика, використовуваного для вимірювання кутів, роздільна здатність - це мінімальний кут, рівний, припустимо, $0,5^\circ$. Іноді роздільна здатність визначається у відсотках від повної шкали (FS максимального значення вхідного сигналу). Наприклад, для датчика вимірювання кутів, у якої повний діапазон вимірюваних значень дорівнює 270° , роздільну здатність $0,5^\circ$ можна представити як 0,181% від FS.

Слід зазначити, що розмір ступені може змінюватися всередині діапазону вимірюваних значень, тому, як правило, роздільна здатність визначається або як середня, або як найгірша величина. Роздільна здатність датчиків з цифровими вихідними сигналами часто задається числом біт слова даних. Наприклад, в описі може бути інформація, що роздільна здатність датчика дорівнює 8 біт. Звідси можна отримати або повний діапазон вхідних сигналів, або оцінити величину молодшого значущого розряду (МЗр).

Спеціальні характеристики

Для деяких датчиків необхідно вказувати спеціальні характеристики вхідних сигналів. Наприклад, для детекторів освітленості такою характеристикою є його чутливість в межах обмеженої оптичної смуги. Отже, для таких датчиків необхідно визначати спектральні характеристики.

Вихідний імпеданс.

Вихідний імпеданс Z_{out} є характеристикою, що вказує наскільки легко датчик узгоджується з електронною схемою. Опір, що відповідає вихідному імпедансу датчика, підключаються паралельно опору, що характеризує вхідний імпеданс електронної схеми (потенційне з'єднання) або послідовно з ним (струмове з'єднання). Зазвичай вхідні та вихідні імпеданси представляються в комплексному вигляді, оскільки вони, як правило, включають в себе активні і реактивні компоненти. Для мінімізації спотворень вихідного сигналу датчик з струмовим виходом повинен мати максимально можливий вихідний імпеданс, а його схема інтерфейсу - мінімальний вхідний імпеданс. У разі потенційного з'єднання датчику слід мати низький вихідний імпеданс, а інтерфейсу – високий вхідний.

Сигнал збудження.

Сигнал збудження - це електричний сигнал, необхідний активному датчику для роботи. Сигнал збудження описується інтервалом напруг i / або струму. Для деяких типів датчиків також необхідно вказувати частоту сигналу збудження і його стабільність. Вихід сигналу збудження за наведені межі може призвести до зміни передавальної функції датчика, і, отже, до спотворення вихідного сигналу.

3.4.2 Динамічні характеристики

У стаціонарних умовах датчик повністю описується своєю функцією передачі, діапазоном вимірюваних значень, калібрувальними коефіцієнтами і т.д. Однак на практиці вихідний сигнал датчика не завжди достатньо точно відстежує зміну зовнішнього сигналу. Причини цього полягають як у самому датчику, так і в його з'єднанні з джерелом зовнішніх впливів, що не дозволяє сигналам поширюватися з нескінченно великою швидкістю. Іншими словами можна сказати, що будь-який датчик володіє параметрами, залежними від часу, званими динамічними характеристиками. Якщо датчик має обмежену швидкодію, він може реєструвати значення зовнішніх впливів, що відрізняються від реальних. Це означає, що датчик працює з динамічною похибкою. Відмінність між статичними і динамічними похибками полягає в тому, що останні завжди залежать від часу. Якщо датчик входить до складу вимірювального комплексу, що володіє певними динамічними характеристиками, внесення додаткових динамічних похибок може привести, в кращому випадку, до затримки відображення реального значення зовнішнього впливу, а, в гіршому випадку, - до виникнення коливань.

Час розігріву.

Час розігріву - це час між подачею на датчик електричної напруги або сигналу збудження і моментом, коли датчик починає працювати, забезпечуючи необхідну точність вимірювань. Багато датчиків володіють несуттєвим часом розігріву. Однак деякі детектори, особливо працюючі в пристроях з контрольованою температурою (термостат), для свого розігріву вимагають секунди, а то й хвилини.

У теорії автоматичного управління прийнято описувати взаємозв'язок між входами і виходами пристрою у вигляді лінійних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Очевидно, що при вирішенні таких рівнянь можна визначити динамічні характеристики пристрою. Залежно від конструкцій датчиків, рівняння, що описують їх, можуть мати різний порядок.

Датчики нульового порядку, що мають лінійну передавальний функцію (рівняння (3.3)), можна описати наступними залежностями від часу :

$$y(t) = a + bx(t). \quad (3.8)$$

Коефіцієнт a називається зміщенням, а b - статичною чутливістю. З вигляду рівняння видно, що воно описує датчики, до складу яких не входять елементи, що накопичують енергію, такі як конденсатори або маси. Датчики нульового порядку відносяться до пристроїв миттєвої дії. Іншими словами, у таких датчиків немає необхідності визначати динамічні характеристики.

Диференціальні рівняння першого порядку описують поведінку датчиків, до складу яких входить один елемент накопичення енергії. Такі рівняння мають вигляд:

$$b_1 \frac{dy}{dt} + b_0 y(t) = x(t). \quad (3.9)$$

Типовий приклад датчика першого порядку - датчик температури, в якому роль елемента, що накопичує енергію, грає теплоємність. Для опису датчиків першого порядку існує кілька способів. Але виробники датчиків для цього найчастіше використовують частотні характеристики, що показують наскільки швидко датчик може зреагувати на зміну зовнішнього впливу. Для відображення відносного зменшення вихідного сигналу при збільшенні частоти застосовується амплітудно-частотна характеристика. Для опису динамічних характеристик датчиків часто використовується гранична частота, відповідна зниженню вихідного сигналу на 3 дБ, що показує на якій частоті відбувається 30% зменшення вихідної напруги або струму.

Ця гранична частота f_u , часто звана верхньою частотою зрізу, вважається граничною частотою роботи датчика. Частотні характеристики безпосередньо пов'язані з швидкістю датчика, що виражається в одиницях зовнішнього впливу на одиницю часу. Які характеристики: АЧХ або швидкодія, використовуються для опису датчика, залежить від його типу, області застосування і переваг розробника. Інший спосіб опису швидкодії полягає у визначенні часу, необхідного для досягнення вихідним сигналом датчика рівня 90% від стаціонарного або максимального значення при подачі на його вхід ступеневого зовнішнього впливу. Для датчиків першого порядку дуже зручно використовувати параметр, званий постійною часу. Постійна часу τ є мірою інерційності датчика. У термінах електричних величин вона дорівнює добутку ємності на опір: $\tau = CR$. У теплових термінах під C і R розуміються теплоємність і тепловий опір. Як правило, постійна

часу досить легко вимірюється. Часова залежність системи першого порядку має вигляд:

$$y = y_m (1 - e^{-t/\tau}), \quad (3.10)$$

де y_m - стає значення вихідного сигналу, t - час. Заміняючи t на τ , отримуємо:
 $y = 0,6321 y_m$

Іншими словами можна сказати, що після закінчення часу, рівного постійній часу, вихідний сигнал датчика досягає рівня, що становить приблизно 63% від сталого значення. Аналогічно можна показати, що після закінчення часу, рівного двом постійним часу, рівень вихідного сигналу складе 86,5%, а після трьох постійних часу - 95%.

Частота зрізу характеризує найменшу або найбільшу частоту зовнішніх впливів, яку датчик може сприйняти без спотворень. Верхня частота зрізу показує наскільки швидко датчик реагує на зовнішній вплив, а нижня частота зрізу - з яким найповільнішим сигналом він може працювати. На практиці для встановлення зв'язку між постійною часу датчика першого порядку і його частотою зрізу f_z , як верхньою так і нижньою, використовують просту формулу: $f_z = 0159 / \tau$.

Фазовий зсув на певній частоті показує наскільки вихідний сигнал відстає від зовнішнього впливу. Зрушення вимірюється або в градусах, або в радіанах і зазвичай вказується для датчиків, що працюють з періодичними сигналами. Якщо датчик входить до складу вимірювальної системи з зворотними зв'язками, завжди необхідно знати його фазові характеристики. Фазовий зсув датчика може знизити запас по фазі всієї системи в цілому і привести до виникнення нестабільності.

Диференціальні рівняння другого порядку описують поведінку датчиків з двома елементами, що накопичують енергію:

$$b_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dy(t)}{dt} + b_0 y(t) = x(t).$$

Прикладом датчика другого порядку є акселерометр, до складу якого входить маса і пружина. На виходах датчиків другого порядку після подачі на їх входи ступеневого впливу практично завжди з'являються коливання. Ці коливання можуть бути дуже короткочасними, тоді кажуть, що датчик має демпфер, або вони можуть тривати тривалий час, а то й постійно. Тривалі коливання на виході датчика є свідченням його неправильної роботи, тому їх треба намагатися уникати.

Будь-який датчик другого порядку характеризується **резонансною (власною)** частотою, яка виражається в герцах або радіанах в секунду. На власній частоті відбувається значне збільшення вихідного сигналу датчика. Зазвичай виробники вказують значення власної частоти датчика і його коефіцієнт загасання (демпфірування). Від резонансної частоти залежать механічні, теплові та електричні властивості детекторів. Зазвичай робочий частотний діапазон датчиків вибирається або значно нижче власної частоти (принаймні на 60%), або вище її.

Однак для деяких типів датчиків резонансна частота є робочою. Наприклад, детектори руйнування скла, використовувані в охоронних системах, налаштовуються на вузьку смугу частот в зоні частоти резонансу, характерну для акустичного спектру, виробленого скла, що розбивається.

Демпфірування - це значне зниження або придушення коливань в датчиках другого і більш високих порядків. Коли вихідний сигнал встановлюється досить швидко і не виходить за межі стаціонарного значення, кажуть, що система володіє

критичним загасанням, а її коефіцієнт демпфірування дорівнює 1. Коли коефіцієнт загасання менше 1, і вихідний сигнал перевищує стале значення, кажуть, що система не має демпфірування. А коли коефіцієнт загасання більше 1, і сигнал встановлюється набагато повільніше, ніж в системі з критичним загасанням, кажуть, що система має надлишкове демпфірування. Для коливального вихідного сигналу, коефіцієнт загасання або демпфірування визначається абсолютним значенням відношення більшої амплітуди до меншої пари послідовно взятих напівхвиль коливань щодо усталеного значення.

3.4.3 Фактори навколишнього середовища

Умови зберігання - сукупність граничних значень факторів навколишнього середовища, що впливають на датчик протягом певного проміжку часу, при яких не відбувається істотної зміни його робочих характеристик і забезпечується підтримання його працездатності. Звичайно умови зберігання встановлюють: максимальну і мінімальну температури зберігання, а також максимальну відносну вологість при цих температурах. До значенням відносної вологості необхідно додати таку характеристику, як «відсутність конденсату». Залежно від фізичної природи датчика можуть зазначатися додаткові умови зберігання, наприклад, максимальний тиск, присутність деяких газів або відсутність шкідливих випарів.

Короткострокова і довгострокова стабільність (дрейф) - характеристики точності датчиків. Короткострокова стабільність описує зміни робочих характеристик датчика протягом хвилин, годин і навіть днів. Вихідний сигнал датчика може збільшуватися або зменшуватися, що може бути виражено через величину шуму наднизької частоти. Довгострокова стабільність залежить від процесів старіння, які змінюють електричні, механічні, хімічні та термічні властивості матеріалів датчика. Довгостроковий дрейф параметрів може вимірюватися досить тривалими інтервалами часу: місяцями і роками. Довгострокова стабільність є дуже важливою характеристикою для датчиків, які використовуються для прецизійних вимірювань. Швидкість старіння визначається умовами зберігання і експлуатації, а також тим, наскільки добре елементи датчиків ізольовані від навколишнього середовища, і які матеріали використовувалися для їх виготовлення. Інтенсивне старіння типове для датчиків, до складу яких входять органічні компоненти, і не настільки істотно для датчиків з неорганічних елементів. Наприклад, металоксидні термістори в скляних корпусах мають кращу довготривалу стабільність, ніж такі ж термістори, покриті епоксидною смолою. Для підвищення довготривалої стабільності елементи датчиків піддають термоциклам, які моделюють екстремальні умови роботи. Наприклад, датчик може періодично переміщатися з середовища з температурою замерзання в середу з дуже високою температурою. Такі термоцикли підвищують стабільність характеристик датчиків, дозволяє виявити приховані дефекти і провести відбраковування негідних пристроїв. Наприклад, стабільність термісторів з епоксидним покриттям значно підвищується, якщо перед калібруванням і установкою в прилад вони протягом місяця витримувалися при температурі + 150 °C.

У перелік умов навколишнього середовища, які впливають на датчики, практично ніколи не входять фізичні параметри, вимірювані датчиками. Наприклад, для датчика, що визначає тиск повітря, враховуються такі фактори навколишнього середовища: температура повітря і поруч розташованих об'єктів, вологість, вібрації, іонізуюча радіація, електромагнітні поля, гравітаційні сили і т.п. Всі ці параметри не

тільки можуть, а й впливають на робочі характеристики датчика. При цьому необхідно враховувати, як динамічні, так і статичні складові цих факторів. Багато з параметрів навколишнього середовища мають мультиплікативну природу, тобто вони впливають на передавальну функцію датчика, наприклад, змінюють його коефіцієнт підсилення. Одним з підтверджень цього ефекту є поведінка резистивного датчика напруг, чутливість якого збільшується з ростом температури. Дуже важливою вимогою для сучасних датчиків є забезпечення їх стабільної роботи в різноманітних умовах навколишнього середовища. Тому розробники, а також експериментатори завжди повинні враховувати всі можливі зовнішні впливи, здатні вплинути на робочі характеристики датчиків. Наприклад, на виході п'єзоелектричного акселерометра можуть з'являтися паразитні сигнали через: різку зміну навколишньої температури, електростатичного розряду, утворення електричних зарядів, вібрації сполучних проводів, електромагнітної інтерференції (ЕМВ) і т. п. Навіть якщо виробник датчика не вказав ці фактори, експериментатор повинен перевірити його поведінку в конкретних умовах експлуатації і, в разі необхідності (при реальному погіршенні робочих характеристик від впливу зовнішніх факторів) вжити відповідних заходів, наприклад, помістити датчик в захисний корпус, використовувати електричний екран, застосувати теплоізоляцію або термостат.

Температура навколишнього середовища впливає на робочі характеристики датчиків, тому завжди повинна прийматися до уваги. Робочий діапазон температур - це інтервал оточуючих температур, що задаються верхнім і нижнім граничними значеннями (наприклад, $-20 \dots + 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$), всередині якого датчик працює з заданою точністю. Передавальні функції багатьох датчиків сильно залежать від навколишньої температури. Для зниження температурних похибок до складу самих датчиків або в схеми перетворювачів сигналів часто вбудовуються спеціальні компенсаційні елементи. Найпростіший спосіб визначення допусків по температурі полягає у встановленні інтервалів всередині робочого діапазону температур, для кожного з яких вказується індивідуальну похибку. Наприклад, в паспортних даних може бути зазначено, що в інтервалі температур $0 \dots 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ точність датчика становить 1%, в інтервалах $-20 \dots 0^{\circ}\text{C}$ і $+50 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - 2%, в інших інтервалах в межах діапазону вимірюваних температур ($-40 \dots + 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$) - 3%. Температура навколишнього середовища також впливає на динамічні характеристики, особливо в випадках, коли застосовується демпфірування. Порівняно швидкі зміни температур можуть призвести до появи паразитних сигналів на виходах датчиків. Наприклад, піроелектричний чутливий елемент, що використовується в детекторах руху, практично не реагує на повільну зміну навколишньої температури. Однак при швидкому стрибку температури на його виході може з'явитися електричний сигнал (струм), розпізнаваний електронними цілями як відгук на зовнішній вплив, що призводить до помилок детектування.

Похибка саморозігріву з'являється в датчиках, що нагріваються від сигналу збудження настільки, що це починає впливати на його точнісні характеристики. Наприклад, через термісторний датчик температури необхідно пропускати електричний струм, що призводить до розсіювання тепла всередині його конструкції. При цьому ступінь розігріву датчика залежить від його конструкційних особливостей і від умов навколишнього середовища: або це сухе повітря, або рідина і т.д. Саморозігрів датчика призводить до появи помилок при вимірюванні

температури, оскільки термістор починає працювати як джерело додаткової теплової енергії. Найсильніша розігрів датчиків спостерігається в середовищі стоячого повітря. Для термісторів виробники часто вказують похибка саморозігріву при роботі в повітрі, стоячій воді та інших середовищах.

3.4.4 Надійність

Надійність - це здатність датчика виконувати необхідні функції при дотриманні певних умов протягом заданого проміжку часу. Якщо використовувати статистичні терміни, можна дати наступне визначення: надійність - це ймовірність того, що пристрій буде функціонувати без поломок протягом зазначеного інтервалу часу або заданої кількості циклів. Слід зазначити, що надійність не є характеристикою дрейфу або шуму. Вона відображає час до виходу пристрою з ладу (відмови), або тимчасового, або постійного при дотриманні регламентованих умов експлуатації. Незважаючи на те, що надійність є дуже важливою характеристикою, вона рідко вказується виробниками датчиків. Можливо, причина цього полягає у відсутності загальноприйнятих способів її вимірювання. Для багатьох електронних приладів як способу визначення експлуатаційної надійності застосовується процедура обчислення середнього часу між відмовами (СЧМВ), заснована на визначенні СЧМВ всього пристрою після обчислення СЧМВ його окремих елементів, при цьому необхідно враховувати вплив зовнішніх чинників: температури, тиску, механічних напружень, ступеня екранування і т.д. На жаль, процедура знаходження СЧМВ не дозволяє оцінити надійність безпосередньо, і таку характеристику важко застосовувати на практиці. Тому часто для визначення надійності датчиків їх піддають кваліфікаційним випробуванням, які проводяться в найгірших умовах. Наприклад, датчики змушують безперервно працювати при максимальній робочій температурі протягом 1000 годин. Але цей метод не враховує ситуації різких змін зовнішніх умов, наприклад, швидкого підвищення температури. Він імітує роботу датчика в моделі реального оточення, але при цьому прагне стиснути роки в тижні. Перед такими кваліфікаційними випробуваннями стоять три завдання: оцінка СЧМВ, визначення самого уразливого місця конструкції (місця першої поломки) для подальшого удосконалення датчика і знаходження експлуатаційного строку життя всієї системи. Іншим можливим способом «прискореного старіння» є використання тієї ж самої сукупності параметрів, що і в реальних режимах експлуатації, включаючи максимальне навантаження і цикли включення / виключення, але перевірку системи проводити в розширених діапазонах навколишніх умов (порівняно з регламентованими в паспортних даних). При цьому допускається, щоб робочі характеристики датчиків виходили за межі, зазначені в їх описах, але в нормальних умовах експлуатації вони повинні повертатися до необхідних значень. Наприклад, якщо в документації говориться, що датчик повинен працювати при температурі, що не перевищує 50 °C, і найбільшій відносній вологості 85% при максимальній робочій напрузі + 15 В, його слід тестувати в циклічному режимі при температурі 100 °C, відносної вологості 99% і напрузі + 18 В.

Датчик, залежно від галузі застосування, може піддаватися впливу та інших факторів навколишнього середовища, які потенційно можуть змінювати його робочі характеристики або допомагати виявляти приховані дефекти. Тому іноді застосовуються такі види додаткових випробувань:

- Тестування при високій температурі і високій вологості при максимальній напрузі живлення. Наприклад, датчик змушують працювати при максимально допустимій температурі і відносній вологості 85-90% протягом 500 годин. Таке тестування є дуже корисним для виявлення забруднень та оцінки цілісності корпусів пристроїв. Термін служби датчиків часто визначається по тесту прискореного старіння, проведеного при температурі 85 °C і відносній вологості 85%. Таку перевірку часто називають «тестуванням 85-85».
- Для моделювання несприятливих умов навколишнього середовища при перевірці надійності з'єднань: дровових, клейових і т.п., датчики часто піддаються впливу механічних ударів і вібрацій. Для отримання високих значень прискорень моделюється падіння датчика. Часто потрібно проводити такі випробування щодо різних осей пристрою. Частота гармонійних коливань, що прикладаються до датчика при вібраційному тестуванні, повинна змінюватися в інтервалі, що включає його власну частоту.
- Для моделювання екстремальних умов зберігання та перевезень датчик, як мінімум, 1000 годин витримується або при дуже високих (+100 °C), або при дуже низьких температурах (-40 °C). Цей вид тестування проводиться, як правило, на непрацюючих пристроях. Вибір верхньої і нижньої температурних меж повинен проводитися відповідно з фізичною природою датчиків. Наприклад, для піроелектричних TGS датчиків фірми Philips, характеризуються точкою Кюрі +60 °C, ця температура ніколи не повинна перевищувати +50 °C, що завжди має бути чітко вказано на їх корпусах.
- Для перевірки поведінки датчиків при екстремальній зміні зовнішніх умов їх піддають дії теплового шоку або циклічних температур. Наприклад, пристрій знаходиться протягом 30 хвилин в середовищі з температурою -40 °C, після чого швидко переміщається на 30 хвилин в середовище з температурою + 100 °C і так багато разів. Кількість таких циклів, як правило, лежить в межах 100 ... 1000. Цей тест допомагає виявляти дефекти різних типів з'єднань і перевіряє цілісність корпусу.
- Для моделювання умов морських перевезень датчики можуть піддаватися впливу соляних туманів протягом певного інтервалу часу (наприклад, 24 годин). Таке тестування допомагає визначати стійкість пристроїв до корозії і виявляти дефекти корпусів.

3.4.5 Характеристики датчиків, які диктуються умовами їх застосування

Для можливості застосування в різних областях важливими стають такі характеристики датчиків: їх конструкція, вага і габарити. Якщо для датчиків головними параметрами є точність і надійність, така характеристика, як вартість відходить на другий план. Так якщо пристрої призначені для систем життєзабезпечення, оборонних комплексів або космічних кораблів, їх висока вартість завжди виправдана висунутими вимогами по точності і надійності. Однак існує ряд інших областей застосування датчиків, де їх вартість є основоположною.

Статистична помилка

У цьому світі немає нічого досконалого. Всі наші знання про матеріали носять вельми приблизний характер, і, насправді, вони являють собою не зовсім те, що ми думаємо про них. Всі верстати теж дуже недосконалі і ніколи не виробляють деталі в точній відповідно до креслень. У всіх компонентів будь-яких пристроїв існує дрейф характеристик, пов'язаний з навколишніми умовами і старінням. Зовнішні

перешкоди можуть впливати на робочі параметри систем і міняти їх вихідні сигнали. Працівники також неідеальні, і завжди присутній людський фактор. Виробники борються за однорідність і узгодженість технологічних процесів, але, незважаючи на це, жоден з вироблених елементів не є досконалим і говорити про значеннях їх параметрів можна тільки з деякою мірою визначеності. Будь-які вимірювальні комплекси складаються з безлічі компонентів, включаючи датчики. Тому незалежно від того, наскільки точно проводилися дослідження, можна говорити лише про приблизною оцінкою значення реальної фізичної величини, яка є об'єктом вимірів (тобто зовнішнім впливом). Результати вимірювань можуть розглядатися закінченими, тільки коли вони супроводжуються статистичною оцінкою отриманих даних, оскільки ніколи не буває 100% впевненості в точності певних значень. У зашумлених умовах показання датчика будуть відрізнятися від реального значення зовнішнього сигналу з на величину помилки виміру. Необхідно завжди чітко розуміти різницю між похибкою вимірювань, яку можна визначити за допомогою формул, та статистичної помилкою результатів.

Похибку вимірювань можна до деякої міри знизити за рахунок коригування систематичних складових. Але, незважаючи на досягнуту малу величину похибки, статистична помилка при цьому може бути дуже високою. У такому випадку ми не можемо вважати результати вимірювань достовірними. Іншими словами можна сказати, що похибка вимірювань - це те, що ми реально отримуємо під час проведення конкретних вимірювань, а статистична помилка - це те, наскільки ми можемо повірити отриманим результатами.

Міжнародний Комітет з мір та ваг вважає, що статистичні помилки можна розділити на дві групи, хоча між групами А і Б немає чітких меж:

Група А: похибки, оцінювані статистичними методами.

Група Б: похибки, оцінювані іншими методами.

Статистична помилка типу А зазвичай визначається по стандартному відхиленню, рівному позитивному квадратному кореню з статистично певної дисперсії поділений на число вимірів. Для окремих компонентів стандартна статистична помилка показує внесок кожного компонента в загальну статистичну помилку. Для оцінки дисперсії зазвичай застосовують статистичну обробку результатів вимірювань. Для цього методом найменших квадратів знаходять рівняння залежності, що найбільш точно описує отримані експериментальні дані, і визначають відхилення кожного вимірюваного значення від отриманої таким чином кривої.

Для визначення статистичної помилки типу Б зазвичай використовують всю доступну інформацію, що включає:

- Усі дані, отримані в попередніх вимірах,
- Знання, отримані з аналізу характеристик і поведінки аналогічних датчиків, використання подібних матеріалів та інструментів,
- Специфікації, видані виробником,
- Дані, отримані в процесі калібрування,
- Статистичні дані, отримані з довідників та іншої літератури.

Після отримання оцінок всіх статистичних похибок їх необхідно об'єднати і визначити повну стандартну статистичну помилку. Це можна зробити за допомогою закону поширення статистичних похибок, який полягає в знаходженні квадратного кореня з суми квадратів всіх компонентів статистичних помилок:

Контрольні питання та завдання до глави 3

1. Наведіть визначення датчика.
2. Які класифікації датчиків вам відомі?
3. Чим відрізняються ланки-перетворювачі і ланки-модулятори?
4. Які статичні і динамічні характеристики датчиків вам відомі?
5. Як впливає навколишнє середовище на параметри датчиків?

Глава 4. ЧУТЛИВІ ЕЛЕМЕНТИ І ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ

4.1 КЛАСИФІКАЦІЯ ДАТЧИКІВ ТЕМПЕРАТУРИ

Контроль над температурою складає основу багатьох технологічних процесів. Вимірювання температури рідини, газу, твердої поверхні або сипучого порошку - кожен випадок має свою особливість, яку необхідно розуміти, щоб вимірювання максимально відповідали поставленому завданню. Існує безліч датчиків температури, побудованих з використанням різних фізичних законів. Одні з них прекрасно справляються з конкретним завданням по вимірюванню температури, інші призначені для універсального використання.

Для вимірювання температури в САР та САУ СЕУ застосовують чутливі елементи, в основу яких покладені теплове поширення, зміна електричної провідності, поява термо-ЕРС, зміна інтенсивності випромінювання і т.д.

Якщо розглядати датчики температури для промислового застосування, то можна виділити їх основні класи: кремнієві датчики температури, біметалічні датчики, рідинні і газові термометри, термоіндикатори, термістори, термопари, термометри опору, інфрачервоні датчики температури.

Кремнієві датчики температури використовують залежність опору напівпровідникового кремнію від температури. Діапазон вимірюваних температур для таких датчиків становить від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Усередині цього діапазону кремнієві датчики температури показують хорошу лінійність і точність. Можливість виробництва в одному корпусі такого датчика не тільки самого чутливого елемента, але так само і схем посилення і обробки сигналу, забезпечує датчику хорошу точність і лінійність усередині температурного діапазону. Вбудована в такий датчик незалежна пам'ять дозволить індивідуально відкалібрувати кожен прилад. Великим плюсом можна назвати велику різноманітність типів вихідного інтерфейсу: це може бути напруга, струм, опір, або цифровий вихід, що дозволяє підключити такий датчик до мережі передачі даних. З слабких місць кремнієвих датчиків температури можна відзначити вузький температурний діапазон і відносно великі розміри в порівнянні з аналогічними датчиками інших типів, особливо термопарами. Кремнієві датчики температури застосовуються в основному для вимірювання температури поверхні, температури повітря, особливо всередині різних електронних приладів. Наприклад можна назвати температурні реєстратори компанії Dallas semiconductor випускаються під маркою THERMOCHRON. Реєстратори мають кремнієвий датчик температури, мікросхему обробки сигналу і пам'ять для збереження результатів.

Біметалевий датчик температури, як випливає з назви, зроблений з двох різнорідних металевих пластин, скріплених між собою. Різні метали мають різний коефіцієнт розширення при тій чи іншій температурі. Наприклад, константан практично не розширюється при температурі, залізо, навпаки відчуває помітне розширення. Якщо смужки з цих металів скріпити між собою і нагріти (або охолодити), то вони почнуть вигинатися. У біметалевих датчиках пластинки замикають або розмикають контакти реле, або рухають стрілку індикатора. Діапазон роботи біметалевих датчиків від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Біметалеві датчики використовують для вимірювання поверхні твердих тіл, рідше для вимірювання температури рідини. Основною перевагою датчиків є простота і надійність

конструкції, можливість роботи без електричного струму, низька вартість. Разом з тим, біметалеві датчики температури мають великий розкид характеристик, а так само великий гістерезис перемикавання, особливо при низьких температурах. Основні області застосування біметалевих температурних датчиків - автомобільна промисловість, системи опалення та нагріву води.

Рідинні і газові термометри найбільш старі типи датчиків температури. Перша шкала температури була запропонована Фаренгейтом на початку 18-го століття саме для рідинного термометра. Рідинні термометри використовують ефект розширення рідин при підвищенні температури. Як рідина використовується спирт або ртуть в діапазоні кімнатних температур. Для вимірювань низьких температур, наприклад у кріогенній техніці, може бути використаний рідкий неон, а для вимірювання високих температур зазвичай використовують галій, який знаходиться в рідкому стані вже від 20 °С. У газових термометрах використовується ефект розширення, при переході речовини з рідкого в газоподібний стан. Газ тисне через мембрану і замикає електричні контакти. Діапазон вимірювань для рідинних і газових термометрів від -200 °С до +500 °С. Термометри цього класу зазвичай застосовуються для візуального контролю температури, або в якості термостатів в різних нагрівачах і холодильній техніці.

Термоіндикатори - це особливі речовини, що змінюють свій колір під впливом температури. Така зміна кольору може бути як оборотною, так і необоротною. У діапазоні кімнатних температур використовуються термоіндикатори на основі рідких кристалів. Вони плавно змінюють свій колір при зміні температури. Зміни ці, як правило, оборотні. Виробляються вони у вигляді плівки, часто з клейкою підкладкою, і служать для оперативного візуального контролю температури. Для низьких і високих температур виробляються в основному незворотні термоіндикатори. Тобто, якщо температура хоча б один раз перевищила допустиму, то індикатор необоротно змінює свій колір. Такі термоіндикатори використовують, наприклад, для контролю за замороженими продуктами. Якщо в процесі зберігання або транспортування температура хоч раз була вище допустимої, то зміна забарвлення термоіндикатора повідомить про це. Основна перевага термоіндикаторів низька вартість. Їх можна використовувати як одноразові датчики температури.

Термістори. У цьому класі датчиків використовується ефект зміни електричного опору матеріалу під впливом температури. Звичайно як термістори використовують напівпровідникові матеріали, як правило, оксиди різних металів. В результаті виходять датчики з високою чутливістю. Однак велика нелінійність дозволяє використовувати термістори лише у вузькому діапазоні температур. Термістори мають невисоку вартість і можуть виготовлятися в мініатюрних корпусах, дозволяючи збільшити тим самим швидкодію. Існує два типи термісторів, що використовують позитивний температурний коефіцієнт - коли електричний опір зростає з підвищенням температури і використовують негативний температурний коефіцієнт - тут електричний опір падає при підвищенні температури. Термістори не мають певної температурної характеристики. Вона залежить від конкретної моделі приладу і області його застосування. Основними достоїнствами термісторів є їх висока чутливість, малі розміри і вага, що дозволяють створювати датчики з малим часом відгуку, що важливо, наприклад, для вимірювання температури повітря. Безумовно, невисока вартість так само є їхньою перевагою, дозволяючи вбудовувати

датчики температури в різні прилади. До недоліків можна віднести високу нелінійність термісторів, що дозволяє їх використовувати лише у вузькому температурному діапазоні. Використання термісторів так само обмежена в діапазоні низьких температур. Велика кількість моделей з різними характеристиками і відсутність єдиного стандарту, змушує виробників устаткування використовувати термістори тільки однієї конкретної моделі без можливості заміни.

Інфрачервоні датчики температури або пірометри вимірюють температуру поверхні на відстані. Принцип з роботи заснований на тому, що будь-яке тіло при температурі вище абсолютного нуля випромінює електромагнітну енергію. При низьких температурах це випромінювання в інфрачервоному діапазоні, при високих температурах частина енергії випромінюється вже у видимій частині спектру. Інтенсивність випромінювання безпосередньо пов'язана з температурою нагрітого об'єкта. Діапазон вимірювань температур безконтактними датчиками від -45°C до $+3000^{\circ}\text{C}$. Причому в діапазоні високих температур інфрачервоним датчикам немає конкуренції. Для вимірювання в різних діапазонах температур використовуються різні ділянки інфрачервоного спектра. Так при низьких температурах це зазвичай діапазон довжин хвиль електромагнітного випромінювання 7-14 мкм. У діапазоні середніх температур це може бути 3-5 мкм. При високих температурах використовується ділянка біля 1 мкм. Однак і тут є свої особливості, пов'язані з вирішенням конкретної задачі. Так для вимірювання температури тонких полімерних плівок використовуються датчики, що працюють на довжинах хвиль 3,43 або 7,9 мкм, а для вимірювання температури скла використовують датчики, що працюють в діапазоні 5 мкм. Для правильного вимірювання температури необхідно ще ряд факторів. Насамперед це випромінювальна здатність. Вона пов'язана з коефіцієнтом відображення простою формулою: $E = 1 - R$, де E - випромінювальна здатність, R - коефіцієнт відбиття. У абсолютно чорного тела випромінювальна здатність дорівнює 1. У більшості органічних матеріалів, таких як дерево, пластик, папір, випромінювальна здатність знаходиться в діапазоні 0,8 - 0,95. Метали, особливо поліровані навпроти мають низьку випромінювальну здатність, яка в цьому випадку буде 0,1 - 0,2. Для правильного вимірювання температури необхідно визначити і встановити випромінювач здатність вимірюваного об'єкта. Якщо значення будуть обрані неправильно, то температура буде вимірюватися невірно. Зазвичай показання занижуються. Так, якщо метал має випромінювальну здатність 0,2, а на датчику встановлено коефіцієнт 0,95 (він зазвичай використовується за умовчанням), то при наведенні на нагріте до 100°C металевий об'єкт датчик буде показувати температуру близько 25°C . Коригувати випромінювальну здатність можна визначивши її для різних матеріалів за довідником, або вимірюючи температуру поверхні альтернативним способом, наприклад термопарою, вносити необхідні поправки. Хороші результати при не дуже високих температурах дає забарвлення спеціальною термостійкою, чорною фарбою вимірюваної поверхні. Другою важливою характеристикою інфрачервоного датчика є оптичне відношення - це відношення відстані до об'єкта вимірювань до розміру області з якою ці виміри ведуться. Наприклад оптичне відношення 10: 1 означає, що на відстані 10 метрів розмір площі, з якої ведеться вимірювання температури становить 1 метр. Сучасні інфрачервоні датчики температури мають оптичне ставлення досягають 300: 1. Основні переваги інфрачервоних датчиків температури: малий час відгуку. Це самі швидкодіючі датчики температури. Можливість вимірювання температури рухомих

об'єктів. Вимірювання температури у важкодоступних і небезпечних місцях. Вимірювання високих температур, там, де інші датчики вже не працюють. До переваг можна віднести те, що відсутній безпосередній контакт з об'єктом і відповідно не відбувається його забруднення. Це може бути важливо в напівпровідникової промисловості або фармацевтиці.

Термометри опору це резистори, виготовлені з платини, міді або нікелю. Це можуть бути дротяні резистори, або металевий шар, що напилений на ізолюючу підкладку, зазвичай керамічну або скляну. Платина найчастіше застосовується в термометрах опору через її високою стабільність і лінійність зміни опору з температурою. Мідь використовується в основному для вимірювання низьких температур, а нікель в недорогих датчиках для вимірювання в діапазоні кімнатних температур. Для захисту від зовнішнього середовища платинові термометри опору поміщають в захисні металеві чохла та ізолюють керамічними матеріалами, такими як оксид алюмінію або оксид магнію. Така ізоляція знижує так само вплив вібрації і ударів на датчик. Однак разом з додатковою ізоляцією зростає і час відгуку датчика на різкі температурні зміни. Платинові термометри опору одні з найбільш точних датчиків температури. Крім того, вони стандартизовані, що значно спрощує їх використання. Стандартно виробляються датчики опором 100 і 1000 Ом. Зміна опору таких датчиків з температурою дається в будь-яких тематичних довідниках у вигляді таблиць або формул. Діапазон вимірювань платинових термометрів опору складає -180°C $+600^{\circ}\text{C}$. Незважаючи на ізоляцію, варто обережати термометри опору від сильних ударів і вібрації.

Термопари являють собою дві дроту з різних металів, зварених між собою на одному з кінців. Термоелектричний ефект відкрив німецький фізик Зеєбек в першій половині 19-го століття. Він відкрив, що якщо з'єднати два провідники з різнорідних металів таким чином, що б вони утворювали замкнуте коло, і підтримувати місця контактів провідників при різній температурі, то в колі потече постійний струм. Експериментальним шляхом були підібрані пари металів, які найбільшою мірою підходять для вимірювання температури, володіючи високою чутливістю, часовою стабільністю, стійкістю до дії зовнішнього середовища. Це наприклад пари металів хромель-алюмель, мідь-константан, залізо-константан, платина-платина/родій, реній-вольфрам. Кожен тип підходить для вирішення своїх завдань. Термопари хромель-алюмель (тип К) мають високу чутливість і стабільність і працюють до температур аж до 1300°C в окислювальному або нейтральній атмосфері. Це один з найпоширеніших типів термопар. Термопара залізо-константан (тип J) працює у вакуумі, відновлювальної або інертній атмосфері при температурах до 500°C . При високих температурах до 1500°C використовують термопари платина - платина / родій (тип S або R) в керамічних захисних кожухах. Вони прекрасно вимірюють температуру в окислювальному, нейтральному середовищі і вакуумі.

У суднових енергетичних установках у датчиках температури найбільш широке застосування знайшли термоперетворювачі опору і термоелектричні перетворювачі.

4.2 ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІ ОПОРУ

Принцип дії термоперетворювачів опору заснований на явищі зміни електричного опору провідникових і напівпровідникових матеріалів при зміні їх

температури. В термоперетворювачі опору використовуються матеріали, що володіють великим і стабільним температурним коефіцієнтом опору, лінійною залежністю опору від температури і хорошою відтворюваністю властивостей.

Прилади для вимірювання температури, в яких як чутливих елементів використовуються термоперетворювачі опору, називаються термометрами опору. У промислових термометрах опору знайшли застосування провідникові термоперетворювачі опору. Їх виготовляють з чистих металів: платини, міді, нікелю, заліза. Найбільш широко застосовуються платина і мідь. Для металів залежність опору від температури має нелінійний характер:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Theta + \beta \Theta^2 + \gamma \Theta^3 + \dots), \quad (4.1)$$

де R_0 - опір провідника при початковій температурі; Θ - перегрів провідника щодо початкової температури; α, β, γ - коефіцієнти, що залежать від властивостей провідника.

Конкретний вираз для опору термоперетворювача опору залежить від заданого діапазону вимірювання температури.

Для платинових термоперетворювачів, що працюють в діапазоні від 0 до 600 ° С, залежність опору від температури визначається виразом

$$R = R_0 (1 + \alpha \Theta + \beta \Theta^2), \quad (4.2)$$

де R_0 - опір провідника при температурі 0°C, $\alpha = 3,94 \cdot 10^{-3}, \frac{1}{^\circ\text{C}}$; $\beta = -5,8 \cdot 10^{-7},$

$$\frac{1}{(^\circ\text{C})^2}$$

У діапазоні від 0 до -200 ° С залежність опору платинового термоперетворювача від температури має інший вигляд:

$$R = R_0 [1 + \alpha \Theta + \beta \Theta^2 + \gamma (\Theta - 100)^3], \quad (4.3)$$

де $\gamma = -4 \cdot 10^{-2}, \frac{1}{(^\circ\text{C})^3}$

Залежність від температури електричного опору мідного термоперетворювача, що працює в діапазоні від -50 до 180 ° С, має лінійний характер і виражається рівнянням

$$R = R_0 (1 + \alpha \Theta + \beta \Theta^2), \quad (4.4)$$

де $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}, \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Вибір матеріалу для термоперетворювачів опору визначається інертністю металу в вимірюваній середовищі в заданому інтервалі значень температури. Мідні термоперетворювачі можна застосовувати до температури 200 ° С в атмосфері, що має низьку вологість і вільна від газів, що викликають корозію. При більш високій температурі мідь окислюється.

Платинові термоперетворювачі використовують при вимірюванні температури в діапазоні від -200 до 650 ° С. Залізо і нікель в якості матеріалу для термоперетворювачів застосовують рідко, в зв'язку з тим, що характеристики цих металів відрізняються нелінійністю і сильно залежать від наявності домішок. Вітчизняна промисловість випускає платинові і мідні термометри опору, чутливий елемент яких виконується з тонкого платинового (діаметром 0,07 мм) або мідного (діаметром 0,01 мм) дроту. Щоб виключити появу індуктивності проводів, провід

чутливого елемента намотують біфілярне. Для захисту від впливу оточуючого середовища чутливі елементи поміщують в спеціальну трубку.

На рисунку 4.1 показана одна з можливих конструкцій термоперетворювача опору.

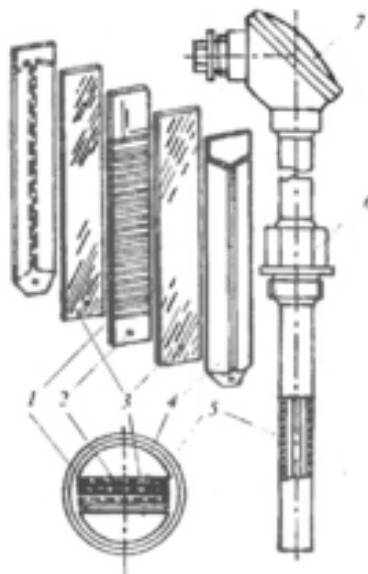


Рисунок 4.1 – Конструкція термоперетворювача опору

Платиновий дріт 1 намотаний біфілярне на слюдяний каркас 2, на якому є дрібні зубці. Для ізоляції провід закривається з обох сторін слюдяними пластинами 3. Для поліпшення умов теплообміну чутливого елемента з середовищем застосовують пластинки 4 з фольги, С-образного перетину. Пластинки 2, 3 і 4 скріплюються і щільно вставляються всередину кожуха 5. Висновки виконують з срібною стрічки або дроту і виводять в клемник 7. За допомогою гайки 6 термометр опору кріпиться до корпусу.

За значенням опору при 0°C платинові термометри опору випускаються трьох типів: опором 10, 46 і 100 Ом.

Перший тип використовується при вимірюванні температури від 0 до 650°C , другий і третій - при вимірах від -200 до 500°C . Мідні термометри опору випускаються з опором 53 і 100 Ом і використовуються для вимірювання температури в діапазоні від -50 до 180°C .

Тонкоплівкові платинові термометри опору (ПТС) складаються з керамічної підкладки товщиною 0,6 мм, на яку напильють шар платини товщиною близько 2 мкм. За допомогою лазерного променя на шарі платини випалюється малюнок у вигляді меандру. До отриманого плівкового провідника приварюють контактні виводи. Для захисту активного платинового провідника від пошкоджень його покривають керамічним ізоляційним шаром товщиною 10 мкм. Монолітна конструкція тонкоплівкового термоперетворювача значно підвищує його надійність. Тонкоплівкові ПТС використовуються при вимірюваннях температури від 0°C до 400°C .

Через теплову інерцію температура чутливого елемента відрізняється від температури контрольованого середовища, яка змінюється в часі. Теплова інерція залежить від умов теплообміну між середовищем і чутливим елементом. Термометр опору можна вважати аперіодичною ланкою першого порядку, постійна часу якої

залежить від питомої теплоємності термометра, його маси і коефіцієнта теплопередачі.

Постійна часу термоперетворювача опору залежить від умов охолодження; її значення відрізняється для одного і того ж перетворювача, що знаходиться в повітрі і в рідині. Залежно від конструкції значення постійної часу термометрів опору коливається від 10 с до 7 хв. Протікання струму через термоперетворювач може призвести до зміни його температури. Тому при проведенні вимірювань струм повинен мати невелике значення.

Перспективними можна назвати перетворювачі опору, виготовлені з напівпровідникових матеріалів з великим негативним температурним коефіцієнтом, або, як їх називають, термістори.

Терморезистор, термістор - напівпровідниковий резистор, активний електричний опір якого залежить від температури; терморезистори випускаються у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб і бусинок; розміри варіюються від декількох мкм до декількох см.

Для термістора характерні великий температурний коефіцієнт опору (ТКО) (що у десятки раз перевищує цей коефіцієнт для металів), простота обладнання, здатність працювати в різних кліматичних умовах при значних механічних навантаженнях, стабільність характеристик у часі.

До недоліків термісторів слід віднести: нелінійність залежності їх опору від температури; значне відхилення від зразка до зразка - як по значенню номінального опору, нормованого зазвичай при 20°C (більше $\pm 30\%$), так і характеру залежності опору від температури (відхилення значень температурного коефіцієнта досягає $\pm 5\%$ і більше).

Лінеаризацію залежності опору від температури вдається отримати в корегованих термоелементах, тобто в пристроях, що представляють собою комбінацію термісторів з іншими резисторами.

Терморезистор виготовляють у вигляді стрижнів, трубок, дисків, шайб, бусинок і тонких пластинок переважно методами порошкової металургії. Їхні розміри можуть варіюватися в межах від 1—10 мкм до 1—2 см.

Основними параметрами терморезистора є: номінальний опір, температурний коефіцієнт опору, інтервал робочих температур, максимально припустима потужність розсіювання.

Розрізняють терморезистори з негативним (термістори) і позитивним (позистори) ТКО (рисунок 4.2).

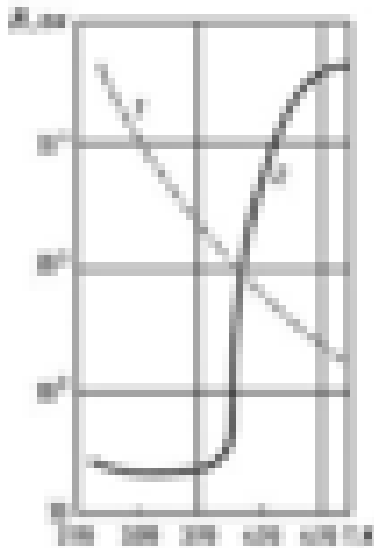


Рисунок 4.2 – Температурна характеристика терморезистора: 1 – термістора, 2 – позистора

Терморезистори з негативним ТКО виготовляють із суміші полікристалічних оксидів перехідних металів (наприклад, MnO , CoO , NiO , CuO), легованих Ge і Si , напівпровідників типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, скловидних напівпровідників і інших матеріалів.

Розрізняють терморезистори низькотемпературні (розраховані на роботу при температурах нижче 170 К), середньотемпературні (170–510 К) і високотемпературні (вище 570 К). Крім того, існують терморезистори, призначені для роботи при 4,2 К и нижче й при 900–1300 К. Найбільш широко використовуються середньотемпературні терморезистори із ТКС від — 2,4 до — 8,4 %/К і номінальним опором 1— 10^6 Ом.

Режим роботи терморезисторів залежить від того, на якій ділянці статичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) обрана робоча точка. У свою чергу ВАХ залежить як від конструкції, розмірів і основних параметрів терморезистора, так і від температури теплопровідності навколишнього середовища, тепловому зв'язку між терморезистором і середовищем. Терморезистори з робочою точкою на початковій (лінійній) ділянці ВАХ використовуються для виміру й контролю температури й компенсації температурних змін параметрів електричних кіл і електронних приладів. Терморезистори з робочою точкою на спадній ділянці ВАХ (з негативним опором) застосовуються в якості пускових реле, реле часу, вимірників потужності електромагнітного випромінювання на НВЧ, стабілізаторів температури й напруги. Режим роботи терморезистору, при якому робоча точка перебуває також на спадаючій ділянці ВАХ (рисунок 4.3) (при цьому використовується залежність опору від температури й теплопровідності навколишнього середовища), характерний для терморезисторів, застосовуваних у системах теплового контролю й пожежної сигналізації, регулювання рівня рідких і сипучих середовищ; дія таких терморезисторів заснована на виникненні релейного ефекту в колі з терморезистором при зміні температури навколишнього середовища або умов теплообміну терморезистора з середовищем.

Виготовляються також терморезистори спеціальної конструкції — з непрямым підігрівом. У таких терморезисторах є підігрівна обмотка, ізольована від напівпровідникового резистивного елемента (якщо при цьому потужність, що виділяється в резистивному елементі, мала, то тепловий режим терморезистора визначається температурою підігрівника, тобто струмом у ньому). Таким чином, з'являється можливість змінювати стан терморезистора, не міняючи струм через

нього. Такий терморезистор використовується в якості змінного резистора, який електричне керується на відстані.

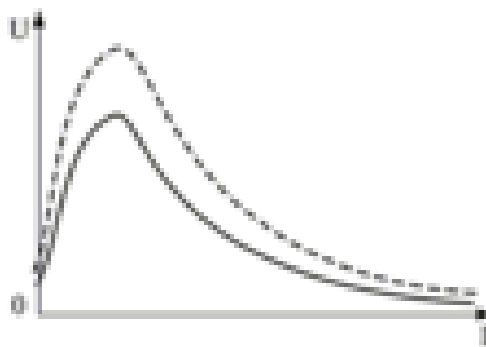


Рисунок 4.3 – ВАХ терморезистора (пунктиром показана ВАХ при більш високій температурі навколишнього середовища або при більшому струмі підігріву)

З терморезисторів з позитивним температурним коефіцієнтом найбільший інтерес являють терморезистори, виготовлені із твердих розчинів на основі BaTiO_3 . Такі терморезистори звичайно називають позисторами. Відомі терморезистори з невеликим позитивним температурним коефіцієнтом ($0,5\text{—}0,7\text{ \%/ K}$), виконані на основі кремнію з електронною провідністю; їхній опір змінюється з температурою приблизно за лінійним законом. Такі терморезистори використовуються, наприклад, для температурної стабілізації електронного обладнання на транзисторах.

Більш широке застосування на судах знайшли саме позистори. На відміну від термістора, температурна залежність опору позистора має складний характер. У датчиках температури використовується ділянку характеристики, на якому із зростанням температури спостерігається підвищення опору позистора.

На судах позистори використовуються для захисту асинхронних двигунів від перевантаження.

Генераторні перетворювачі конвертують вхідну вимірювану величину в ЕРС. Ці елементи використовують для своєї роботи енергію вхідної величини та не потребують додаткових джерел живлення. Існує велика кількість різних генераторних перетворювачів. Найбільш поширені в устроях автоматики термоелектричні, індукційні, п'єзоелектричні та фотоелектричні генераторні перетворювачі.

4.3 ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Термоелектричним перетворювачем (термопарою) називається чутливий елемент, що складається з двох різнорідних металевих провідників (або напівпровідників), що конвертує контрольовану температуру в ТЕРС (термоелектрорушійну силу).

Принцип дії термопари

Термопара - найстаріший і досі найпоширеніший в промисловості температурний датчик. Дія термопари заснована на ефекті, який вперше був відкритий і описаний Томасом Зеєбеком в 1822 р Найбільш правильне визначення цього ефекту наступне: якщо гомогенний матеріал, що володіє вільними зарядами, має різну температуру на вимірювальних контактах, то між контактами виникає різниця потенціалів. Для нас більш звично зазвичай приводиться в літературі

дещо інше визначення ефекту Зеєбека - виникнення струму в замкнутому колі з двох різнорідних провідників при наявності градієнта температур між спаями. Друге визначення, очевидно, випливає з першого і дає пояснення принципу роботи і пристрою термопар. Однак, саме перше визначення дає ключ до розуміння ефекту виникнення ТЕРС не в місці спаю, а по всій довжині термоелектрода, що дуже важливо для розуміння обмежень за точністю, які накладаються самою природою термоелектрики.

Оскільки генерування ТЕРС відбувається по довжині термоелектрода, то показання термопар залежать від стану термоелектродів в зоні максимального температурного градієнта. Тому перевірку термопар слід проводити при тій же глибині занурення в середу, що і на робочому об'єкті. Облік термоелектричної неоднорідності особливо важливий для робітників термопар з неблагородних металів.

Головні переваги термопар:

- Широкий діапазон робочих температур, це самий високотемпературний з контактних датчиків.
- Спай термопар може бути безпосередньо заземлений або приведено у прямий контакт з вимірюваним об'єктом.
- Простота виготовлення, надійність і міцність конструкції.

Недоліки термопар:

- Необхідність контролю температури холодних спаїв. У сучасних конструкціях вимірювачів на основі термопар здійснюється вимірювання температури блоку холодних спаїв за допомогою вбудованого термістора або напівпровідникового сенсора і автоматичне введення поправки до виміряної ТЕРС.
- Виникнення термоелектричної неоднорідності в провідниках і, як наслідок, зміна градувальної характеристики через зміни складу сплаву в результаті корозії та інших хімічних процесів.
- Матеріал електродів не є хімічно інертним і, при недостатній герметичності корпусу термопар, може піддаватися впливу агресивних середовищ, атмосфери і т.д.
- На великій довжині термопарних і подовжувальних проводів може виникати ефект «антени» для існуючих електромагнітних полів.
- Залежність ТЕРС від температури істотно не лінійна. Це створює труднощі при розробці вторинних перетворювачів сигналу.
- Коли жорсткі вимоги висуваються до часу термічної інерції термопар, і необхідно заземлювати робочий спай, слід забезпечити електричну ізоляцію перетворювача сигналу для усунення небезпеки виникнення витоків через землю.

Загальні відомості та особливості роботи термопар

Стандартні таблиці для термоелектричних термометрів і класи допуску та діапазони вимірювань наведені в ГОСТ Р 8.585-2001 «Державна система забезпечення єдності вимірювань. Термопар. Номінальні статичні характеристики перетворення». Найбільш точні термопары - з термоелектродами з благородних металів: платиновий-платинові ПП (тип S (Pt-10% Rh / Pt) (тип R (Pt-13% Rh / Pt), платиновий-платинові ПР (тип В (Pt-30 % Rh / Pt-6% Rh)). Перевагою є

значно менша термоелектрична неоднорідність, ніж у термопар з неблагородних металів, стійкість до окислення, внаслідок чого висока стабільність. Перевагою термопар типу ПР також є практично нульовою вихідний сигнал при температурах аж до 50°C , таким чином усувається необхідність термостатування холодних спаїв. Недоліком є висока вартість і мала чутливість (близько $10\text{ мкВ} / \text{K}$ при 1000°C). Хоча платинородієві термопар перевершують за точністю і стабільністю термопар з неблагородних металів і сплавів, мінімальна розширена невизначеність результату вимірювання температури в діапазоні до 1100°C становить $0,2\text{--}0,3^{\circ}\text{C}$. Причини нестабільності термопар пов'язані із забрудненням, окисленням і випаровуванням матеріалів термоелектродів. При температурах $500\text{--}900^{\circ}\text{C}$ формується стабільний оксид родію. Недолік родію змінює склад платино-родієвого термоелектрода, що призводить до зміни залежності ЕРС від температури і до виникнення термоелектричних неоднорідностей.

В останні роки за кордоном були розроблені і досліджені термопар з чистих металів: золото-платинові і платина-паладієві. За результатами опублікованих досліджень можна зробити висновок про їх кращої стабільності і точності в порівнянні з платинородій-платиновими термопарами.

Термопар з неблагородних металів дуже широко використовуються в усіх галузях промисловості. Вони дешеві і прості в обігу, стійкі до вібрацій, можуть випускатися у вибухозахищеному виконанні. Особливо зручні у користуванні кабельні термопар, електроди яких укладені в спеціальний герметичний гнучкий кабель з мінеральною ізоляцією. Така конструкція дозволяє розташувати термопару в найскладніших конструктивних вузлах об'єкта. Перевагою термопар також є висока чутливість. Істотним недоліком є утворення термоелектричної неоднорідності в зоні максимального градієнта температур, що може призвести до помилки в градуюванні більше 5°C . Цей недолік робить дуже сумнівною саму можливість періодичної перевірки термопар в лабораторних умовах і диктує необхідність повіряти термопар з неблагородних металів на місці їх робочого монтажу. Найменша термоелектрична неоднорідність характерна для термопар ніхросіл / нісіл (тип N). Однією з істотних складових невизначеності вимірювань термопарами є облік температури холодних спаїв або точність компенсації спаїв в цифрових перетворювачах.

Для вимірювання високих температур до 2500°C використовують вольфрам-ренієві термопар. Особливістю їх використання є необхідність усунення окисної атмосфери, яка руйнує дріт. Для вольфрам-ренієвих термопар використовують спеціальні герметичні конструкції чохла, заповнені інертним газом, а також танталові і молібденові чохла з неорганічної ізоляцією з оксиду берилію та оксиду магнію. Одне з важливих застосувань вольфрам-ренієвих термопар полягає у вимірюванні температур в ядерній енергетиці в присутності потоку нейтронів.

Особливістю роботи з термопарами є застосування стандартних подовжувальних та компенсаційних проводів. Провід дозволяють передавати сигнал з термопар на сотні метрів до вимірювального приладу, вносячи мінімальну втрату точності. Подовжувальні дроти виготовляються з того ж матеріалу, що і термоелектроди термопар, але з більш низькими вимогами щодо якості матеріалів. Компенсаційні дроти виготовляються з абсолютно інших матеріалів, ніж термоелектроди і застосовуються для термопар з благородних металів. Так, для термопар ПР в якості компенсаційної може використовуватися мідний дріт.

Застосування компенсаційних проводів може стати домінуючим джерелом невизначеності вимірювання температури в промисловості, якщо різниця температур двох кінців проводу істотна. Так, наприклад, якщо для термопар типу S використовується компенсаційний провід, температура якого змінюється від 23 ° С (головка термопари) до 0 ° С (лід), то виникає додаткова ЕРС близько 15 мкВ, що призведе до помилки у вимірі 1,4 ° С для температури 900 ° С. Стандарт МЕК 60584-3 на компенсаційні дроти .

Рекомендації з вибору типу термопари

Термопари з неблагородних металів

Тип J (залізо-константанові термопара)

- Не рекомендується використовувати нижче 0 ° С, тому що конденсація вологи на залізоному виведенні призводить до утворення іржі;
- Найбільш відповідний тип для розрядженої атмосфери;
- Максимальна температура застосування - 500 ° С, бо вище цієї температури відбувається швидке окислення виводів. Обидва виводи швидко руйнуються в атмосфері сірки.
- Показання підвищуються після термічного старіння.
- Перевагою є також невисока вартість.

Тип E (хромель-константанові термопари)

- Перевагою є висока чутливість.
- Термоелектрична однорідність матеріалів електродів.
- Підходить для використання при низьких температурах.

Тип T (мідь-константанові термопари)

- Може використовуватися нижче 0 ° С;
- Може використовуватися в атмосфері з невеликим надлишком або нестачею кисню;
- Не рекомендується використання при температурах вище 400 ° С;
- Чи не чутлива до підвищеної вологості;
- Обидва виводи можуть бути відпалені для видалення матеріалів, що викликають термоелектричну неоднорідність.

Тип K (хромель-алюмелеві термопари)

- Широко використовуються в різних областях від - 100 ° С до +1000 ° С (рекомендована межа, що залежить від діаметра термоелектрода);
- У діапазоні від 200 до 500 ° С виникає ефект гістерезису, тобто показання при нагріванні і охолодженні можуть відрізнятися. Іноді різниця досягає 5 ° С;
- Використовується в нейтральній атмосфері або атмосфері з надлишком кисню;
- Після термічного старіння свідчення знижуються;
- Не рекомендується використовувати в розрідженій атмосфері, тому хром може виділятися з Ni-Cr виводу (так звана міграція), термопара при цьому змінює ТЕДС і показує занижену температуру;
- Атмосфера сірки шкідлива для термопари, тому впливає на обидва електроди.

Тип N (ніхросил-нісильові термопара)

- Це відносно новий тип термопари, розроблений на основі термопари типу K. Термопара типу K 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.

- Рекомендована робоча температура до 1200 ° C (залежить від діаметра дроту).
- Короткочасна робота можлива при 1250 ° C;
- Висока стабільність при температурах від 200 до 500 ° C (значно менший гістерезис, ніж для термопар типу К);
- Вважається найточнішою термопарою з неблагородних металів.

Загальні поради щодо вибору термопар з неблагородних металів

нижче нуля - тип Е, Т

кімнатні температури - тип К, Е, Т

до 300 ° C - тип К

від 300 до 600 ° C - тип N

вище 600 ° C - тип К або N

Термопары із благородних металів

Тип S (платинородій-платинова термопара)

- Рекомендована максимальна робоча температура 1350 ° C;
- Короткочасне застосування можливе при 1600 ° C;
- Забруднюється при температурах вище 900 ° C воднем, вуглецем, металевими домішками з міді та заліза. При вмісті заліза в платиновому електроді на рівні 0,1%, ТЕРС змінюється більш, ніж на 1 мВ (100 ° C) при 1200 ° C і 1,5 мВ (160 ° C) при 1600 ° C. Така ж картина спостерігається при забрудненні міддю. Таким чином, термопары можна армувати сталевий трубкою, або слід ізолювати електроди від трубки газонепроникної керамікою.
- Може застосовуватися в окислювальному атмосфері.
- При температурі вище 1000 ° C термопара може забруднюватися кремнієм, який присутній в деяких видах захисних керамічних матеріалів. Важливо використовувати керамічні трубки, що складаються з високочистого оксиду алюмінію.
- Не рекомендується застосовувати нижче 400 ° C, бо ТЕРС в цій області мала і вкрай не лінійна.

Тип R (платинородій-платинова термопара)

- Властивості ті ж, що і у термопар типу S.

Тип В (платинородій-платинородієва термопара)

- Рекомендована максимальна температура робочого діапазону 1500 ° C (залежить від діаметра дроту);
- Короткочасне застосування можливе до 1750 ° C;
- Може забруднюватися при температурах вище 900 ° C воднем, кремнієм, парами міді та заліза, але ефект менше, ніж для термопар типу S і R;
- При температурі вище 1000 ° C термопара може забруднюватися кремнієм, який присутній в деяких видах захисних керамічних матеріалів. Важливо використовувати керамічні трубки, що складаються з високочистого оксиду алюмінію.
- Може використовуватися в окислювальному середовищі;
- Не рекомендується застосування при температурі нижче 600 ° C, де ТЕДС дуже мала і не лінійна.

Джерела похибки термопар

Принцип дії термопар і особливості перетворення і передачі сигналу призводять до наступних можливих проблем при їх експлуатації, що викликає помилку у визначенні температури

1. Дефекти формування робочого спаю термопар;
2. Виникнення термоелектричної неоднорідності по довжині термоелектродів і зміна градуовальної характеристики термопар;
3. Електричне шунтування провідників ізоляцією і можливе виникнення гальванічного ефекту;
4. Теплове шунтування;
5. Електричні шуми і витоки.

Формування спаю

Існує багато способів формування робочого спаю термопар: механічне скручування, пайка, зварювання і т.д. При зварюванні в спай додається третій метал, але тому що температури провідників, що виходять з спаю однакові, це не може привести до якоїсь похибки. Проблема полягає в тому, що третій метал, як правило, має більш низьку температуру плавлення і при високих температурах спай може розірватися. Більше того, може відбуватися забруднення електродів чужорідним випареним металом. Тому рекомендується проводити зварювання робочого спаяний. Однак процес зварювання теж вимагає особливої уваги, бо перегрів може пошкодити термопарний дріт і газ, використовуваний для зварювання, може дифундувати в дріт. Дефектна зварювання може привести до розриву спаю при експлуатації. У програмному забезпеченні, що використовується для зчитування й обробки сигналу термопар завжди є спеціальний тест на розрив спаю.

Утворення термоелектричної неоднорідності. Спотворення градуовальної характеристики термопар

Це найбільш серйозне джерело похибки, яке важко діагностується, тому результат відліку ТЕРС може здатися цілком прийнятним і в той же час бути помилковим. Термоелектрична неоднорідність може бути результатом дифузії домішок з навколишньої атмосфери при високих температурах, високотемпературним відпалом або механічною обробкою електродів. Вона може утворитися в результаті протягування електродів, необережного поводження, ударів і вібрацій, що викликають напруження в дроті. Зміна складу сплаву може спостерігатися на окремій ділянці дроту, що знаходиться тривалий час в зоні різкого температурного градієнта. Однак неоднорідність впливає на зміну градуовальної характеристики тільки в тому випадку, якщо вона потрапляє в зону температурного градієнта при вимірюванні. Чим більше градієнт температури, тим більше похибка, що виникає через неоднорідність. Один зі способів зменшення даної похибки - зробити більш плавним зміну температури на довжині термоелектрода, наприклад, використовуючи металеві рукави і чохли.

Опір ізоляції термопар

Опір ізоляції термоелектродів зменшується з підвищенням температури за експоненціальним законом. При високій температурі, в окремих випадках, цей ефект може призвести до утворення так званого «віртуального» спаю, тобто фактичного замикання електродів в середній точці термопар. Таким чином, термопара буде вимірювати температуру не в області робочого спаю, а температуру в середній області. При високих температурах слід також дуже ретельно підбирати матеріал для ізоляції, тому домішки і хімічні речовини ізоляції можуть проникнути в електроди і змінити їх властивості.

Гальванічний ефект

Барвники, застосовувані в деяких видах ізоляції, можуть викликати утворення електроліту при попаданні води. Це може призвести до гальванічного ефекту, який за силою перевищує ефект Зеєбека. Необхідно вживати заходів для захисту термопарного дроту від шкідливої атмосфери, проникнення води та інших рідин.

Теплове шунтування

Необхідно пам'ятати, що термопара, як і будь-який інший контактний датчик, при введенні в об'єкт вимірювання змінює його температуру. Тому, якщо об'єкт малий, термопара теж повинна мати малі розміри. Однак термопара, виготовлена з тонкого дроту, більш схильна ефектам забруднення, відпалу, виникнення напруг, електричному шунтування. Щоб мінімізувати ці ефекти застосовують подовжувальні дроти, які з'єднують термоелектроди термопари з вимірювальним вольтметром і мають коефіцієнт Зеєбека близький до коефіцієнта термопари даного типу. Зазвичай подовжувач провід має більший діаметр, його опір, включений послідовно з термоелектродом, не викликає втрат при передачі сигналу на довгі відстані.

Ми бачили в вище, що термоелемент являє собою тепловий генератор електричного струму, тобто прилад, в якому частина тепла, що нагріває гарячий спай, перетворюється в електричну енергію; інша частина тепла віддається холодним спаєм в навколишнє середовище. Однак внаслідок великої теплопровідності металів тепло, що переходить шляхом теплопровідності від гарячого спаю до холодного, значно більше, ніж тепло, перетворюється на електричну енергію. До того ж з електричної енергії, створюваної термоелементом, деяка частка перетворюється в самому термоелементі в тепло і не може бути використана. Обумовлені цими причинами витрати тепла настільки великі, що ккд термоелементів з металевих провідників не перевищує 0,5%, тоді як для ідеальної теплової машини ми повинні були б очікувати при різниці температур, рівної 300 ° С, ккд близько 50%. Тому металеві термоелементи абсолютно непридатні в якості технічних генераторів струму.

Однак ТЕРС можуть виникати також в колах, що містять місця зіткнення металів з деякими спеціально виготовленими напівпровідниками. При наявності різниці температур між такими спаями виникає ТЕРС, яка в десятки разів перевищує ТЕРС чисто металевих термоелементів і досягає 0,1 В на 100 ° С різниці температур. Разом з тим внаслідок малої теплопровідності напівпровідників співвідношення між кількістю теплоти, що перетворюється на електричну енергію, і кількістю теплоти, що втрачається шляхом теплопровідності і виділяється струмом, стає набагато більш сприятливим. Ккд напівпровідникових термоелементів досягає 15% і може бути ще підвищене. Напівпровідникові термоелементи дозволяють вже реально поставити питання про створення досить економічних технічних теплових генераторів струму, в яких тепла енергія безпосередньо перетворюється в електричну.

Для порівняння можна вказати, що в паровозах паливо використовується з ккд від 4 до 8%, а в парових машинах малої потужності ккд дорівнює 10%. Втім, в кращих теплових електростанціях ккд досягає 30%, а в двигунах внутрішнього згоряння, що працюють на високоякісному рідкому паливі, він доходить до 40-50%.

Вивчення властивостей напівпровідників показало, що існують напівпровідники двох різних типів. В одних струм в гарячому спаю йде від металу

до напівпровідника, в інших - від напівпровідника до металу. Тому вигідно будувати напівпровідникові термоелементи так, як показано на рисунку 4.4. При цьому ТЕРС, що створена на контактах кожного з напівпровідників з металом, складаються.

Поєднуючи послідовно потрібне число таких термоелементів, можна отримати батарею з досить високою ТЕРС.

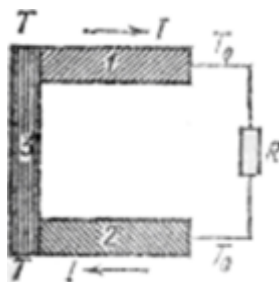


Рисунок 4.4 – Схема устрою напівпровідникового термоелемента:

1 і 2 - напівпровідникові стрижні різних типів, 3 - з'єднувальний металевий місток, що підігрівається зовнішнім джерелом тепла, R - опір зовнішнього кола

Для вимірювання термо-ЕРС електровимірювальні прилади включаються в коло термопари або в розрив холодного спаю (рисунок 4.5, б), або в розрив одного з електродів (рисунок 4.5, в).

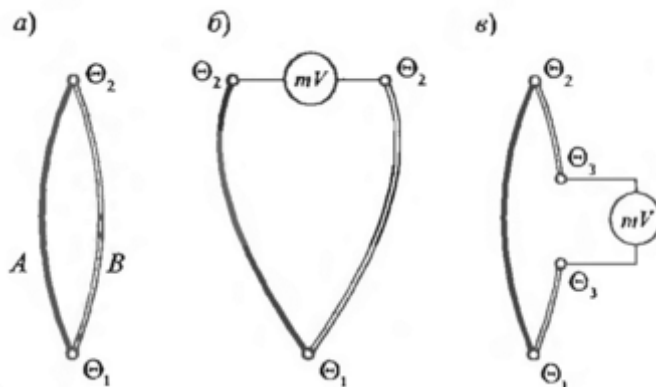


Рисунок 4.5 – Термоелектричні кола

У першому випадку перетворювач має один гарячий і два холодних спаю. При сталості і рівності температур холодних спаїв термо-ЕРС залежить тільки від температури гарячого спаю. У другому випадку перетворювач має чотири спаю: один гарячий, один холодний і два нейтральних. При сталості температури холодного спаю і рівності температур нейтральних термо-ЕРС залежить тільки від температури гарячого спаю. Таким чином, введення третього провода в коло термоелектричного перетворювача не змінює результуючу термо-ЕРС за умови рівності температур в місцях підключення третього провідника.

У таблиці 4.1 наведені умовні позначення термопар згідно міжнародній системі і системі, прийнятої в СНД.

Таблиця 4.1 – Відповідність умовних означень термопар

Означення типу термопари	
згідно міжнародній системі означень	згідно системі, прийнятої в країнах СНД
K	Хромель-алюмель
S	Платина-Родій(10%)-Платина
R	Платина-Родій(13%)-Платина
B	Платина-Родій-Платина-Родій
J	Залізо-Константан
L	Хромель-Капель
E	Хромель-Константан
M	Мідь-Капель

У датчику (рисунок 4.6) застосована потенціометрична вимірювальна схема. Її вихідний сигнал поступає на інвертуючий вхід операційного підсилювача **DA**, вхідний опір якого $R_{BX} \gg R_x$.

При великому значенні внутрішнього опору джерела живлення вихідна температура датчика температури змінюється за лінійним законом від припущення опору термоперетворювача R_x .

На рисунок 4.6 показана принципова схема датчика температури з термоперетворювачем опору R на головному двигуні т / х "Астрахань".

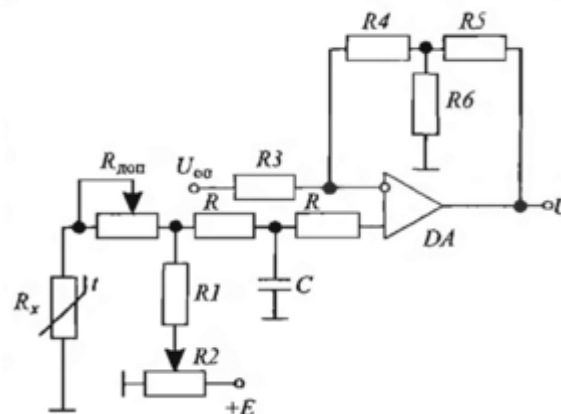


Рисунок 4.6 – Вимірювальна схема в САР температури головного двигуна теплоходу «Астрахань»

На рисунку 4.7 наведена принципова схема датчика температури з термоперетворювачем опору на головному двигуні теплохода «Смоленск». В датчику температури використана мостова вимірювальна схема. Умова рівноваги моста залежить тільки від опору його плечей і не залежить від вхідного опору підсилювача і внутрішнього опору джерела живлення. Врівноважений міст дозволяє виключити постійну складову вимірюваної напруги. Диференціальний підсилювач на **DA2** дозволяє знизити вплив синфазних складових вихідної напруги мосту.

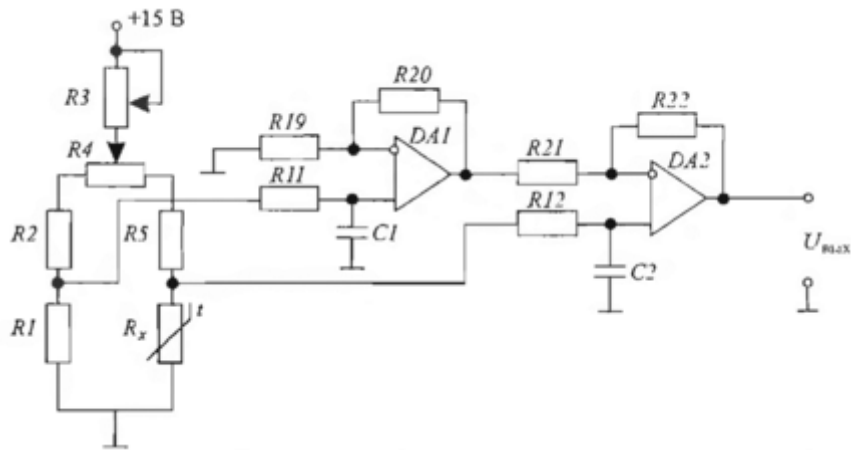


Рисунок 4.7 – Вимірювальна схема в САР температури головного двигуна теплоходу «Смоленск»

Контрольні питання та завдання до глави 4

1. Наведіть класифікацію датчиків температури.
2. Який принцип дії мають термоперетворювачі опору?
3. У чому складається різниця між термісторами та позисторами?
4. Що таке термоелектричний перетворювач?
5. Поясніть принцип роботи вимірювальних схем температури головного двигуна теплоходів «Астрахань» та «Смоленск».

Глава 5. ДАТЧИКИ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ

Інформація про швидкість обертання електродвигунів може бути отримана від різних датчиків швидкості, а також і від самого двигуна. Швидкість двигунів постійного і змінного струму визначає величину їх ЕРС. Таким чином, якщо вимірювати величину ЕРС, то тим самим буде отримана інформація про величину швидкості.

Як датчики частоти обертання в системах автоматики застосовують тахогенератори - малопотужні електричні машини постійного і змінного струму. Для перетворення частоти обертання електродвигунів в напругу застосовують тахометричні мости.

5.1 ТАХОГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Тахогенератори постійного струму в залежності від способу збудження виконують двох типів: магнітоелектричні (збудження від постійних магнітів) і електромагнітні (збудження від спеціальної обмотки) (рисунок 5.1 а, б) .

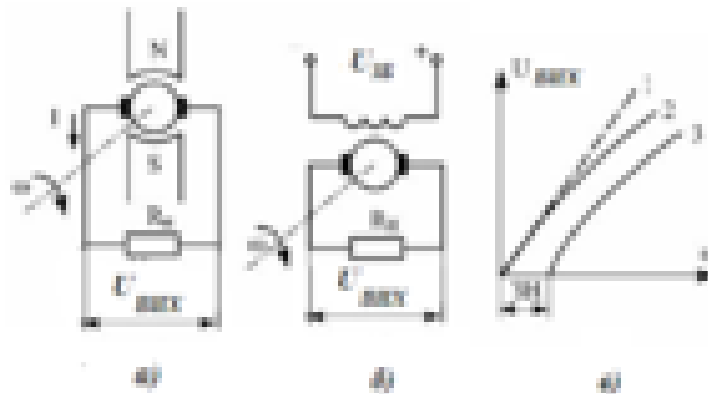


Рисунок 5.1 – Тахогенератори постійного струму та їх статичні характеристики

Напруга на виході тахогенератора при постійному потоці збудження

$$U_{\text{вих}} = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}} = C_E \omega - I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (5.1)$$

де $C_E = (U_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / \omega$ - постійна машини, визначається з паспортних даних.

На холостому ході ($I_{\text{я}} = 0$) напруга $U_{\text{вих}} = E = C_E \omega$. Отже, статична характеристика тахогенератора $U_{\text{вих}} = F(\omega)$ при холостому ході лінійна, так як $C_E = \text{const}$ (пряма 1, рисунок 5.1, в).

При навантаженні статична характеристика стає нелінійною (крива 2), змінюється її нахил, що є наслідком реакції якоря і падіння напруги в обмотці якоря тахогенератора. У реальних тахогенераторах виникає падіння напруги на щітках, що призводить до появи зони нечутливості (крива 3).

Для зменшення спотворення статичних характеристик тахогенераторів використовують при невеликих навантаженнях ($I_{\text{н}} = 0,01 - 0,02 \text{ А}$). Струм у колі якоря $I_{\text{я}} = E / (R_{\text{я}} + R_{\text{н}})$, а вихідна напруга визначається формулою (5.1).

На рисунку 5.2 наведена принципова схема тахогенераторного датчика частоти.

Вихідний сигнал тахогенератора поступає на вхід дільника напруги, складений з резисторів $R1, R2, R3, R4$. Вихідний сигнал знімається з резистору $R4$.

Підключення тахогенератора до затисків 7,8,9 залежить від значення напруги на його виході.

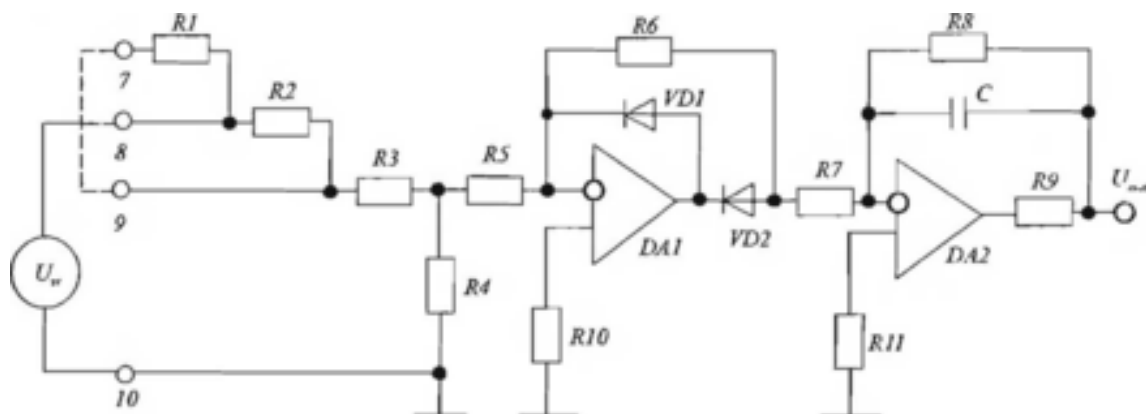


Рисунок 5.2 – Принципова схема тахогенераторного датчика частоти

Напруга з виходу дільника напруги надходить на вхід однополуперіодного випрямляча на операційному підсилювачі DA1. З виходу цього випрямляча сигнал подається на вхід аперіодичної ланки першого порядку на операційному підсилювачі DA2. Схема на операційному підсилювачі DA2 використовується в якості фільтра нижніх частот і служить для згладжування динамічних складових вихідної напруги тахогенератора. При номінальному значенні напруги тахогенератора вихідна напруга датчика частоти обертання дорівнює 10 В.

Тахогенератори постійного струму широко застосовуються в автоматичних системах регулювання електроприводів в якості датчиків частоти обертання. Їх переваги - мала інерційності висока точність, малі габарити і маса, а для магнітоелектричних тахогенераторів ще й відсутність джерела живлення. Недоліком є наявність колектору з щітками.

5.2 ТАХОГЕНЕРАТОРИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Синхронні тахогенератори - однофазна синхронна машина з ротором у вигляді постійного магніту (рисунок 5.3, а)., У синхронних тахогенераторів зі зміною кутової швидкості разом з амплітудою змінюється і частота вихідної напруги. Статичні характеристики нелінійні. У динамічному відношенні синхронні тахогенератори є безінерційними елементами.

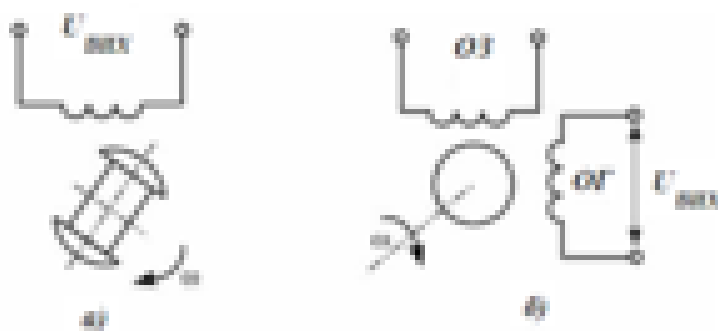


Рисунок 5.3 – Тахогенератори змінного струму: а) синхронний, б) асинхронний

Асинхронний тахогенератор - це двофазна асинхронна машина з порожнистим немагнітним ротором (рисунок 5.3, б.). На статорі асинхронного тахогенератора розміщуються дві зсунуті на 90 обмотки (збудження ОЗ і генератора ОГ). Обмотка ОЗ підключається до джерела змінного струму.

В обмотці ОГ, що є вихідною, при обертанні ротора наводяться ЕРС трансформації і обертання. Під дією ЕРС обертання на виході тахогенератора виникає напруга $U_{вих}$.

Статична характеристика асинхронного тахогенератора також нелінійна. При зміні обертання ротора фаза вихідної напруги змінюється на 180 °.

Асинхронні тахогенератори використовують як датчики кутової швидкості, частоти обертання і прискорень. В останньому випадку обмотка збудження асинхронного тахогенератора підключається до джерела постійного струму.

Переваги асинхронних тахогенераторів - надійність, мала інерційність. Недоліки - наявність на виході залишкової ЕРС при нерухомому роторі, відносно великі габарити.

5.3 ТАХОМЕТРИЧНІ МОСТИ

Тахометричні мости постійного і змінного струму застосовують в системах автоматики для створення зворотного зв'язку за частотою обертання електричних двигунів. Це дозволяє спростити систему, так як відпадає необхідність у додатковій електричній машині - тахогенераторі. При цьому зменшуються статичні і динамічні навантаження на виконавчий двигун.

Тахометричний міст постійного струму являє собою спеціальну мостову схему (рисунок 5.4, а), в одне з плечей якої включений якір двигуна $R_{я}$, а в інші - резистори R_1 , R_2 , R_H . До діагоналі ab моста підводиться напруга мережі U , що живить якір двигуна, а з діагоналі cd знімається напруга $U_{вих}$, яка пропорційна кутовій швидкості ω .

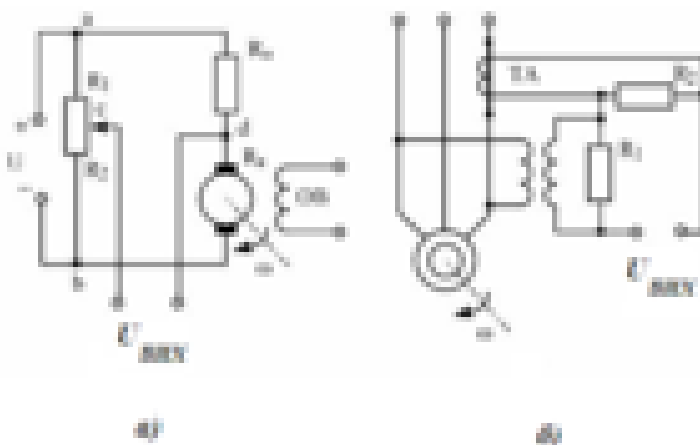


Рисунок 5.4 – Тахометричний міст постійного струму (а) і безконтактний вимірювальний пристрій частоти обертання асинхронного двигуна (б)

Якщо струм у вихідному колі відсутній, то

$$U_{вих} = U_{ac} - U_{ad}; U_{ad} = I_{я} R_H; U_{ac} = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}; I_{я} = \frac{U - E}{R_{я} + R_H}; E = C_E \omega. \quad (5.2)$$

Вирішуючи спільну систему рівнянь, отримаємо

$$U_{вих} = U \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_H}{R_{\text{я}} + R_H} \right) + \frac{C_E R_H \omega}{R_{\text{я}} + R_H}. \quad (5.3)$$

Напруга на виході тахометричного моста

$$U_{вих} = \frac{C_E R_H \omega}{R_{\text{я}} + R_H} = K_{\text{ТМ}} \omega, \quad (5.4)$$

де $K_{\text{ТМ}}$ - коефіцієнт передачі тахометричного моста.

Похибка тахометричного моста становить $\pm (2 - 5)\%$. У динамічному відношенні тахометричні мости постійного струму є безінерційною ланкою.

Для контролю частоти обертання ротора асинхронного електродвигуна застосовують безконтактний вимірювальний пристрій (рисунок 5.4, б), що містить вимірювальний трансформатор струму ТА і напруги ТВ.

5.4 ІНДУКЦІЙНИЙ ДАТЧИК ШВИДКОСТІ

У схемах гальмування протитоком асинхронних електродвигунів широко застосовують індукційне реле контролю швидкості, показаний на рисунку 5.5.

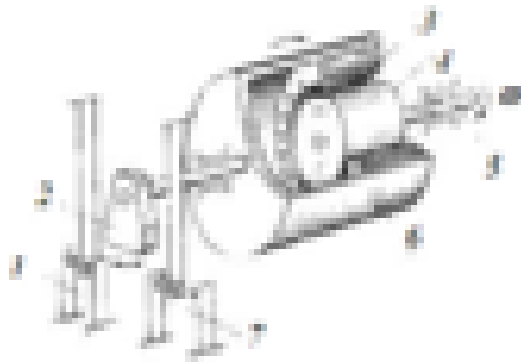


Рисунок 5.5 – Індукційне реле контролю швидкості

З валом електродвигуна, кутову швидкість якого необхідно контролювати, пов'язують вхідний вал реле 5, на якому встановлений циліндричний постійний магніт 4. При обертанні електродвигуна поле магніту перетинає провідники короткозамкненою обмотки 3 поворотного статора 6. У обмотці наводиться ЕРС, величина якої пропорційна кутовий швидкості обертання валу. Під її впливом в обмотці з'являється струм і виникає сила взаємодії, яка прагне повернути статор 6 в бік обертання магніту.

При певній частоті обертання сила зростає настільки, що упор 2, долаючи опір плоскої пружини, перемикає контакти реле. Реле забезпечено двома контактними вузлами: 1 і 7, які перемикаються в залежності від напрямку обертання.

Індукційне реле контролю швидкості має досить складну конструкцію і низьку точність, яка може бути прийнятною тільки для грубих систем управління. Більш висока точність контролю швидкості може бути отримана за допомогою тахогенератора - вимірювальної мікромашини, напруга на затискачах якої прямо пропорційна швидкості обертання.

5.5 ДАТЧИКИ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ З ІНДУКЦІЙНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Індукційний перетворювач складається з П-подібного магнітопроводу, що розміщується нерухомо поблизу вала, і сталеві стрічки з перфорацією, що міститься на валу (рисунок 5.6). Між валом і стрічкою по всій окружності проходить гумова стрічка

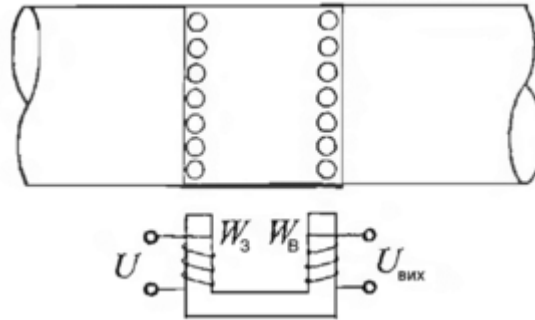


Рисунок 5.6 – Індукційний датчик частоти обертання

На одному з полюсів магнітопроводу встановлена обмотка збудження W_3 , що живиться від джерела постійного струму U , на другому – вимірювальна обмотка W_B , з якої знімається вихідна напруга $U_{вих}$.

Між стрічкою і полюсами є повітряний зазор. При обертанні вала відбувається періодична зміна магнітного опору, що приводить до зміни магнітного потоку в обмотці збудження. При зміні магнітного потоку в вимірювальній обмотці наводиться ЕРС:

$$e = -W_B \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.5)$$

Частота вихідного сигналу визначається виразом

$$f = \frac{nZ}{60}, \quad (5.6)$$

де n - число оборотів гребного вала в хвилину; Z - кількість дірок в стрічці.

З виразу (5.6) зрозуміло, що ЕРС перетворювача не залежить від зовнішніх умов, тому точність вимірювання залежить тільки від точності вимірювання частоти ЕРС.

Сам перетворювач не вносить погрешностей в процес вимірювання. У відповідності з виразами (5.5), (5.6) поряд з частотою при зміні частоти обертання відбувається і зміна величини ЕРС. При малій частоті обертання ЕРС має невелике значення, тому при вимірюванні її частоти виникають великі погрешності.

В індукційних перетворювачах в якості джерела постійного магнітного потоку часто замість обмотки застосовують постійні магніти, а роль сталеві стрічки виконують частки обертових деталей машини (рисунок 5.7).

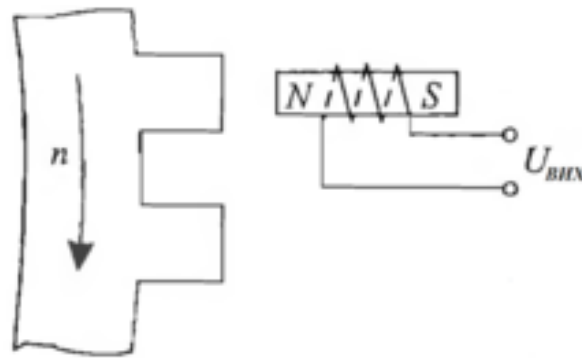


Рисунок 5.7 – Індукційний перетворювач частоти обертання з постійним магнітом

Принципова схема індукційного перетворювача, частота якого змінюється пропорційно частоті обертання валу наведена на рисунку 5.8.

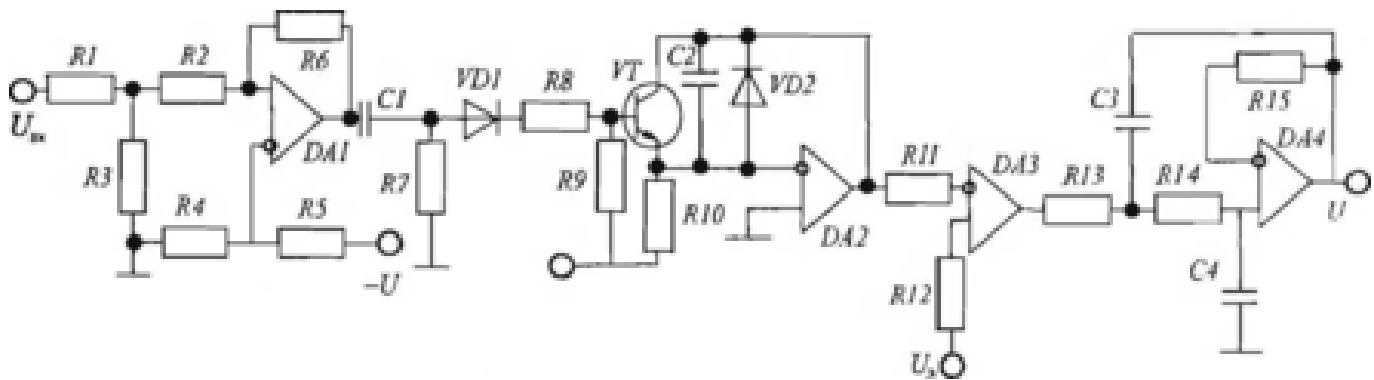


Рисунок 5.8 – Принципова схема датчика частоти обертання

Вихідна напруга індукційного перетворювача (ІП), частота якого змінюється пропорційно частоті обертання валу, має довільну форму. Напруга довільної форми індукційного перетворювача подається на формувач імпульсів (ФІ). ФІ являє собою релейний пристрій з позитивним зворотним зв'язком; у нього вхідний сигнал з ІП подається на неінвертуючий вхід операційного підсилювача DA1. Наявність позитивного зворотного зв'язку призводить до того, що при зміні знаку вхідної напруги відбувається стрибкоподібний перехід операційного підсилювача з одного насиченого стану в інший. Знак вихідної напруги збігається зі знаком вхідного. ФІ дозволяє отримати з вхідної напруги довільної форми вихідну напругу прямокутної форми, з частотою імпульсів, пропорційною частоті обертання валу.

Далі прямокутні імпульси подаються на диференційну ланку, що складається з конденсатора C1 і резистора R7, яка перетворює прямокутні імпульси в короточасні різнополярні. Підключення діода VD1 забезпечує проходження тільки позитивних короточасних імпульсів. Отримані імпульси управляють генератором пилкоподібної напруги (ГПН). ГПН заснований на використанні інтегруючого пристрою на операційному підсилювачі DA2 і транзисторі VT. Вихідна напруга ГПН має пилкоподібну форму з постійним нахилом і частотою, рівною частоті вихідного сигналу ІП. Вихідний сигнал з ГПН подається на інвертуючий вхід операційного підсилювача DA3. На неінвертуючий вхід DA3 подається еталонна напруга з постійним значенням U. Схема на DA3 являє собою нуль-орган. На виході нуль-органу з'являються імпульси прямокутної форми з постійними амплітудою і

тривалістю, з частотою, пропорційною частоті обертання валу. Напруга з нуля-органу надходить на фільтр нижніх частот (ФНЧ) другого порядку на операційному підсилювачі DA4. Вихідна напруга ФНЧ дорівнює середньому значенню прямокутних імпульсів нуля-органу яке змінюється пропорційне їх частоті і, отже, частоті обертання валу.

На рисунку 5.9 показана принципова схема датчика, в якому для отримання прямокутних імпульсів з постійними амплітудою і тривалістю застосовується чекаючий мультивібратор (одновібратор) на операційному підсилювачі DA2.

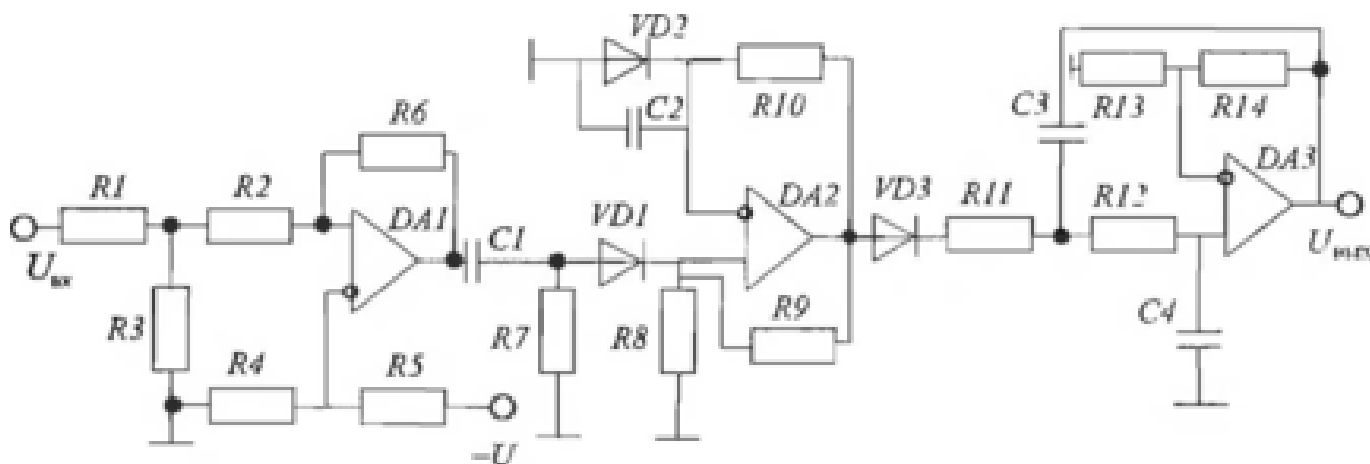


Рисунок 5.9 – Принципова схема датчика частоти обертання з чекаючим мультивібратором

Час імпульсу / визначається постійної часу $C2R10$ і ставленням $R9 / R8$. Якщо $R9/R8 = 10$, $t = 0,1(C2R10)$.

Датчик частоти обертання, що служить також для визначення напрямку обертання валу, складається з двох індукційних перетворювачів, зміщених один відносно іншого по окружності валу на певний кут. Після попередньої обробки з виходу кожного перетворювача можна отримати безперервну послідовність імпульсів. Залежно від напрямку обертання валу одна з послідовностей імпульсів випереджає іншу. Реверс валу призводить до зміни чергування послідовностей імпульсів, які визначаються логічною схемою.

5.6 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ РЕЛЕ КОНТРОЛЮ ШВИДКОСТІ

Електромеханічне реле контролю швидкості (РКШ) працює за принципом асинхронного двигуна (рисунки 5.10).

Ротор реле являє собою постійний магніт 1, з'єднаний з валом двигуна, швидкість якого вимірюється. Постійний магніт поміщений усередині алюмінієвого циліндра 5, що має обмотку у вигляді білячій клітини. Циліндр може повертатися навколо осі на невеликий кут і перемикає при цьому за допомогою упору 3 контакти 4 (6).

При нерухомому двигуні упор займає середнє положення і контакти реле знаходяться в «нормальному» положенні. При обертанні двигуна і тим самим магніту 1 вже при невеликих швидкостях на циліндр 5 починає діяти крутий

момент, під впливом якого він повертається і забезпечує за допомогою упору 3 перемикання контактів 4.

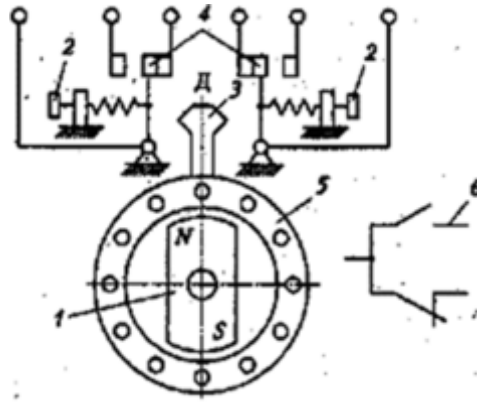


Рисунок 5.10 – Схема пристрою реле контролю швидкості РКШ

При швидкості двигуна, близькою нулю, циліндр повертається в середнє положення і контакти 4 переходять у своє «нормальний» стан. Величина швидкості, при якій перемикаються контакти реле, визначається положенням наладчувальних гвинтів 2.

Реле контролю швидкості зручно використовувати при автоматизації процесу гальмування, коли потрібно забезпечувати відключення двигуна від мережі після зниження його швидкості до нуля, тому реле контролю швидкості дуже часто використовуються в схемах автоматичного гальмування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором методом зустрічного включення.

Технічні характеристики реле контролю швидкості РКШ.

Номінальний струм контактів - 2,5 А. Номінальна напруга змінного струму на контактах - 500 В. Частота обертання реле максимальна - 3000 об / хв. Кількість і рід контактів - 2 перемикаючі.

Контрольні питання та завдання до глави 5

1. Наведіть класифікацію датчиків частоти обертання.
2. Який принцип дії мають тахогенератори та індукційні датчики швидкості опору?
3. Пояснити принципову схему датчика частоти обертання.
4. Пояснити принципову схему датчика частоти обертання з чекаючим мультивібратором.

6.1 МЕТОДИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТИСКУ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ДАТЧИКІВ

6.1.1 Методи перетворення тиску

Датчик тиску складається з первинного перетворювача тиску, у складі якого чутливий елемент - приймач тиску, схеми вторинної обробки сигналу, різних за конструкцією корпусних деталей, у тому числі для герметичного з'єднання датчика з об'єктом і захисту від зовнішніх впливів і пристрою виведення інформаційного сигналу. Основними відмінностями одних приладів від інших є межі вимірювань, динамічні та частотні діапазони, точність реєстрації тиску, допустимі умови експлуатації, масогабаритні характеристики, які залежать від принципу перетворення тиску в електричний сигнал:

- Тензометричний метод. Чутливі елементи датчиків базуються на принципі зміни опору при деформації тензорезисторів, приклеєних до пружного елемента, який деформується під дією тиску.
- П'єзорезистивний метод. Заснований на інтегральних чутливих елементах з монокристалічного кремнію. Кремнієві перетворювачі мають високу чутливість завдяки зміні питомого об'ємного опору напівпровідника при деформації тиском. Для вимірювання тиску чистих неагресивних середовищ застосовуються, так звані, низька вартість - рішення, засновані на використанні чутливих елементів або без захисту, або з захистом силіконовим гелем. Для вимірювання агресивних середовищ і більшості промислових застосувань використовується перетворювач тиску в герметичному метало-скляному корпусі, з розділовою діафрагмою з нержавіючої сталі, що передає тиск вимірюваного середовища за допомогою кремнійорганічної рідини.
- Ємнісний метод. "Серцем" датчика тиску є ємнісний осередок. Ємнісний метод заснований на залежності зміни електричної ємності між обкладинками конденсатора та вимірювальної мембрани від тиску. Основними перевагою ємнісного методу є захист від перевантажень (мембрана при перевантаженні лягає на стінки «обкладинки» конденсатора, тривалий час не піддаючись деформації, при знятті навантаження, мембрана відновлює вихідну форму, при цьому додаткове калібрування сенсора не потрібно), також забезпечується висока стабільність метрологічних характеристик, зменшення впливу температурної похибки за рахунок малого обсягу заповнює рідини безпосередньо в осередку.
- Резонансний метод. В основі методу лежить зміна резонансної частоти коливного пружного елемента при деформації його силою або тиском. Це і пояснює високу стабільність датчиків і високі вихідні характеристики приладу. До недоліків можна віднести індивідуальну характеристику перетворення тиску, значний час відгуку, неможливість проводити вимірювання в агресивних середовищах без втрати точності показань приладу.
- Індуктивний метод. Заснований на реєстрації вихрових струмів (струмів Фуко). Чутливий елемент складається з двох котушок, ізольованих між собою металевим екраном. Перетворювач вимірює зміщення мембрани за

відсутності механічного контакту. У котушках генерується електричний сигнал змінного струму таким чином, що заряд і розряд котушок відбувається через однакові проміжки часу. При відхиленні мембрани створюється струм у фіксованій основній котушці, що призводить до зміни індуктивності системи. Зсув характеристик основної котушки дає можливість перетворити тиск в стандартизований сигнал, за своїми параметрами прямо пропорційний прикладеному тиску.

- Іонізаційний метод. В основі лежить принцип реєстрації потоку іонізованих частинок. Аналогом є лампові діоди. Лампа оснащена двома електродами: катодом і анодом, - а також нагрівачем. У деяких лампах останній відсутній, що пов'язано з використанням більш досконалих матеріалів для електродів. Перевагою таких ламп є можливість реєструвати низький тиск - аж до глибокого вакууму з високою точністю. Однак слід строго враховувати, що подібні прилади не можна експлуатувати, якщо тиск у камері близько до атмосферного. Тому подібні перетворювачі необхідно поєднувати з іншими датчиками тиску, наприклад, ємнісними. Залежність сигналу від тиску є логарифмічною.
- П'єзоелектричний метод. В основі лежить прямий п'єзоелектричний ефект, при якому п'єзоелемент генерує електричний сигнал, пропорційний діє на нього силі або тиску. П'єзоелектричні датчики використовуються для вимірювання швидкозмінних акустичних та імпульсних тисків, володіють широкими динамічними і частотними діапазонами, мають малу масу і габарити, високу надійність і можуть використовуватися в жорстких умовах експлуатації.

6.1.2 Класифікація датчиків

Ці прилади класифікуються за видом тиску, що вимірюється і типом вихідного сигналу. Вимірювальні перетворювачі тиску розрізняються також, по одиниці вимірювання та за низкою своїх основних технічних характеристик.

За принципом роботи чи способом перетворення вимірюваного тиску у вихідний сигнал датчики тиску поділяються на:

- деформаційні (деформаційні переміщення пружного чутливого елемента (мембрани, сильфони, трубка Бурдона) трансформуються за посередництвом проміжних механізмів и перетворювачів в електричний чи електромагнітний сигнал);
- електричні (вимірюваний тиск, впливаючи на чутливий елемент, змінює його власні електричні параметри: електричний опір, електрична ємність або електричний заряд, котрі стають мірою цього тиску).

В останні роки набули поширення і інші принципи створення вимірювальних перетворювачів тиску: волоконно-оптичні, гальваноманітні, об'ємного стиску, акустичні, дифузійні та ін.

За видом вимірюваного тиску датчики тиску поділяються на:

- перетворювачі абсолютного тиску;
- перетворювачі надлишкового тиску;
- перетворювачі вакуумметричного тиску;
- перетворювачі надлишкового / вакуумметричного тисків;
- перетворювачі різниці тисків;

- перетворювачі гідростатичного тиску.

За видом вихідного сигналу датчики тиску поділяються на:

- аналогові (вимірюваний тиск перетворюється в аналоговий уніфікований пневматичний чи електричний сигнал);
- цифрові.

Основні діючі датчики тиску належати до аналогових з уніфікованим струмовим сигналом 0 ... 5, 0 ... 20 або 4 ... 20 мА. Останніми роками спостерігається перехід до цифрових датчиків тиску (у тому числі поширення набуває цифровий протокол HART). Бурхливо розвивається системна інтеграція перетворювачів тиску з використаних окремих різновидів промислових мереж (Modbus, Profibus та ін.). При цьому використовується цифровий протокол обміну інформацією між давачем тиску та системою управління, що суттєво спрощує взаємозамінність приладів різних виробників.

6.2 ДЕФОРМАЦІЙНІ ДАТЧИКИ ТИСКУ

У промисловій практиці вимірювання тисків поширення набули деформаційні прилади з пружним чутливим елементом. У цих приладах тиск визначається за деформацією пружних чутливих елементів або за зусиллям, що вони створюють, котрі перетворюються передавальними механізмами в кутове чи лінійне переміщення вказівника на шкалі приладнав. За видом пружного чутливого елемента пружинні прилади поділяються на такі види:

- прилади з трубчастою пружиною (трубкою Бурдона);
- мембранні прилади;
- сильфонні прилади.

6.2.1 Трубка Бурдона

Трубка Бурдона (трубчаста пружина) - чутливий елемент деформаційного типу приладнати для вимірювання тиску, що виконаний у вигляді С-подібної трубки еліптичного або овального перерізу, закритої з одного кінця и під'єднаної до вимірюваного тиску відкритим кінцем, котрий жорстко закріплений у корпусі.

Принцип роботи. Тиск, що подається в середину трубки викликає пружну деформацію еліптичного або овального перерізу трубки в бік кола, котра спричиняє появу напружень у поздовжньому напрямку, які змушують трубку розгинатися, а вільний кінець трубки переміщатись. Система важелів и передач перетворює цей рух и повертає стрілку, що показує тиск відносно круглої шкали.

Діапазон вимірювання такого манометра становить - від 10 Па до 1000 МПа.

Матеріалом для трубчастої пружини може служити сталь, бронза, латунь. Залежних від конструктивного виконання трубчасті пружини можуть бути одно- і багатовиткові (гвинтові та спіральні), S-подібні тощо. Найпоширеніші одновиткові трубчасті пружини, що використовують в манометрах, котрі призначені для вимірювання тиску рідин та газів, а також у різновиді манометра - глибиномірі.

На рисунку 6.1. приведена схема датчика з диференціально-трансформаторним перетворювачем на основі трубки Бурдона.

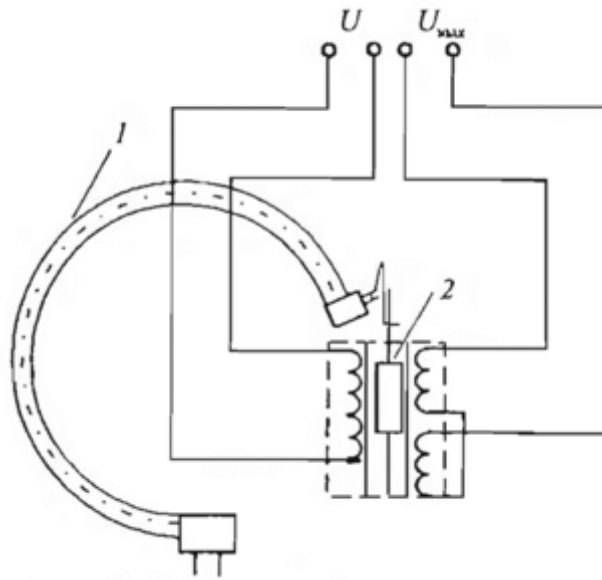


Рисунок 6.1 – Датчик тиску з диференціально-трансформаторним перетворювачем

У цьому датчику до вільного кінця трубки Бурдона 1 прикріплений якорь 2 перетворювача. При вимірюванні контрольованого тиску відбувається переміщення якоря, яке приводить до зміни вихідної напруги.

6.2.2 Мембранні прилади

Мембрана - гнучка або пружна, закріплена за замкненим контуром перетинка, що розділяє дві порожнини з різним тиском або відокремлює замкнену порожнину від навколишнього середовища (рисунок 6.2). Застосовується в ряді пристроїв, приладів (мембранні (діафрагмові) насоси, мембранні пневмоциліндри, мембранна пневмоавтоматика). Мембрану застосовують в основному при тисках до 1 МПа.

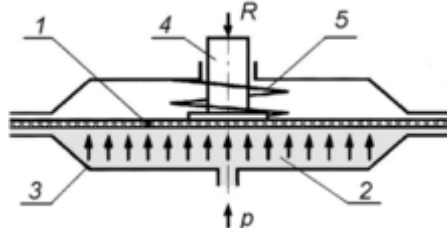


Рисунок 6.2 – Виконавчий механізм на базі плоскої еластичної мембрани: 1 - диск мембрани; 2 - камера тиску; 3 - корпус; 4 - шток; 5 – пружина

Мембрани в пристроях пневмоавтоматики використовують для сприймання зміни величини параметрів, що контролюються чи регулюються та перетворення їх у механічні переміщення чи зусилля або навпаки. Найчастіше використовують еластичні мембрани, що являють собою затиснені між фланцями плоскі або гофровані диски, виконані з гуми чи прогумованої тканини, капронової чи фторопластової плівки, тефлону та ін. Вони призначені для створення значних зусиль при порівняно невеликих переміщеннях.

Мембранний виконавчий механізм представляє собою затиснений по периферії корпусу еластичний диск 1. При збільшенні тиску p , що підведений у камеру 2 еластичний диск притискається до верхньої частини корпусу 3 и шток 4,

пов'язаний з еластичним диском висувається, долаючи силу корисного опору R . Зворотний хід штока при зменшенні тиску p забезпечує пружина 5.

Металеві мембрани (з фосфористої і берилієвої бронзи, фольги, хромонікелевої сталі) застосовуються в анероїдах, вимірювальних пристроїв, що працюють в умовах високих температур, в телефонних трубках і звукозаписних пристроях (диктофонах) старих конструкцій.

На рисунку 6.3. показаний мембранний датчик тиску з індуктивним перетворювачем

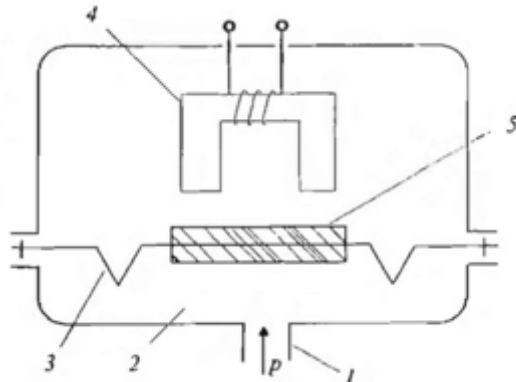


Рисунок 6.3 – Мембранний датчик тиску з індуктивним перетворювачем

Датчик складається з мембранного чутливого елемента 3, до якого прикріплений якорь 5 індуктивного перетворювача 4. Контрольований тиск, що поступає по трубці 1 в порожнину 2, викликає переміщення мембрани разом з якорем, що приводить до зміни індуктивності перетворювача.

6.2.3 Сильфонні прилади

Сильфон - тонкостінна металева трубка або камера з гофрованою (хвилеподібною) бічною поверхнею.

Сильфони виготовляють з латуні, берилієвої бронзи або нержавіючої сталі. Найширше сильфони застосовують в пневмо- і гідравтоматиці як чутливі елементи, що реагують (розширенням або стискуванням, подібно до пружини) на зміну тиску газу або рідини, що діє на дно сильфона. Стінки сильфона для роботи при великих різницях тиску і в агресивних середовищах виготовляють 2-, 3- і 4-шаровими.

Класифікація

- Одношарові металеві вимірювальні сильфони, що використовують як пружні чутливі елементи у приладах контролю та регулювання різних конструкцій і служать для перетворення вимірюваного тиску в переміщення, та призначені для роботи у середовищі, що не спричиняють корозію матеріалу при температурах : від 213K (-60 ° C) до 473K (200 ° C) - для сильфонів із сплаву марки 36НХТЮ; від 213K (-60 ° C) до 373K (+ 100 ° C) - для сильфонів з берилієвої бронзи марки БрБ2; від 73K (-200 ° C) до 673K (+400 ° C) - для сильфонів з нержавіючої сталі марок 12Х18Н10Т та 08Х18Н10Т. Стандартом передбачені понад 150 типорозмірів сильфонів діаметрами від 4,5 до 125 мм при товщині стінки від 0,08 до 0,25 мм.
- Сильфони багатшарові призначені для роботи як чутливі елементи у середовищі, що не викликають корозії матеріалу, при температурах від -260 ° C до + 550 ° C, Сильфони виготовляють з корозієстійкої і жаротривкої сталей марок 08Х18Н10Т або 12Х18Н10Т. Забезпечують абсолютну герметичність при високому тиску і температурі в поєднанні з доброю гнучкістю, що є

особливо актуальним в умовах шкідливих виробництв. Стандартом передбачене біля 150 типорозмірів сильфонів діаметрами від 16 до 125 мм з товщиною шару від 0,08 до 0,25 мм.

- Сильфони зварні призначені для використання як пружні чутливі елементи у складі виробів спеціальної техніки. Гофри зварного сильфона виготовлені у вигляді кільцевих мембран заданого профілю, з'єднаних між собою аргонодуговим зварюванням. Мають низьку істотних переваг перед суцільнотягнутими сильфонами: великий робочий хід, високий ресурс роботи, менший розкид жорсткості тощо. Зварні пластинчасті сильфони мають малу жорсткість, скроню пружність, великі стійкість при знакозмінних навантаженнях й довговічність. Одношарові сильфони особливо ефективні при роботі з низькими тиском и вакуумом. Величина переміщення ставити до 80% довжини, що забезпечує високу компенсуючого здатність зварного пластинчастого сильфона. Виготовляють із сталі марки 12X18H10T.

Здатність сильфонів змінювати свою довжину під дією тиску середовища використовується у засобах автоматизації для перетворення тиску газу (зовнішнього або внутрішнього) у пропорційні йому переміщення дна сильфона. Основна характеристика сильфона - це його механічна жорсткість, що визначається відношенням діючої на сильфон сили до викликані нею деформації. У межах лінійної статичної характеристики сильфона (залежність зусилля-хід) механічна жорсткість сильфона стала. Для збільшення при необхідності жорсткості сильфона у внутрішній його частині розташовують пружину.

6.3. ЕЛЕКТРИЧНІ ДАТЧИКИ ТИСКУ

В електричних датчиках тиску вимірюваній тиск, здійснюючи вплив на чутливий елемент, змінює його власні електричні параметри: електричний опір, електричну ємність чи електричний заряд, котрі стають мірою цього тиску. Основна маса датчиків тиску реалізовані за одним із трьох принципів:

- ємнісні - використовують пружний чутливий елемент у вигляді конденсатора із змінним зазором за рахунок зміщення чи прогину під дією тиску рухомого електрода-мембрани відносно нерухомого електрода;
- п'єзоелектричні - базуються на залежності поляризованого заряду чи резонансної частоти п'єзокристала кварцу чи турмаліну під дією прикладеного до нього тиску;
- тензорезисторні - використовують залежність активного електричного опору провідника чи напівпровідника від ступеню його деформації;
- індуктивні – базуються на зміні індуктивності устрою під дією тиску.

6.3.1 Ємнісні датчики тиску

Ємнісні датчики тиску реалізуються на основі кремнієвих діафрагм. У таких датчиках переміщення діафрагми щодо опорної пластини змінює ємність між ними. Ємнісні датчики працюють найефективніше при невисоких тисках.

Монолітні ємнісні датчики тиску, виготовлені з кремнієвих кристалів, мають максимальну стабільність робочих характеристик. Переміщення діафрагми може забезпечити 25% зміну ємності в широкому діапазоні значень, що робить можливим проведення прямого оцифрування результатів вимірювань.

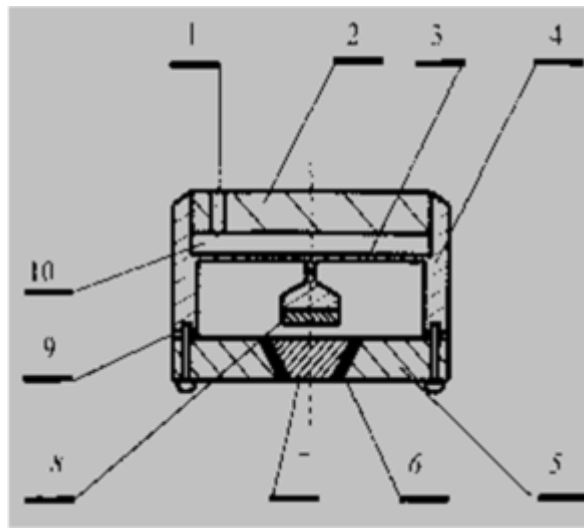


Рисунок 6.4 – Ємнісний датчик тиску:

1 - капіляр; 2, 3 - мембрана; 4, 5 - підстава; 6 - ізолятор, 7 - конус (обкладка конденсатора); 8 - обкладка конденсатора, 9 - прокладка; 10 - підмембранна камера

6.3.2 Тензорезистивні датчики тиску

До складу датчиків такого типу входять два компоненти: пластина відомої площі і детектор, вихідний сигнал якого пропорційний прикладеній силі.

Тензорезистори можуть бути провідниковими та напівпровідниковими; провідникові, в свою чергу – дровими та фольговими.

В якості прикладу може служити датчик тиску з тензорезисторний перетворювачем GT-30, розробленими фірмою AUTORONICA, що призначений для вимірювання тиску у форсунки. Зазвичай цей датчик використовується тільки при індукуванні двигуна. Діапазон вимірювань складає $0 \dots 10^2$ МПа. Робоча температура $0 \dots 150$ °С. Аналогічний датчик тиску GT-20 призначений для вимірювання тиску в циліндрах внутрішнього згорання. Він встановлюється на індикаторний кран. Діапазон вимірювань складає $0 \dots 16$ МПа. Робоча температура $0 \dots 300$ °С.

Для обробки сигналу застосовується підсилювач СЕ-11, що входить до складу датчика тиску, принципова схема якого наведена на рисунку 6.5.

Тензорезистивний перетворювач R_T включений в мостову схему з резисторами $R1 - R4$. Потенціометр $R3$ служить для балансування мостової схеми.

Схема на операційному підсилювачі (ОП) DA1 представляє собою диференціальний підсилювач, на неінвертуючий вхід якого подається постійна напруга, що визначається резистором $R3$. На інвертуючий вхід DA1 подаються дві напруги: одна визначається тензорезистором R_T , друга поступає з повторювача напруги на ОП DA3.

Вихідний сигнал з DA1 подається на неінвертуючий підсилювач DA2, вихідний сигнал якого в залежності від тиску знаходиться в діапазоні $0 \dots 5$ В. При відсутності тиску вихідний сигнал за допомогою резистора $R3$ робиться рівним 1 В.

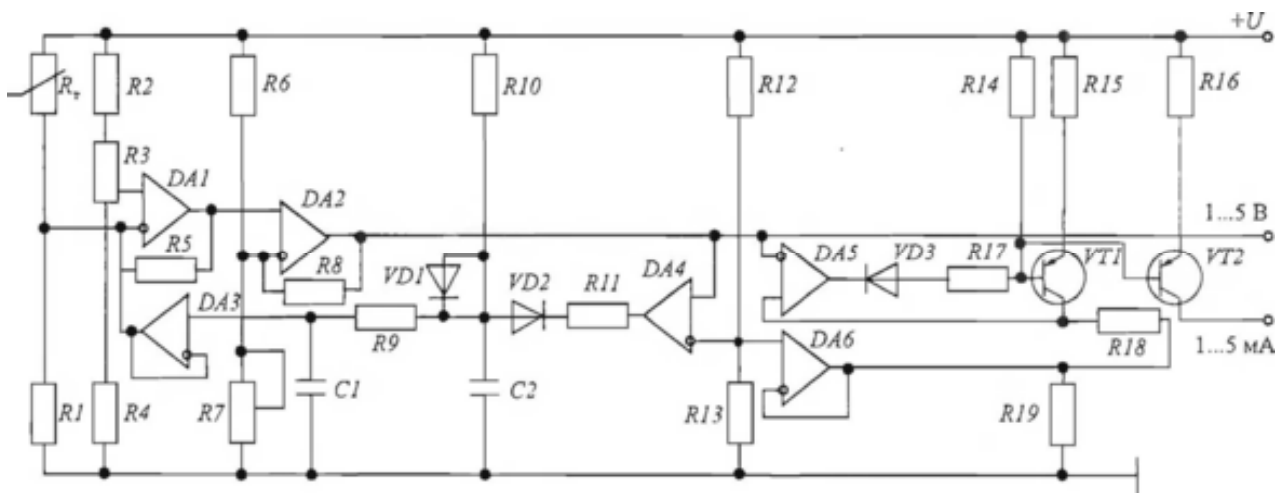


Рисунок 6.5 – Датчик тиску з тензорезисторним перетворювачем

Конденсатор $C1$ і компаратор $DA4$ служать для виділення складової вихідного сигналу, що відповідає динамічному тиску. Операційні підсилювачі $DA5$, $DA6$ і транзистори $VT1$, $VT2$ перетворюють вихідну напругу в сигнал струму, який змінюється в діапазоні $1...5$ мА.

Обидва виходи – за напругою та струмом – можуть бути навантажені одночасно.

В суднових системах застосовують в основному провідникові тензорезистори. Під дією зовнішньої сили відбувається деформація провідників як в напрямку дії сили, так й в поперечному їй напрямку.

Тензоефект різних матеріалів характеризується коефіцієнтом тензочутливості, який можна виразити як

$$k_T = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L}, \quad (6.1)$$

де $\varepsilon_R = \Delta R / R$ - відносна зміна опору провідника, $\varepsilon_L = \Delta l / l$ - відносна зміна довжини провідника.

Значення коефіцієнта тензочутливості для металів, що застосовуються в тензорезисторах, близько до 2.

Статична характеристика дрових тензорезисторів визначається виразом:

$$\Delta R = k_T R \varepsilon_L = k_T \frac{\rho}{S} \Delta l, \quad (6.2)$$

де ρ питомий опір матеріалу дроту, S - його перетин.

Для підвищення чутливості тензорезисторів для їх виготовлення обирають матеріали з високим коефіцієнтом тензочутливості, великим питомим опором, крім того їх роблять з малим перетином. Найбільш широке застосування в тензорезисторах знайшов константан. Цей матеріал має невеликий температурний коефіцієнт опору, що знижує погрішність, яка викликана коливаннями температури. В таких тензорезисторах зберігається лінійна залежність між відносною деформацією і зміною опору. Для роботи при підвищених температурах доцільно використовувати тензорезистори з ніхрому.

Як було сказано вище, провідникові тензорезистори поділяють на дрові та фольгові. Конструктивне виконання обох типів може бути різним.

У загальному випадку дротяний тензорезистор (рисунок 6.6, а) представляє собою тонкий тензочутливий дріт, укладений зигзагоподібно між двома електроізоляційними підкладками. До кінців дроту приєднуються вивідні кінці. Для виготовлення тензорезисторів застосовують дріт діаметром 0,01 ... 0,05 мм. Електроізоляційні підкладки виконують з цигаркового паперу, лакової плівки або цементу, скріплюються клеєм або лаком. Зигзагоподібну частину тензорезистора називають решіткою, а його поздовжній розмір - базою. Дротові тензорезистори володіють опором 10 .. 0,1000 Ом і мають розміри 2 ... 100 мм.

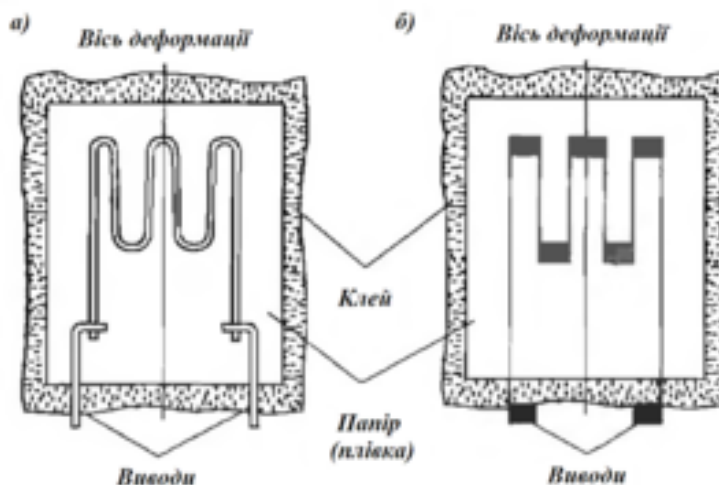


Рисунок 6.6 – Дротяний (а) та фольговий (б) тензорезистори

Фольгові тензорезистори (рисунок 6.6, б) в принципі аналогічні дротяним. Решітка виконується з фольги товщиною 0,004 мм 0,012 Ця решітка закріплюється між плівками з лаку. Фотохімічний спосіб виготовлення таких тензорезисторів дозволяє створити будь-який малюнок решітки, що є суттєвою перевагою фольгових тензорезисторів. Максимальний струм через тензорезистор обмежується допустимою потужністю, яка залежить від площі охолоджувальної поверхні.

У порівнянні з дротяними фольгові тензорезистори мають велику площу поперечного перерізу провідника при однакових розмірах резистора, тому вони можуть пропускати більший струм. Максимальна сила струму в провідникових тензорезисторах досягає декількох десятків міліампер.

У датчиках тиску з тензорезисторними перетворювачами тензорезистори наклеюються на пружні чутливі елементи у вигляді ковпачків і півсфер. Під дією прикладеного тиску відбувається деформація пружного елемента, яка призводить до зміни опору тензорезистора. Для виміру деформації тензорезистор наклеюється на поверхню контрольованої частини механізму таким чином, щоб його поздовжня вісь збігалася з напрямком вимірюваної деформації.

Приєднаний до контрольованого об'єкту, тензорезистор є датчиком деформації. Властивості такого датчика залежать не тільки від самого тензорезистора, але і від якості його закріплення, що зазвичай здійснюють приклеюванням з використанням органічних речовин (які тверднуть внаслідок полімеризації).

Приклеювання тензорезисторів призводить до того, що тензорезисторні датчики являють собою датчики разової дії, тобто можуть бути використані тільки один раз і не підлягають демонтажу і повторній установці. Градування без

приклеювання тензорезистора практично неможливе. З цієї причини зазвичай грабують кілька тензорезисторів з однієї партії, здійснюючи приклеювання їх на спеціальну тарувальну балку; іншим тензорезисторам тієї ж партії присвоюють усереднені характеристики, отримані на декількох зразках.

Датчик тиску з кремнієвої діафрагмою складається з самої діафрагми і вбудованих в неї дифузійним методом п'єзорезистивних перетворювачів. Так як монокристалічний кремній має дуже гарні характеристики пружності, в такому датчику відсутня повзучість і гістерезис навіть при високому тиску.

Коефіцієнт тензочутливості кремнію у багато разів перевищує аналогічний коефіцієнт тонкого металевого провідника. Зазвичай тензорезистори включаються за схемою моста Уїтстона. Максимальна вихідна напруга таких датчиків (рисунки 6.7, 6.8) зазвичай становить кілька сотень мілівольт, тому на їх виході ставляться підсилювачі сигналів. Кремнієві резистори мають досить сильну температурну чутливість, тому завжди при розробці датчиків на їх основі необхідно передбачати кола температурної компенсації.

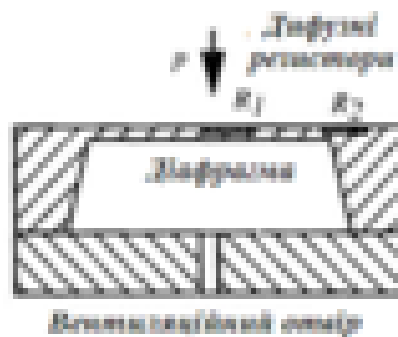


Рисунок 6.7 – Тензорезистивний датчик тиску на кремнієвій діафрагмі.

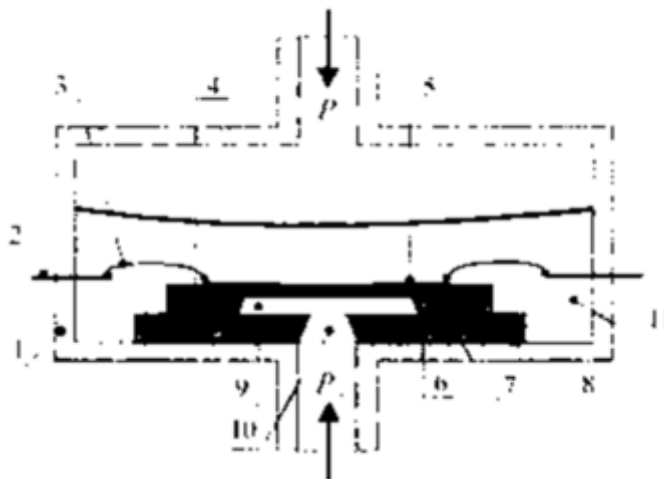


Рисунок 6.8 - Тензорезистивний датчик різниці тисків:

- 1 - корпус; 2 - електричні висновки, 3 - контактні провідники; 4 - кремнієвий чутливий елемент; 5 - тензорезистори, 6 - область з'єднання кристала і підкладки; 7 - термокомпенсаційна підкладка; 8 - область з'єднання підкладки і корпусу;
9 - підмембранна порожнина, 10 - отвір в підкладці; 11 - захисний гель

Однак, незважаючи на високу чутливість напівпровідникових тензорезисторів їх використання обмежене внаслідок нелінійності їх характеристик та труднощів термокомпенсації.

6.3.3 Датчики тиску на змінному магнітному опорі та магнітоанізотропні перетворювачі (МАП)

При вимірюванні низьких тисків переміщення тонкої пластини або діафрагми може бути невеликим. Фактично, воно може бути таким маленьким, що тензодатчик, прикріплений до діафрагми або вбудований в неї, буде видавати дуже слабкий вихідний сигнал, недостатній для подальшої його обробки.

Один з можливих способів вирішення цієї проблеми вимірювання дуже низьких тисків є застосування магнітних датчиків (рисунок 6.9).

Датчики змінного магнітного опору вимірюють зміну магнітного опору диференціального трансформатора, викликаного переміщенням магнітної діафрагми, що виникає внаслідок впливу на неї зовнішнього тиску. Принцип роботи пристрою заснований на зміні величини повітряного зазору в колі магнітопроводу у функції вимірюваного тиску.

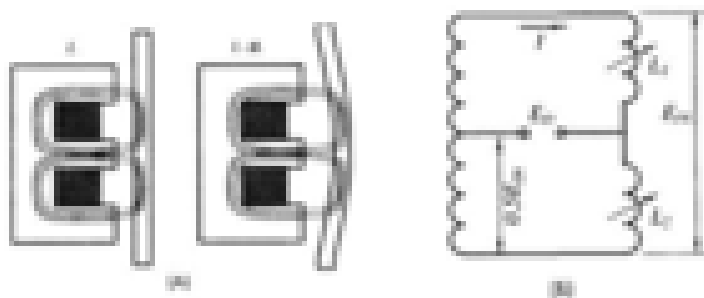


Рисунок 6.9 – Датчик тиску за магнітним опором:

А - принцип дії; Б - еквівалентна схема.

МАП представляє собою різновид магнітопружних перетворювачів, в яких використовується магнітопружний ефект. Він складається в зміні властивостей феромагнітних матеріалів під дією пружних механічних напружень. На рис. 6.10. представлена конструкція МАП.

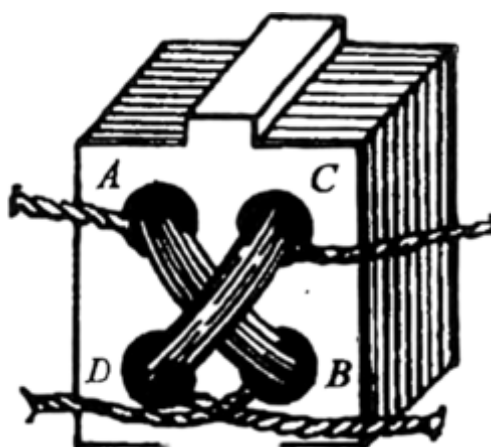


Рисунок 6.10 – Магнітоанізотропний перетворювач

Магнітопровід перетворювача являє собою пакет, набраний з пластин трансформаторного заліза. На діагоналях пакету симетрично розташовані чотири отвори. У кожній парі отворів А, В і С, О знаходиться обмотка. Обмотки розміщені

взаємно перпендикулярно. В одну з них (обмотку збудження) подається живлення з мережі змінного струму. З другої обмотки (вимірювальної) знімається вихідний сигнал. Обмотка збудження створює змінне електромагнітне поле.

При відсутності зовнішнього зусилля P магнітний потік, утворений обмоткою збудження, не перетинає витки вимірювальної обмотки, тому вихідний сигнал дорівнює нулю. При наявності зовнішнього зусилля P , внаслідок зміни магнітних властивостей магнітопроводу перетворювача, частина магнітного потоку пересікає витки вимірювальної обмотки, що викликає появу вихідного сигналу змінного струму.

На рисунку 6.11 показаний датчик тиску з магнітоанізотропним перетворювачем.

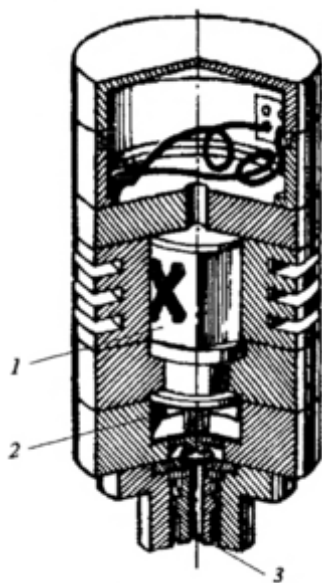


Рисунок 6.11 – Датчик тиску з МАП

Контрольований тиск по індикаторному крану надходить у внутрішню порожнину 3 датчика тиску і впливає на мембрану 2, яка стискає магнітопровід МАП 1. Стиснення магнітопроводу призводить до зміни вихідної напруги перетворювача. Такий датчик тиску призначений для вимірювання тиску до 30 МПа. Вихідна напруга МАП змінюється пропорційно тиску в циліндрі - від 0 до 100 мВ при зміні тиску від 0 до 30 МПа.

При використанні подібного датчика можна визначати наступні параметри ДВЗ : середній індикаторний тиск; максимальний тиск; індикаторну потужність; частоту обертання валу; тиск продувного повітря; тиск стиснення; тиск розширення, який відповідає куту 36° після верхньої мертвої точки; кут, що відповідає максимальному тиску відносно верхньої мертвої точки.

6.3.4 Оптиелектронні датчики тиску

Оптичні методи вимірювань мають ряд переваг над іншими способами детектування тиску: простота, низька температурна чутливість, висока роздільна здатність і висока чутливість. Особливо перспективними є оптиелектронні датчики, реалізовані на основі явища інтерференції світла. Такі перетворювачі використовують принцип вимірювання малих переміщень за допомогою інтерферометра Фабрі-Перо.

На рисунку 6.12 представлена конструкція інтерференційного датчика тиску. До складу датчика входять: кристал оптичного перетворювача тиску з діафрагмою,

світловипромінювальний діод, кристал детектора. Детектор складається з трьох фотодіодів.

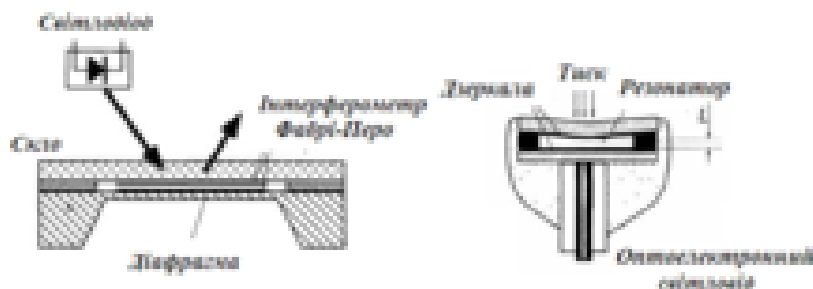


Рисунок 6.12 – Схема оптоелектронного і оптоволоконного варіантів конструктивного виконання датчиків тиску на основі використання інтерферометра Фабрі - Перо.

6.3.4 П'єзоелектричні датчики тиску

Необхідно зупинитися більш докладно на принципі дії п'єзоелектричних перетворювачів. Вони засновані на використанні п'єзоелектричного ефекту (п'єзоефекту), котрий характерний для деяких кристалів.

Розрізняють п'єзоефекти прямий і зворотний. Прямий складається в тому, що під дією механічних напруг на гранях кристала виникають електричні заряди. Зворотний п'єзоефект полягає в тому, що під дією електричного поля відбувається зміна геометричних розмірів кристала. На використанні прямого п'єзоефекту засновані перетворювачі зусиль, тисків, прискорень. Явище зворотного п'єзоефекту знайшло застосування в ультразвукових генераторах, вібраторах і т.д.

Найбільш сильно п'єзоефект проявляється у кварцу, турмаліну, а також у сегнетоелектриків: сегнетової солі, титанату барію та ін.

П'єзочутливий елемент (рисунок 6.13) вирізують з кристала кварцу. Він має форму паралелепіпеда, грані якого орієнтовані щодо осей кристала відповідним чином.

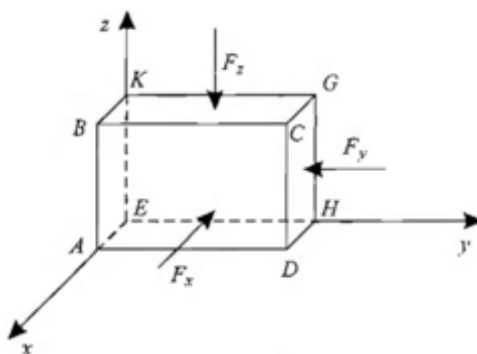


Рисунок 6.13 - П'єзочутливий елемент

При дії сили F_x уздовж електричної осі x на гранях $ABCD$ і $EFGH$, перпендикулярних осі x , виникають різнополярні електричні заряди. Величина таких зарядів q_x не залежить від геометричних розмірів елемента і визначається таким співвідношенням:

$$q_x = k_{\pi} F_x, \quad (6.3)$$

де k_{π} - п'єзомодуль матеріалу.

П'єзомодуль характеризує чутливість матеріалу і визначає величину електричного заряду, що виникає при додатку певної сили. Зміна знака прикладеної

сили призводить до зміни знака зарядів. Такий ефект називається поздовжнім п'єзоефектом. При дії сили F_y спрямованої уздовж осі y , на тих же гранях виникають також різнополярні заряди, величина котрих залежить від прикладеної сили і геометричних розмірів граней. Ця залежність виражається таким чином:

$$q_y = -k \frac{S_x}{S_y} F_y, \quad (6.4)$$

де S_x, S_y площа граней, перпендикулярних осях x, y .

Це явище відоме як поперечний п'єзоефект. При поперечному п'єзоефекті знак зарядів протилежний знаку зарядів, що виникають при поздовжньому п'єзоефекті під дією сил того ж напрямку.

При дії сили F_z уздовж осі z п'єзоефект не спостерігається.

При стисненні датчика уздовж осі y тонка кристалічна пластина легко згинається, тому явище поперечного п'єзоефекту вкрай рідко застосовується в датчиках тиску і високочутливих датчиках зусиль. Слід також зазначити, що для вимірювання зарядів потрібно підсилювач з великим входним опором.

Контрольні питання та завдання до глави 6

1. Наведіть класифікацію методів перетворення тиску.
2. Наведіть зрівняння ємнісних, тензорезистивних, п'єзоелектричних датчиків тиску.

Глава 7. ДАТЧИКИ КУТУ НЕУЗГОДЖЕНОСТІ

В судових системах автоматичного управління в якості датчиків куту неузгодженості використовують, в основному, сельсини та поворотні трансформатори.

7.1. СЕЛЬСИНИ

7.1.1 Принцип дії, класифікація, устрій

Сельсинами називаються електричні машини змінного струму, які володіють здатністю до самосинхронізації. Сельсини мають дві обмотки: збудження і синхронізації. Залежно від кількості фаз обмотки збудження розрізняють сельсини трьох- і однофазні. У судових автоматичних системах контролю і регулювання знайшли застосування однофазні сельсини.

Обмотка синхронізації виконується за типом трифазних обмоток, фази яких зсунуті в просторі на 120° відносно один одного і з'єднані між собою в зірку. Розірвані точки фаз обмотки будуть називатися початками, а замкнуті кінцями обмотки.

Однофазні сельсини за конструкцією поділяють на контактні і безконтактні.

У контактних сельсинів обмотка збудження (ОЗ) виконується зосередженою і розташовується на полюсах статора (рисунок 7.1, а) або ротора (рисунок 7.1, б).

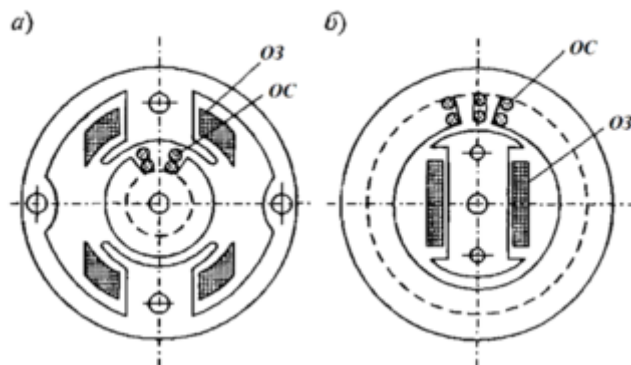


Рисунок 7.1 – Контактні сельсини: а – з обмоткою збудження на статорі;
б – з обмоткою збудження на роторі

Обмотка синхронізації (ОС) контактного сельсина виконується розподіленою і, в залежності від розміщення обмотки збудження, розміщується на роторі або статорі.

Безконтактний сельсин має також дві обмотки: збудження і синхронізації. На рисунку 7.2 показане магнітне коло безконтактного сельсина.

Трифазна обмотка синхронізації 6 розташована в пазах статора 4. Однофазна обмотка збудження складається з двох кільцеобразних котушок 2, що охоплюють ротор 5. Котушки розміщені між статором 4 і кільцевими сердечниками 1, до яких примикають стрижні зовнішнього магнітопроводу 3. Котушки 2 з'єднані між собою послідовно. Статор 4, кільцеві сердечники і стрижні зовнішнього магнітопроводу набираються з листової електротехнічної сталі. Ротор 5 складається з двох пакетів, набраних з листової електротехнічної сталі і розділених між собою немагнітним проміжком.

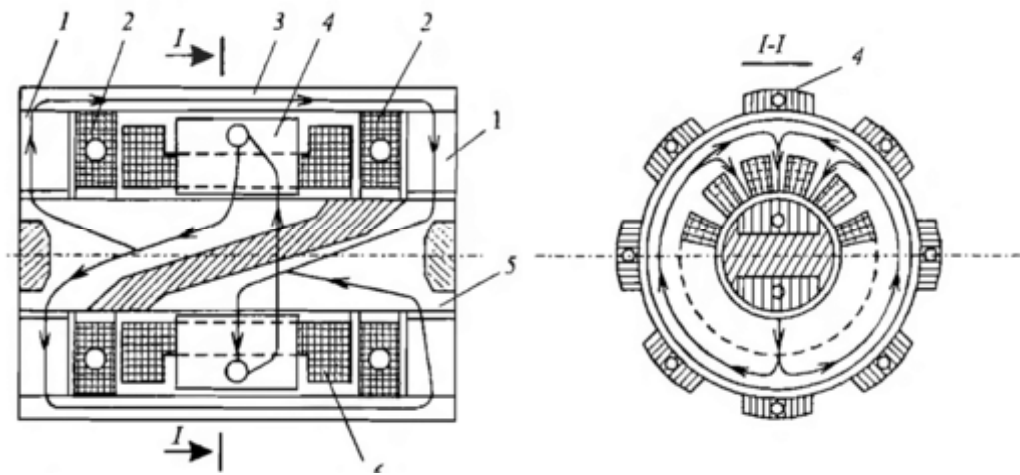


Рисунок 7.2 – Безконтактний сельсин

7.1.2 Режими роботи

В автоматичних системах сельсини зазвичай використовуються в парі: сельсин-датчик (СД) і сельсин-приймач (СП). Розрізняють два основні режими роботи сельсинів: індикаторний і трансформаторний. Для обох режимів застосовують наступні схеми включення: парну (СД-СП) і багаторазову (СД- кілька СП).

Однофазні сельсини в обох режимах роботи можуть бути використані як у якості СД, так і в якості СП; однак з урахуванням специфічних вимог випускаються сельсини, що призначені для роботи в якості лише одного з варіантів.

У суднових автоматичних системах регулювання іноді зустрічається і одиночний режим роботи.

Індикаторний режим. Цей режим роботи сельсинів використовується для дистанційної передачі кутових переміщень при незначній величині моменту опору. У суднових автоматичних системах контролю індикаторний режим здійснюється в машинних телеграфу, показниках положення пера керма, показниках напрямку обертання і навантаження головних суднових дизелів, репітера гірокомпаса.

На рисунку 7.3 показана найпростіша схема включення сельсинів в індикаторному режимі.

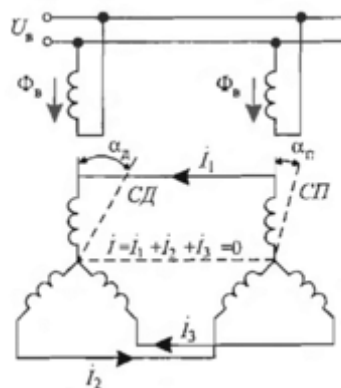


Рисунок 7.3 – Схема включення однофазних сельсинів в індикаторному режимі

Схема складається з двох однакових сельсинів (приймача і датчика) і лінії зв'язку. Обмотки збудження приймача і датчика підключені до мережі змінного струму, а обмотки синхронізації з'єднані між собою лінією зв'язку. При протіканні

змінного струму в обмотках збудження СД і СП в них створюється змінний магнітний потік Φ_v , який наводить ЕРС взаємоіндукції в обмотках синхронізації сельсинів. При рівності кутів повороту роторів СД (α_d) і СП (α_n) ЕРС в їх обмотках синхронізації врівноважують одна іншу, і струми в лініях зв'язку не протікають.

При наявності неузгодженості роторів СД і СП в лініях зв'язку виникають зрівняльні струми. Ці струми проходять по фазах обмоток синхронізації сельсинів і створюють результуючі магніторушійної сили (МРС) і, отже, магнітні потоки. Взаємодіючи з потоками обмоток збудження, ці магнітні потоки викликають появу обертових моментів, званих синхронізуючими. Синхронізуючі моменти в СД і СП направлені в різні боки, що пов'язано з різними напрямками зрівняльних струмів в однойменних фазах СД і СП. Якщо у фазі обмотки синхронізації СД струм протікає від початку до кінця, то в той же момент часу у фазі СП - від кінця до початку.

Синхронізуючий момент СД прагне повернути ротор СД у вихідне положення, а синхронізуючий момент СП намагається повернути ротор СП в бік повороту ротора СД. Ротор СД пов'язаний з задаючою віссю і після повороту залишається в фіксованому положенні. Тому під дією синхронізуючого моменту буде повертатися ротор СП - до тих пір, поки не прийде в узгоджене становище з ротором СД.

Трансформаторний режим. Цей режим роботи сельсинів застосовується для дистанційної передачі кутових переміщень при значному моменті опору.

На рисунку 7.4 представлена схема слідкуючої автоматичної системи з сельсинами, що працюють в трансформаторному режимі.

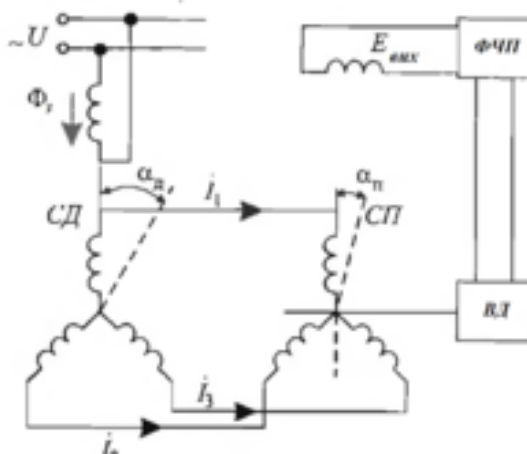


Рисунок 7.4 – Схема слідкуючої системи з однофазними сельсинами в трансформаторному режимі

Система складається з датчика-сельсина (СД) і сельсина-приймача (СП), фазочутливого підсилювача (ФЧП) і виконавчого двигуна (ВД), вал якого механічно з'єднаний з ротором СП. У трансформаторному режимі обмотка збудження датчика живиться від мережі змінного струму. Обмотки синхронізації приймача і датчика з'єднані лінією зв'язку.

З обмотки збудження СП знімається вихідний сигнал - ЕРС змінного струму, яка залежить від кута неузгодженості ($\theta = \alpha_d - \alpha_n$). Обмотка збудження СП є вихідною обмоткою пари сельсинів. Під дією змінного магнітного потоку в фазах обмотки синхронізації СД наводиться ЕРС взаємоіндукції. Обмотка синхронізації СП являє собою симетричне пасивне навантаження для обмотки синхронізації СД.

Під дією ЕРС у фазах обмоток синхронізації сельсинів будуть протікати струми. На відміну від індикаторного, в трансформаторному режимі по обмотках синхронізації СД і СП струми протікають завжди.

Результуюча МРС обмотки синхронізації СП представляє собою просторовий вектор постійної величини, який повертається в просторі на кут, рівний куту неузгодженості.

Зазвичай в автоматичних системах регулювання узгодженим становищем сельсинів в трансформаторному режимі вважають також положення, при якому ротор або статор СП зміщений на 90° щодо ротора або статора СД. У цьому випадку в вихідній обмотці СП наводиться ЕРС, що змінюється за синусоїдальним законом: $E_{вих} = E_{вихм} \sin \theta$.

Вихідна напруга подається на фазочутливий підсилювач ФЧП (див. Рис. 1.28). Знак напруги, що знімається з виходу ФЧП, залежить від фази вихідної напруги пари сельсинів. Напруга з ФЧП надходить на виконавчий двигун ВД. Виконавчий двигун, впливаючи на об'єкт регулювання, повертаючи його, одночасно повертає ротор СП у відповідну сторону. Після повороту СП на кут $\alpha_n = \alpha_d$ результуючий вектор магнітного потоку обмотки синхронізації виявиться перпендикулярним осі вихідної обмотки СП, і вихідна напруга стане рівним нулю.

За аналогічним принципом побудовані слідкуючі автоматичні системи управління суднових рульових електроприводів.

7.2. ПОВОРОТНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

7.2.1 Принцип дії, класифікація, устрій

Поворотними трансформаторами (ПТ) називаються мікромашини змінного струму, які служать для перетворення кута повороту ротора в напругу, пропорційну деяким функціям кута або самому куту.

Залежно від закону зміни вихідної напруги ПТ поділяють на два типи:

- синусно-косинусні: дозволяють отримати дві вихідні напруги, одна з яких змінюється пропорційно синусу кута повороту ротора, а друге - косінусу цього кута;
- лінійні: у них в певному діапазоні зміни кута повороту ротора вихідна напруга змінюється за законом, близькому до лінійного.

За конструкцією ПТ подібні асинхронним машинам з фазним ротором. На статорі і роторі розміщуються по дві однакові однофазні розподілені обмотки, зсунуті відносно один одного в просторі на 90° (рисунки 7.5).

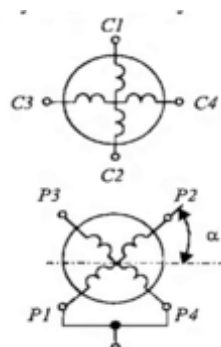


Рисунок 7.5 – Схема поворотного трансформатора

Одна з статорних обмоток С1С2, що підключається до мережі змінного струму, називається обмоткою збудження, друга - С3С4 - компенсаційною. Одна з роторних обмоток Р1Р2 називається синусною, друга - Р3Р4 - косинусною.

Статорні обмотки мають однакове число витків і однакові активні і реактивні опори. Роторні обмотки також виконуються однаковими.

Магнітну систему ПТ набирають з листової електротехнічної сталі або пермалою. Роторні обмотки приєднуються до контактних кілець. Для зменшення кількості контактних кілець кінці роторних обмоток приєднуються до одного загального кільця. У деяких випадках струмознімання здійснюється за посередництвом спіральних пружин, але при цьому ротор неможливо повернути більше, ніж на 1,8 обороту.

Набули поширення і безконтактні ПТ, в яких живлення до обмотки ротора подається за допомогою кільцевих трансформаторів, розташованих в торцевих частинах.

Основна властивість ПТ полягає в наступному: при повороті ротора взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора повинна змінюватися за строго гармонійним законом залежності від кута α . Кут α відраховується від поперечної осі ПТ до осі синусної обмотки. У багатьох випадках допустимі погрішності не повинні перевищувати 0,01%.

ПТ всіх типів виконуються з номінальною частотою не нижче 400 Гц.

7.2.2 Синусно-косинусний поворотний трансформатор

Схема синусно-косинусного поворотного трансформатора (СКПТ) представлена на рисунку 7.6.

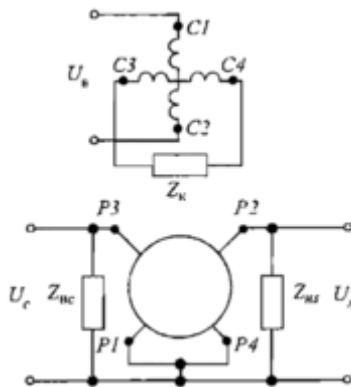


Рисунок 7.6 – Схема синусно-косинусного поворотного трансформатору

До роторних обмоток підключене зовнішнє навантаження. На виході СКПТ напруга змінюється за синусоїдальним і косинусоїдальним законам від кута повороту ротора.

З невеликою похибкою можна вважати, що $u_{\text{ВНХС}} = k u_3 \sin \alpha$; $u_{\text{ВНХС}} = k u_3 \cos \alpha$, де k - коефіцієнт трансформації СКПТ, рівний відношенню ефективної кількості витків роторної та статорної обмоток; u_3 - напруга збудження.

СКПТ в системах автоматичного управління застосовуються в слідкуючих системах.

7.2.2 Лінійний поворотний трансформатор.

Конструкція лінійного поворотного трансформатора (ЛПТ) у загальному аналогічна конструкції СКПТ. Проте за рахунок специфічного з'єднання роторних і статорних обмоток, а також вибору значень коефіцієнта трансформації, вихідна напруга змінюється за лінійним законом в діапазоні зміни кута від -55° до $+55^\circ$.

Для отримання такої залежності застосовують дві схеми ЛПТ: з первинним симетруванням і з вторинним симетруванням.

На судах знайшли застосування ЛПТ з первинним симетруванням. У схемі ЛПТ з первинним симетруванням (рисунок 7.7) обмотка збудження і косинусна обмотка з'єднані послідовно і підключені до мережі.

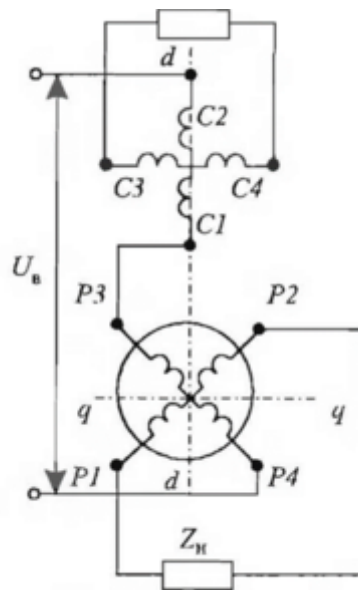


Рисунок 7.7 – Схема лінійного поворотного трансформатору

Компенсаційна обмотка замикається на резистор Z . Вихідний сигнал знімається з синусної обмотки. ЛПТ виготовляють з коефіцієнтом трансформації 0,565. Опір навантаження не впливає на умову первинного симетрування, тому такі ЛПТ можуть працювати при змінному навантаженні без спотворення лінійності вихідної характеристики.

Лінійні поворотні трансформатори, так само як і сельсини, знаходять широке застосування в стежачих системах управління, в тому числі і рульових електроприводів.

Контрольні питання та завдання до глави 7

1. Що таке сельсини та поворотні трансформатори?
2. Як сельсини і поворотні трансформатори використовуються в якості датчиків куту неузгодженості?

Глава 8. ДАТЧИКИ КРУТНОГО МОМЕНТУ

8.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Дія судових датчиків крутного моменту заснована на вимірюванні механічних напруг, що виникають на валу під дією крутного моменту, або куту закручування, що утворюється при цьому між двома перетинами валу. При прикладенні до валу крутного моменту на майданчиках, повернутих на кут 45° по відношенню до поперечного перерізу валу, виникають головні нормальні напруги розтягування і стиснення σ_p, σ_c (рисунок 8.1), рівні за значенням і протилежні за знаком.

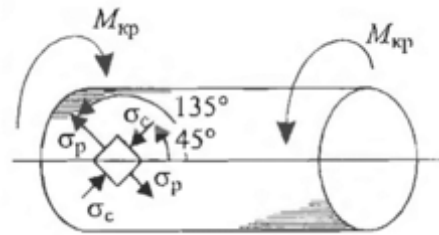


Рисунок 8.1 – Головні нормальні напруги

За абсолютним значенням вони рівні дотичним напруженням і, так само як і дотичні напруження, мають найбільше абсолютне значення на поверхні валу:

$$\sigma_H = \frac{16 M_{кр}}{\pi d^3}, \quad (8.1)$$

де σ_H - найбільше значення головного нормального напруження; $M_{кр}$ - крутний момент; d - діаметр валу.

Для порожнього валу

$$\sigma_H = \frac{16 M_{кр}}{\pi d^3 (1 - c^4)}, \quad (8.2)$$

де $c = \frac{d_0}{d}$; d_0 - внутрішній діаметр валу.

Під дією крутного моменту два перетини валу повертаються один до одного на деякий кут φ , який називається кутом закручування (рисунок 8.2) і визначається виразом:

$$\varphi = \frac{32 l M_{кр}}{\pi d^4 G}, \quad (8.3)$$

де φ - кут закручування, рад; l - відстань між перетинами; G - модуль зсуву.

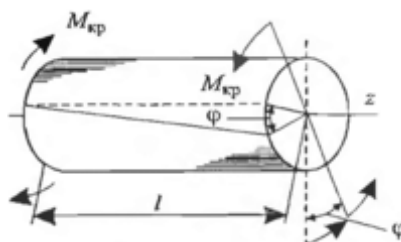


Рисунок 8.2 – Кут закручування

У суднових силових установках як чутливий елемент датчиків крутного моменту виступає гребний вал. Гребні вали характеризуються невеликими значеннями частоти обертання, малою допустимою напругою ($30\text{--}10^6$ Па) і великим крутним моментом. Тому їм властиві великий діаметр і малий кут закручування (близько 30° на довжині, рівній десяти діаметрам валу).

Спільне використання датчиків крутного моменту з датчиками частоти обертання дозволяє визначати ефективну потужність головного двигуна.

Для визначення потужності використовується залежність

$$N = \frac{2\pi n}{60} M_{кр}, \quad (8.4)$$

де $M_{кр}$ - крутний момент, Н * м; n - частота обертання, об / хв ..

Використання комп'ютерної техніки дозволяє розширити область застосування датчиків крутного моменту. На комп'ютер надходять сигнали з датчиків крутного моменту, частоти обертання, витрати і в'язкості палива, швидкості судна. Відповідно, комп'ютер видає інформацію про крутний момент, частоту обертання, ефективну потужність, енергію, витрату палива, швидкість судна, загальну витрату палива, загальне число оборотів, пройденої відстані в милях, питому витрату палива.

Комп'ютерна інформація дозволяє оцінити ефективність роботи суднової енергетичної установки.

8.2 ТЕНЗОРЕЗИСТОРНІ ДАТЧИКИ КРУТНОГО МОМЕНТУ

Для вимірювання крутного моменту тензорезистори наклеюють на поверхню валу під кутом 45° до його твірної, тобто уздовж дії головних нормальних напружень. Зазвичай використовується мостова схема з чотирма тензорезисторами, що дозволяє підвищити чутливість датчика, поліпшити лінійність його характеристики. Два тензорезистора наклеюються на одній стороні валу, ще два - на протилежній, як показано на рисунку 8.3.

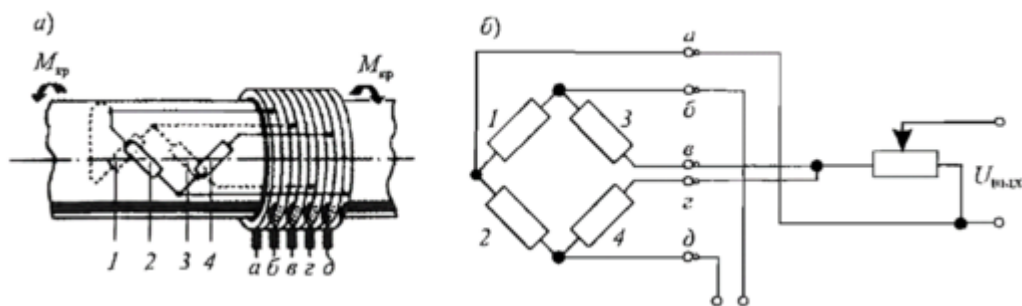


Рисунок 8.3 – Розташування тензорезисторів (а) і схема тензорезисторного датчика (б)

При такому розташуванні тензорезистори 2, 3 під дією крутного моменту будуть розтягуватися, а тензорезистори 1, 4 - стискатися; це призведе до появи вихідного сигналу з мостової схеми. Під впливом вигину розтягуватися будуть тензорезистори 2, 4, а стискуватися - тензорезистори 1, 3. Але при такій деформації тензорезисторів вихідний сигнал з мостової схеми буде дорівнювати нулю. При зміні температури відбувається одночасна зміна опорів тензорезисторів, тому вихідний сигнал і в даному випадку виявиться рівним нулю. Таким чином, мостова

схема знижує вплив деформацій, викликаних вигином, і зменшує вплив від зміни температури.

Хороша робота датчика можлива при ретельному підборі тензорезисторів, які повинні мати однакові опори і чутливості.

Тензорезисторні датчики прості за конструкцією, мають невеликі розміри. Однак для подачі живлення і зняття вихідного сигналу з мостової схеми необхідна установка струмознімальних пристроїв. Для забезпечення можливості балансування мостової схеми встановлюються п'ять кілець а ... д (див. рисунок 8.3). Наявність струмознімального пристрою - основний недолік тензорезисторних датчиків. Розглянутий датчик використовується, в основному, при випробуваннях суднових установок.

Для підвищення надійності і точності тензометричних датчиків застосовують телеметричні системи вимірювання крутного моменту. У таких системах джерело живлення і схема перетворення вихідного сигналу з тензометричного моста знаходяться на обертовому валу. В якості джерел живлення використовують або гальванічні батареї, або вторинні обмотки трансформаторів, первинні обмотки яких розташовуються близько обертовому валу. У телеметричних системах застосовують частотну модуляцію, при якій вихідна напруга моста перетворюється в частоту спеціального генератора. Напруга генератора зі змінною частотою подається на передавальну антену, розташовану на валу. Приймальна антена зазвичай знаходиться поруч з валом. Вона з'єднується з прийомним пристроєм, в якому здійснюється індикація прийнятого сигналу. Застосування частотної модуляції дозволяє зменшити вплив перешкод. Слід зазначити, що схеми телеметричних систем вимірювання крутного моменту досить складні.

На рисунку 8.4. показана функціональна схема датчика крутного моменту PALCO фірми VAF INSTRUMENTS.

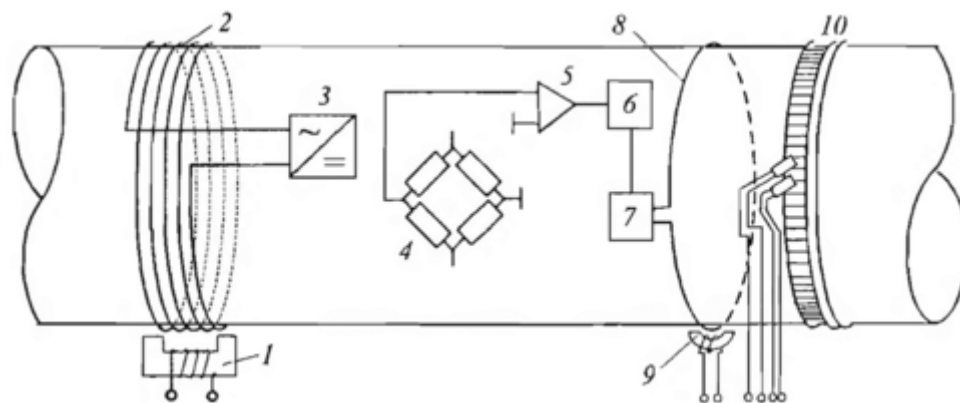


Рисунок 8.4 – Функціональна схема телеметричного датчика з тензорезисторами:

- 1 - первинна обмотка трансформатора; 2 - вторинна обмотка трансформатора; 3 - випрямляч;
4 - тензорезисторний міст; 5 - підсилювач постійного струму; 6 - перетворювач напруга / частота; 7 - підсилювач потужності; 8 - передає роторна обмотка; 9 - вихідна обмотка датчика; 10 - частотний датчик частоти обертання

Датчик складається з двох частин: статора і ротора, розташованого на валу. Електронні елементи розташовані на роторі. Між статором і ротором існує повітряний зазор, рівний 2 мм. Для подачі живлення на вал на статорі знаходиться первинна обмотка трансформатора 1. Вторинна обмотка 2 розташовується в пазах ротора.

З вторинної обмотки напруга подається на випрямляч 3. Випрямлена і стабілізована напруга використовується для живлення електронних елементів і тензорезисторних перетворювачів датчика. Вихідна напруга мостової схеми 4 тензорезисторних перетворювачів надходить на підсилювач постійного струму 5. З виходу підсилювача напруга подається на перетворювач напруга / частота 6. При нульовому значенні крутного моменту частота вихідного сигналу перетворювача дорівнює 7 кГц.

Поява крутного моменту призводить до зміни частоти вихідного сигналу перетворювача. Залежно від знака і значень крутного моменту частота змінюється до ± 4 кГц. Таким чином, під дією крутного моменту відбувається частотна модуляція вихідного сигналу тензорезисторних перетворювачів в діапазоні 7 ± 4 кГц.

Вихідний сигнал перетворювача надходить на підсилювач потужності 7, а з нього - на передавальну обмотку 8. Сигнал з роторної обмотки приймає вихідна обмотка датчика 9, розташована на статорі. Разом з датчиком крутного моменту на роторі і статорі розташовується частотний датчик частоти обертання 10, який складається з диска з зубцями, що знаходиться на роторі, і індукційного перетворювача на статорі. Частотні сигнали з датчиків крутного моменту і частоти обертання перетворюються в сигнали постійного струму ± 10 В. Погрішність датчика не перевищує $\pm 0,25\%$.

Аналогічний тензорезисторний датчик BROILICH випускає фірма Marine Electronic Engineering.

8.3 МАГНІТОПРУЖНІ ДАТЧИКИ КРУТНОГО МОМЕНТУ

У цих датчиках знайшли застосування два типи магнітопружних перетворювачів (МПП): елементні і кільцеві (в яких чутливим елементом є контрольована ділянка валу). Між полюсами магнітопроводу МПП і валом існує повітряний зазор, рівний 2 мм. В якості елементних (ЕМПП) застосовуються трансформаторні МПП.

Магнітопровід трансформаторного МПП складається з двох перпендикулярних П - подібних сердечників, на кожному полюсі яких розташовані котушки (рисунок 8.5).

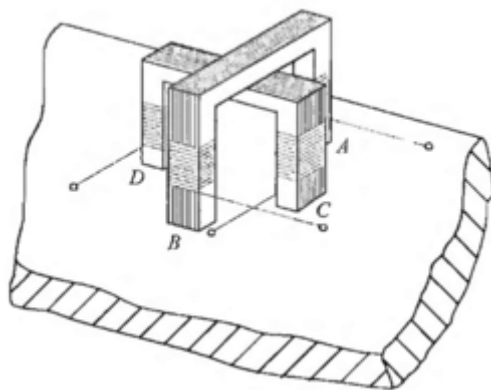


Рисунок 8.5 – Трансформаторний МПП

Розміри сердечників такі, що лінії, які з'єднують центри проекцій полюсів А, В, С, D на поверхні чутливого елемента, створюють квадрат. Котушки полюсів А і В з'єднані послідовно таким чином, щоб мало місце чергування полярності полюсів. Котушки полюсів С і D з'єднані аналогічно. Котушки полюсів А і В живляться від мережі змінного струму і утворюють обмотку збудження, що служить для створення змінного магнітного потоку. Вихідна напруга знімається з вимірювальної обмотки, створеної котушками полюсів С і D.

При відсутності зовнішніх сил, прикладених до чутливого елемента, магнітний потік, створюваний обмоткою збудження, розподіляється по поверхні чутливого елемента таким чином, що він не протікає через полюси С і D.

Прикладення зовнішніх сил до чутливого елемента приводить до спотворення розподілу магнітного потоку обмотки збудження і до протікання магнітного потоку через полюси С і D, отже, з'являється вихідна напруга змінного струму.

Магнітопровід обмотки збудження ЕМПП встановлюють по колу валу, при цьому головні нормальні напруження спрямовані під кутом 45° до лінії, що з'єднує центри проекцій полюсів магнітопроводу обмотки збуджень.

Великий недолік ЕМПП - наявність залежності вихідної напруги від магнітної неоднорідності матеріалу валу. Вона призводить до того, що вихідна напруга ЕМПП змінюється залежно від кута повороту валу при постійному значенні крутного моменту.

Кільцевий магнітопружний перетворювач (КМПП) крутного моменту являє собою єдину конструкцію, складену з елементних МПП, розташованих навколо валу. Установка КМПП крутного моменту дозволяє значно зменшити вплив магнітної неоднорідності валу і його биття.

Зовні КМПП нагадує електричну машину з явно вираженими полюсами на статорі і ділянкою валу замість ротора (риунок 8.6).

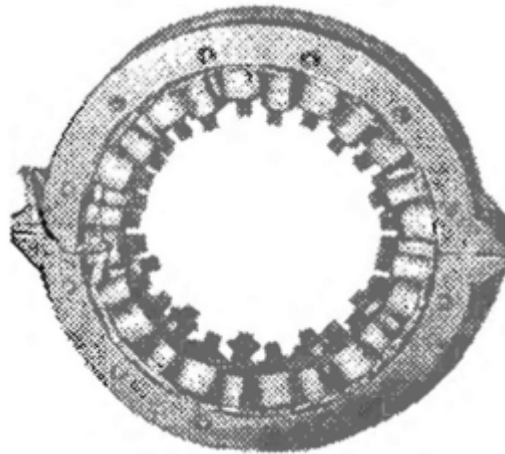


Рисунок 8.6 – Кільцевий МПП крутного моменту

Магнітопровід КМПП складається з трьох кілець, кожне з котрих має певне число полюсів, і двох кілець без полюсів. Полюси кожного кільця розташовані на однаковій відстані один від іншого, причому полюси крайніх кілець встановлені один проти одного, а полюси середнього кільця зрушені щодо них на половину відстані між полюсами.

Котушки полюсів середнього кільця утворюють обмотку збудження, котушки полюсів крайніх кілець - вимірювальну обмотку. Котушки обмотки збудження

включені послідовно таким чином, щоб дотримувалося чергування полярності полюсів. Котушки вимірювальної обмотки також включені послідовно. У полюсів вимірювальної обмотки кожного кільця дотримується чергування полярності. Протилежні полюси крайніх кілець мають різну полярність. Таке підключення котушок вимірювальної обмотки забезпечує підсумовування ЕРС котушок.

На рисунку 8.7 показана розгортка магнітопроводу КМПП, на якій штриховою лінією виділена частина, що відповідає елементному МПП.



Рисунок 8.7 – Розгортка магнітопроводу КМПП

Весь магнітопровід складається з двох рівних частин. Рознімна конструкція магнітопроводу полегшує установку перетворювача. КМПП, що складається з елементних МПП з подвоєним числом полюсів, має аналогічну конструкцію.

КМПП крутного моменту мають великі масу і габарити. Потрібно відзначити, що число пар полюсів, габарити і маса магнітопроводу КМПП залежать від заданого діаметра валу.

Датчики крутного моменту з КМУП виробляє фірма ASEA.

На рисунку 8.8 представлена функціональна схема датчика крутного моменту.

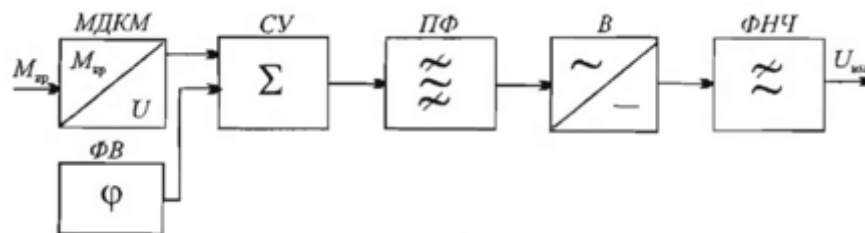


Рисунок 8.8 – Функціональна схема датчика крутного моменту

Магнітопружний датчик крутного моменту {МДКМ} складається з двох ЕМПП, розташованих під кутом 180° один відносно іншого. Установка двох ЕМПП привела до компенсації гармонійних складових, обумовлених магнітною неоднорідністю матеріалу валу. Застосування ЕМПП дозволило розробити уніфіковану конструкцію магнітопроводу, яку можливо використовувати для валів з різними діаметрами.

Вихідний сигнал МДКМ складається з наступних складових: нульового сигналу, корисного сигналу і сигналу перешкоди. Кожен із сигналів характеризується відповідною напругою змінного струму. Так само як і в КМПП, нульовий сигнал обумовлений потоками розсіювання обмоток збудження ЕМПП та магнітної асиметрією магнітопроводу.

Корисний сигнал змінюється пропорційно крутному моменту на гребному валу.

Сигнал перешкоди обумовлений магнітною неоднорідністю матеріалу валу. Наявність сигналу перешкоди призводить до зміни вихідної напруги МДКМ за один оборот валу при постійному значенні крутного моменту.

Для компенсації нульового сигналу служить фазообертач ФВ, вихідна напруга якого має дорівнювати за значенням і протилежна за фазою першій гармонійній складовій нульового сигналу.

Взаємна компенсація нульової напруги МДКМ і вихідної напруги ФВ відбувається за допомогою підсумовуючого підсилювача СУ. Для зменшення сигналу перешкоди датчик крутного моменту збирають з двох розташованих один проти одного (по діаметру гребного валу) ЕМПП. Подальше зменшення сигналу перешкоди відбувається за допомогою смугового фільтра ПФ, який виділяє складову вихідного сигналу МДКМ, пропорційну середньому крутному моменту на гребному валу. З виходу ПФ напруга надходить на випрямляч В, звідки випрямлена напруга подається на фільтр нижніх частот ФНЧ. Цей фільтр служить для виділення постійної складової, пропорційної крутному моменту.

Постійна складова випрямленої напруги подається на вимірювальний прилад, за показаннями якого можна судити про значення крутного моменту на гребному валу.

8.4 ДАТЧИКИ КРУТНОГО МОМЕНТУ З ІНДУКЦІЙНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

На рисунку 8.9 наведена схема датчика крутного моменту з індукційними перетворювачами.

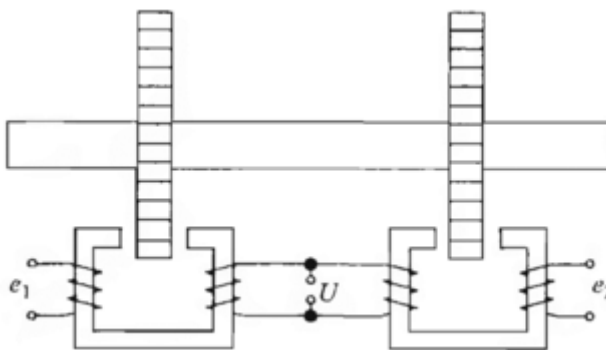


Рисунок 8.9 – Індукційний датчик крутного моменту

На валу на визначеній відстані один від іншого знаходяться однакові диски з феромагнітного матеріалу. Диски встановлені однаково відносно сердечників перетворювачів.

По колу дисків рівномірно розташовані зубці, які при обертанні валу проходять між полюсами сердечників індукційних перетворювачів.

Під час обертання валу при відсутності крутного моменту в вимірювальних обмотках індукційних перетворювачів наводяться змінні ЕРС, зсув по фазі між якими дорівнює нулю. При наявності крутного моменту один з дисків обертається щодо іншого на кут закручування φ . Тому при обертанні валу у вимірювальних обмотках перетворювачів наводяться змінні ЕРС, зі зрушенням по фазі між ними.

Інтервал часу, відповідний куту закручування валу, становить

$$t = \frac{30\varphi}{2\pi n}, \quad (8.5)$$

де n - частота обертання валу.

Частота змінної ЕРС перетворювача:

$$f_{\Pi} = \frac{Zn}{60}, \quad (8.6)$$

де Z - число зубців диска.

Час t відповідає зсуву по фазі α змінної ЕРС:

$$t = Z\varphi. \quad (8.7)$$

Таким чином, кут зсуву по фазі пропорційний числу зубців диска і куту закручування валу φ .

Якщо вимірювальні обмотки перетворювачі включити між собою послідовно, то вихідна напруга буде дорівнює різниці наведених в них ЕРС e_1, e_2 :

$$u_{\text{ВНХ}} = e_1 - e_2. \quad (8.8)$$

При синусоїдальній формі ЕРС:

$$u_{\text{ВНХ}} = 2E_m \sin \frac{\alpha}{2} \cos \left(\omega_{\Pi} t - \frac{\alpha}{2} \right), \quad (8.9)$$

де $\omega_{\Pi} = 2\pi f_{\Pi}$.

При малих α

$$u_{\text{ВНХ}} = E_m \cos \left(\omega_{\Pi} t - \frac{\alpha}{2} \right). \quad (8.10)$$

Змінні ЕРС зазвичай містять вищі гармоніки, котрі вносять велику погрішність при описаному простому способі вимірювання. Для зменшення похибки застосовують більш складну схему, представлену на рисунку 8.10.

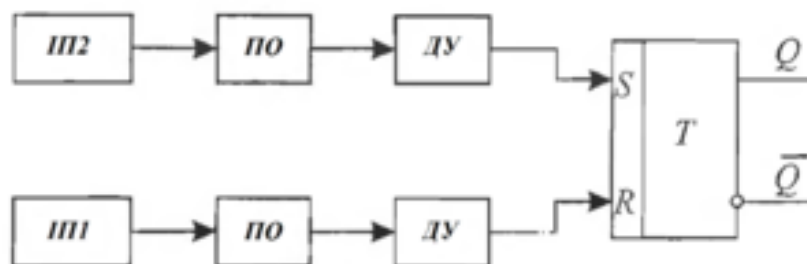


Рисунок 8.10 – Схема вимірювання крутного моменту

ЕРС індукційних перетворювачів ІІІ1 і ІІІ2 подаються на підсилювачі-обмежувачі ПО, що перетворюють довільну форму ЕРС в прямокутну. Напруження прямокутної форми з ПО подаються на диференційні устрої ДУ, з виходу яких короточасні імпульси надходять на входи **RS**-тригера. При роботі датчика на одному з виходів тригера з'являються прямокутні імпульси, тривалість яких, у відповідності з виразом (8.5), змінюється пропорційно куту валу закручування. Середнє значення напруги прямокутних імпульсів становить

$$u_{\text{CP}} = A t_{\Pi} f_{\Pi}, \quad (8.11)$$

де A - амплітуда імпульсу.

З урахуванням виразів (8.5), (8.6) можна знайти

$$u_{\text{CP}} = A \frac{Z\varphi}{2\pi}. \quad (8.12)$$

При постійній амплітуді прямокутних імпульсів отримаємо $u_{\text{CP}} = k\varphi$, де $k = ZA/(2\pi)$.

Таким чином, середнє значення напруги змінюється пропорційне куту φ , і, отже, крутному моменту.

Датчики крутного моменту з індукційними перетворювачами випускає фірма FURUNO Electric Co. У датчику FURUNO застосовані два індукційних перетворювача з постійними магнітами. Перетворювачі розташовуються на відстані понад 2,5 м один від іншого.

8.5 ДАТЧИКИ КРУТНОГО МОМЕНТУ З ІНДУКЦІЙНИМ РЕДУКТОСИНОМ

Схема роботи такого датчика показана на рисунку 8.11.

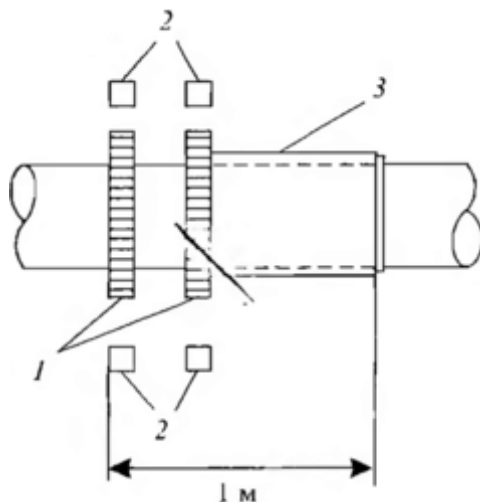


Рисунок 8.11 – Датчик крутного моменту з індукційним редуктосином

Датчик складається з двох зубчастих коліс 1. Одне з них встановлено на валу, друге - на трубі 3, яка кріпиться до валу на певній відстані від першого колеса. Відстань між перетинами валу складає 1 м.

На кожному з зубчастих коліс розташовуються по два зубчасті сектори 2. На кожному секторі є три обмотки. Одна з обмоток живиться від мережі змінного струму, а з інших двох знімаються вихідні сигнали. Зубцювате колесо з секторами працює в режимі індукційного редуктосина - багатополюсного синусно-косинусного трансформатора. Такий трансформатор має три обмотки: обмотку збудження, синусну і косинусну обмотки.

Напруги синусної і косинусної обмоток: $u_s = u_m Z \alpha \sin \omega_0 t$; $u_c = u_m Z \alpha \cos \omega_0 t$

Вихідну напругу зубчастих секторів другого колеса можна виразити таким чином: $u_{вих2} = u_{мд} \sin[(\omega_0 + \omega_d)t \pm \beta - 45^\circ]$, де знак (-) відповідає позитивному значенню крутного моменту, а (+) - негативного.

Функціональна схема датчика представлена на рисунку 8.12.

Гармонійні напруги подаються на фільтри верхніх частот $Z1, Z2$, з виходу яких напруги надходять на підсилювачі-обмежувачі, де відбувається перетворення синусоїдальної форми сигналів в прямокутну. Зміна знаку прямокутних коливань відбувається при переході синусоїдальних напруг через нульові значення.

З підсилювачів прямокутний різнополярні імпульси поступають на логічну схему "виключає АБО". З виходу логічної схеми сигнал подається на фільтр нижніх частот Z3.

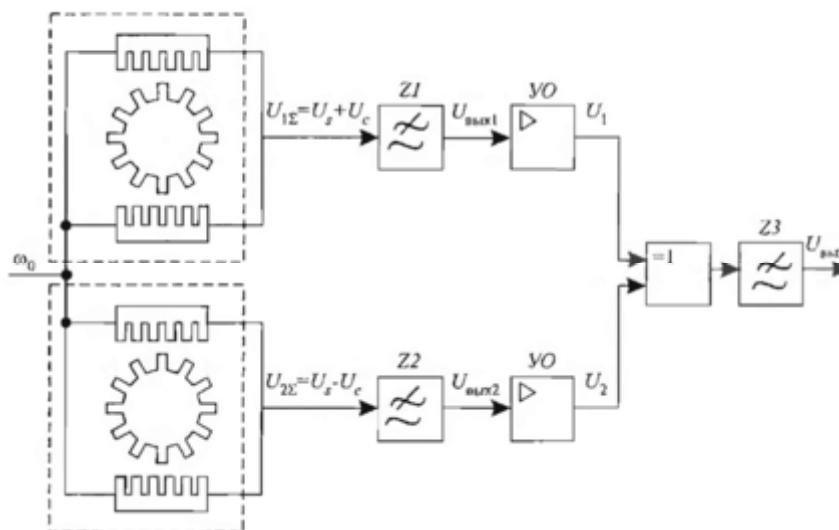


Рисунок 8.12 – Функціональна схема датчика з індукційним редуктосином

При $M_{кр} = 0$ на виході логічної схеми виходять різнополярні імпульси рівної тривалості, тому їх постійна складова з виходу Z3 дорівнює нулю.

При $M_{кр} \neq 0$ на виході логічної схеми виходять несиметричні різнополярні імпульси. Якщо $M_{кр} > 0$, тривалість позитивних імпульсів більше тривалості негативних, тому постійна складова різнополярних імпульсів більше нуля. При $M_{кр} < 0$ тривалість негативних імпульсів стає більше тривалості позитивних, тому постійна складова різнополярних імпульсів менше нуля.

Різниця між позитивними і негативними імпульсами змінюється пропорційне зсуву по фазі p . Тому постійна складова прямокутних імпульсів на виході фільтра нижніх частот змінюється пропорційне вимірюваному крутному моменту.

Похибка такого датчика не перевищує 0,3%.

Датчики крутного моменту з індукційним редуктосином випускає фірма Jungner Instrument.

Контрольні питання та завдання до глави 8

1. Наведіть класифікацію датчиків крутного моменту.

Глава 9. ДАТЧИКИ РІВНЯ

За характером вихідного сигналу датчики рівня можна поділити на дві групи : сигналізатори рівня та рівноміри.

Сигналізатори рівня фіксують одне або декілька заданих значень рівня. Рівноміри здійснюють безперервне вимірювання рівня в заданому діапазоні.

9.1 ПОПЛАВКОВІ ДАТЧИКИ РІВНЯ

У поплавкових датчиках в якості чутливого елемента виступає поплавок. Рівень занурення поплавця і його підйомна сила для однієї і тієї ж рідини залишаються постійними і залежать тільки від геометричних розмірів поплавця. Поплавцевим датчикам властиві такі недоліки: наявність рухомих деталей; можливість корозії тонких стінок поплавка, що приводить до його потоплення; труднощі при передачі показань.

9.1.1 Поплавковий сигналізатор рівня з магнітокерованими контактами

Показаний на рисунку 9.1 поплавокний сигналізатор рівня з магнітокерованими контактами (МКК) складається з поплавця 7, на якому знаходиться кільцеподібний магніт 2, 5 і труби, всередині якої розміщений МКК 4.

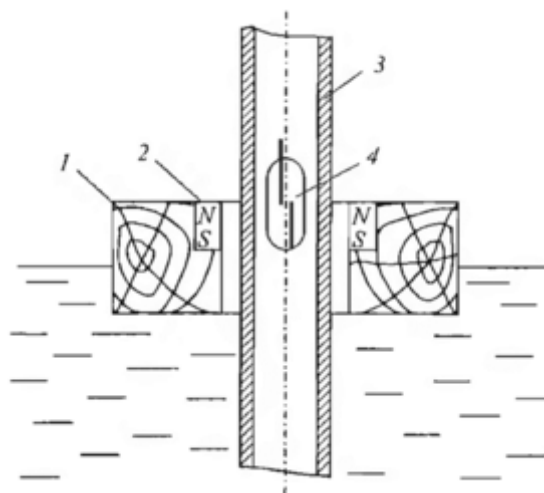


Рисунок 9.1 – Поплавковий сигналізатор рівня

Зазвичай передбачено кілька МКК, розміщених на різних рівнях. При переміщенні поплавця уздовж труби в залежності від рівня рідини відбувається замикання відповідних МКК. Замикання МКК призводить до подачі сигналу в систему контролю рівня рідини. Подібні датчики знаходять застосування в системах контролю рівня води парових котлів.

9.1.2 Електромеханічний поплавокний датчик рівня.

Схема датчика цього типу представлена на рисунку 9.2. На відміну від схеми датчика, розглянутого вище, в цьому випадку поплавок 7 переміщається за допомогою троса, що проходить через шків 2 і намотується на барабан 7. Барабан приводиться в обертання через редуктор електродвигуном постійного струму 6. Для запобігання мимовільного обертання барабана між ним і електродвигуном встановлене гальмо. Шків 2 шарнірно закріплений на важелі 3 з противагою. Противага служить для врівноваження поплавкової системи.

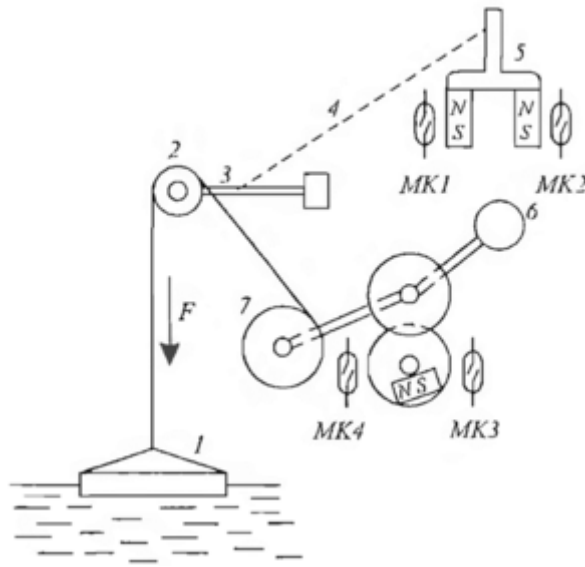


Рисунок 9.2 – Електромеханічний поплавковий датчик рівня

Принцип дії полягає в наступному. На шків 2 передається зусилля F з боку троса, яке визначається виштовхуючою силою рідини, що діє на поплавок, і вагою поплавка. Коли поплавок знаходиться на поверхні рідини важіль з балансиrom займає нейтральне положення. При зниженні рівня рідини зменшується виштовхуюча сила і, отже, зростає зусилля F . Під дією цього зусилля шків 2 опускається вниз, повертаючи важіль 3 проти годинникової стрілки. При повороті важеля 3 переміщається другий важіль 4, пов'язаний з вилкою 5. На цій вилці розташовані постійні магніти. Переміщення важеля 4 тягне за собою поворот вилки проти годинникової стрілки і замикання магнітокерованого контакту МК1, що призводить до включення електродвигуна. При обертанні електродвигуна поплавок опускається. Коли поплавок досягає поверхні рідини, з'являється виштовхуюча сила, і важіль 3 повертається в нейтральне положення, відключаючи електродвигун.

При підвищенні рівня рідини виштовхуюча сила поплавця збільшується і, отже, зменшується зусилля, що діє на шків 2. Це призводить до повороту важеля 3 за годинниковою стрілкою, що викликає поворот вилки 5, теж за годинниковою стрілкою, і замикання магнітокеровані контакту МК2. Замикання МК2 призводить до реверсу електродвигуна і піднесенню поплавка. Коли поплавок досягає поверхні рідини виштовхуюча сила зменшується, і важіль 3 повертається в нейтральне положення, відключаючи електродвигун. Таким чином, при зміні рівня рідини відбувається включення електродвигуна, який переміщує поплавок у відповідному напрямку до тих пір, поки він не досягає поверхні рідини. Інакше кажучи, за допомогою електродвигуна поплавок "стежить" за рівнем рідини.

Вимірюваний рівень визначається за кількістю оборотів барабана. Для цього на шестерінці редуктора встановлений постійний магніт, керуючий двома магнітокеровані контактами МК3 і МК4, які замикаються через кожні півоберта. Замикання контактів призводить до подачі сигналу в реверсивний лічильник, індикація стану якого дозволяє судити про рівень рідини. Розглянутий датчик призначений для вимірювання рівня рідини в танках танкерів. Він вимірює рівень до 36 м з точністю $\pm 0,5$ см. Такий датчик являє собою основну частину системи управління вантажними операціями танкера.

9.2 МЕМБРАННІ ДАТЧИКИ РІВНЯ

Ці датчики також використовуються для вимірювання рівня рідини в танках. Принцип дії мембранних датчиків заснований на властивості контрольованої рідини (як, втім, будь-який інший) чинити тиск - в даному випадку на дно танка. Гідростатичний тиск стовпа рідини p пропорційний його висоті:

$$p = \rho h, \quad (9.1)$$

де ρ - щільність рідини.

З урахуванням тиску газу (повітря) на поверхню рідини при визначенні її рівня необхідно виміряти перепад тисків

$$p = p_1 - p_2, \quad (9.2)$$

де - p_1 - сумарний тиск стовпа рідини і газу над нею; p_2 - тиск газу на поверхні рідини.

Для вимірювання тиску на судах найбільш широко використовуються мембрани, переміщення яких, пропорційне гідростатичному тиску, перетворюється в електричний сигнал. Як приклад розглянуто датчик рівня (рисунок 9.3).

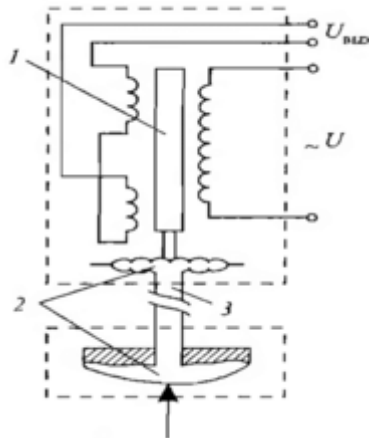


Рисунок 9.3 – Пневмoeлектричний датчик рівня

Датчик має дві мембранні коробки 2, кожна з яких складається з двох однакових: мембран, з'єднаних по периферії. Мембранні коробки пов'язані між собою капілярною трубкою 3. Під дією тиску стовпа рідини нижня мембранна коробка стискається, внаслідок чого відбувається видавлювання повітря через капілярну трубку у верхню мембранну коробку. Тиск у цій коробці підвищується, і вона розширюється. Деформація мембранної коробки відбувається до тих пір, поки тиск повітря не врівноважується силою пружності мембран.

До верхньої мембранної коробки прикріплений якорь 1 диференціально-трансформаторного перетворювача. При деформації коробки відбувається переміщення якоря, тому вихідна напруга перетворювача визначається рівнем контрольованої рідини. Верхня мембранна коробка з диференціально-трансформаторним перетворювачем знаходиться на значній відстані від нижньої коробки. Ця обставина дозволяє використовувати датчик для вимірювання рівня рідини в вибухонебезпечних приміщеннях, наприклад, в танках танкерів.

На судах зустрічаються датчики рівня, в яких деформація мембрани під дією тиску стовпа рідини перетворюється безпосередньо в електричний сигнал - за допомогою потенціометрів або диференційно-трансформаторних перетворювачів.

9.3 П'ЕЗОМЕТРИЧНІ ДАТЧИКИ РІВНЯ

Датчик рівня, в якому вимір гідростатичного тиску здійснюється шляхом вимірювання тиску в трубці, зануреній в резервуар з рідиною (наприклад, в танк), називають п'езометричною. Також цей спосіб вимірювання називають пневматичним. Принципова схема такого датчика представлена на рисунку 9.4.

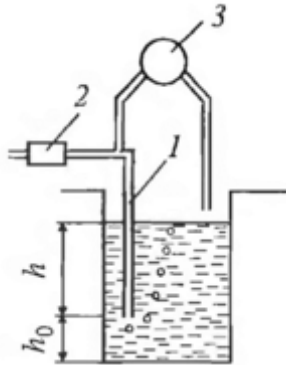


Рисунок 9.4 - П'езометричний датчик рівня

П'езометрична трубка 1 розміщується в танку з рідиною. У трубку через дросель 2, який служить для обмеження витрати повітря, надходить повітря або інертний газ. При подачі повітря тиск в п'езометричній трубці підвищується до тих пір, поки не стане рівним тиску стовпа рідини. При рівності тисків з нижнього кінця трубки починає виходити повітря. Тиск повітря в п'езометричній трубці вимірює дифманометр 3. При незмінній питомій вазі рідини тиск в трубці однозначно визначає вимірюваний рівень. Тиск, що вимірюється дифманометром, перетворюється в струмовий сигнал. Для стабілізації витрати повітря в п'езометричних рівнемірах застосовують регулятори витрати.

Подібний датчик вимірює рівень рідини в діапазоні 1 ... 30 м з похибкою 0,5% повної шкали. Витрата повітря складає 5 л на годину. Тиск повітря живлення 1 МПа.

9.4 ПОПЛАВКОВІ ДАТЧИКИ ВАЖІЛЬНОГО ТИПУ

В якості сигналізаторів рівня на судах знаходять застосування поплавкові датчики важільного типу. Принцип дії такого датчика зрозумілий з розгляду рисунку 9.5. Поплавок 1 закріплений на важелі 2. При переміщенні поплавка важіль діє на електричні контакти 3.

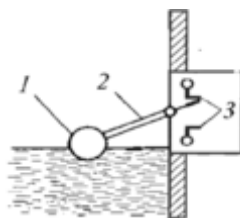


Рисунок 9.5 – Поплавковий датчик важільного типу

На рисунку 9.6 показана конструкція одного з суднових важільних датчиків - з постійним магнітом. Датчик складається з трьох основних частин (рисунк 9.6, а)

поплавка 4, 5 фланця та контактної коробки 1. Важіль 3 поплавка кріпиться до вилки 2 фланця 5.

При зміні рівня контрольованої рідини поплавок повертається в вилці фланця. За допомогою фланця відбувається герметизація стінки танка (рисунок 9.6, б).

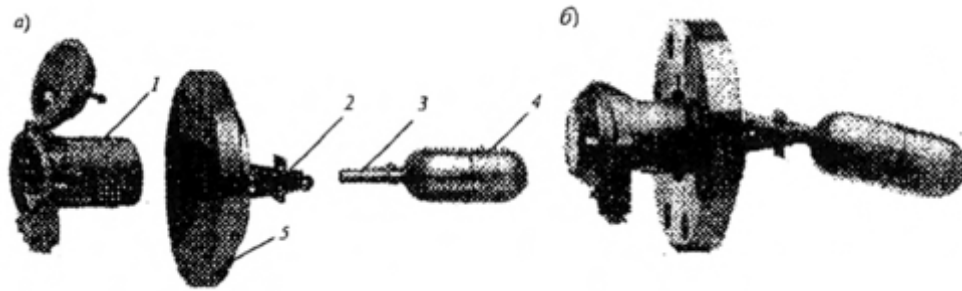


Рисунок 9.6 – Поплавковий важільний датчик з постійним магнітом

На кінці важеля поплавця 4 знаходиться постійний магніт. Такий ж постійний магніт розташовується усередині контактної коробки 1. Поворот поплавка приводить до повороту постійного магніту важеля і до відповідного повороту постійного магніту контактної коробки, що викликає комутацію її контактів. Таким чином, важільний поплавок датчик дозволяє контролювати задані значення рівня рідини.

9.5. ЄМНІСНІ ДАТЧИКИ РІВНЯ

У ємнісних датчиках рівня найбільш часто застосовуються циліндричні ємнісні перетворювачі. Ємність між двома електродами залежить від відносної діелектричної проникності середовища; значення якої для всіх діелектриків більше одиниці. Різні види палива являють собою хороші діелектрики, відносна діелектрична проникність яких знаходиться в межах від 1,97 до 2,14. Відносна діелектрична проникність води становить 81. Слід зазначити, що ємнісні датчики можуть бути використані і при вимірюванні рівня електропровідних рідин.

На рисунку 9.7, а представлена схема ємнісного датчика рівня, у якого в якості електродів використовуються дві труби.

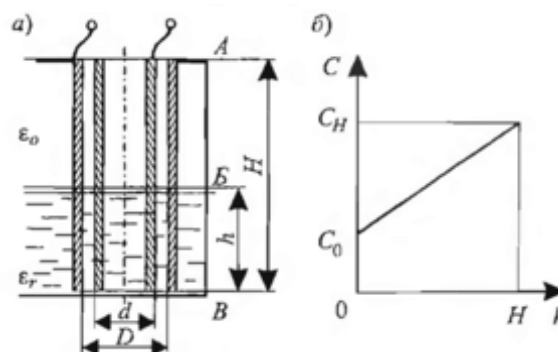


Рисунок 9.7 – Схема (а) і характеристика (б) ємнісного циліндричного датчика рівня: C_0 - ємність порожнього танка; C_H - ємність заповненого танка

Ємнісний датчик можна розглядати як два паралельно включених конденсатора з ємностями C_1 і C_2 , де C_1 - ємність між електродами на ділянці АБ. C_2 - ємність між електродами на ділянці БВ.

Ємність датчика становить:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0(H-h)}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln(D/d)} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D/d)} [H + h(\epsilon_r - 1)], \quad (9.3)$$

де H - висота танка; h - рівень рідини; D, d - внутрішній і зовнішній діаметри зовнішньої і внутрішньої труб відповідно; ϵ_0 - електрична постійна; ϵ_r - відносна діелектрична проникність.

На рисунку 9.7, 6 показана залежність ємності датчика від рівня.

Якщо цистерна або танк мають невеликі розміри, то в якості зовнішнього електрода при вимірюванні рівня непровідної рідини використовується металева стінка цистерни або танка (рисунок 9.8).

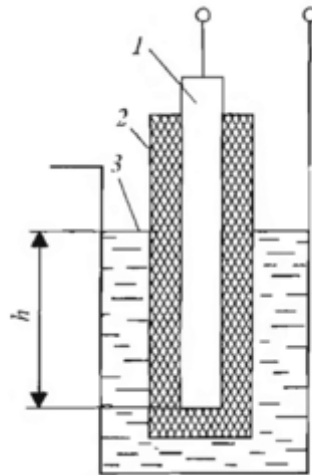


Рисунок 9.8 – Ємнісний датчик рівня

В якості внутрішнього електрода використовується металевий стрижень 1. При вимірюванні рівня 3 електропровідної рідини в якості електродів датчика виступають металевий стрижень, що має ізолююче покриття 2, і сама рідина.

Ємнісні датчики можна застосовувати для вимірювання рівня в танках складної конфігурації, тому електрод датчика можливо зробити гнучким. Взагалі ємнісні датчики мають велику чутливість, високою швидкістю, мають невеликі габарити і масу. Разом з тим, цим датчикам притаманні і певні недоліки. Ємність датчика залежить не тільки від рівня рідини, але і від діелектричної проникності, яка змінюється при коливаннях температури і вологості оточуючого середовища. Діелектрична проникність залежить від виду рідини, а також від складу домішок у ній. Тому при заповненні танка паливом іншого виду або з іншим змістом домішок показання датчика не будуть відповідати дійсному значенню рівня контрольованої рідини. Отже, в ємнісних датчиках можуть виникати великі погрішності, пов'язані з нестабільністю діелектричної проникності рідини. Крім того, на точність роботи таких датчиків впливає паразитна ємність кабельної лінії, яка з'єднує датчик зі схемою вимірювання.

9.6 ОМІЧНІ ДАТЧИКИ

Принцип дії омичних датчиків заснований на замиканні електричного кола рідиною, що володіє певним, досить малим омичним опором. Такі датчики використовуються як сигналізаторів критичного рівня рідини, оскільки безперервне вимірювання ними рівня скрутно - через коливання електричної провідності і сильного впливу опору ізоляції датчиків. При великих коливаннях електричної провідності омичні датчики налаштовують на мінімально можливе її значення. Омичні датчики можна використовувати для контролю рівня рідини з електричну провідність $2 \cdot 10^3$ см і вище.

В якості чутливих елементів датчиків виступають електроди, які являють собою металеві стрижні або труби. Спосіб і місце установки електродів залежать від розміщення і конструкції цистерни (або танка) з контрольованою рідиною. Незалежно від значення контрольованого рівня найбільш доцільна вертикальна установка електродів, при якій їх довжина може досягати 10 м. Горизонтальна установка дозволяє використовувати електроди меншої довжини, але при цьому через випадання опадів і утворення накипу виникають серйозні труднощі із забезпеченням ізоляції між електродами і стінками цистерни (танка). За умовами техніки безпеки напруга живлення датчиків не повинно перевищувати 36 В. Схема перетворення сигналу омичного датчика залежить від значення електричної провідності контрольованої рідини. При високому значенні омичний датчик включають в коло низьковольтного електромагнітного реле (рисунок 9.9).

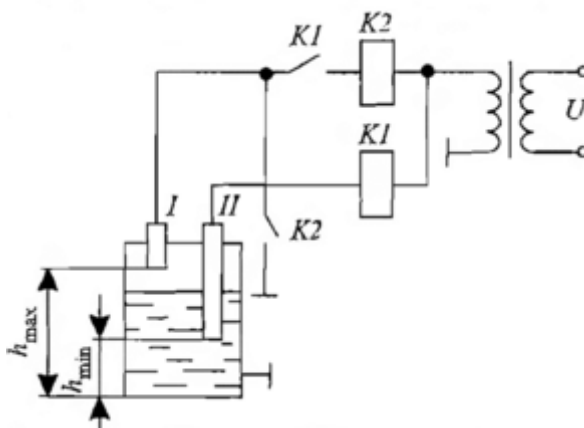


Рисунок 9.9 – Омичний датчик рівня рідини в фекальній установці

При низькій провідності вони підключаються до підсилювачів, які керують електромагнітними реле (рисунок 9.10).

На судах омичні датчики використовуються для контроль рівня рідини в танках і цистернах заборотної води, в фекальних установках, системах контролю лляльних вод.

Схема сигналізатора рівня, представлена на рисунку 9.9, використовується для контролю рівня рідини в фекальній установці.

У початковому стані при порожньому танку реле K1 і K2 знеструмлені. Заповнення танка рідиною призводить до замикання через електрод II електричного кола реле K1, яке своїм замикаючим контактом підготовляє коло живлення реле K2. При досягненні рівнем рідини електрода I спрацьовує реле K2, яке своїми контактами включає сигналізацію і дає сигнал для включення насосної установки. Зниження рівня рідини не викликає відключення реле K2, тому що воно отримує

живлення через свій контакт К2У минаючи електрод 11. Повертання системи в початковий стан відбувається оголенні електрода II.

Схема сигналізатора рівня, представлена на рисунку 9.10, використовується для контролю рівня рідини в танку з забортною водою.

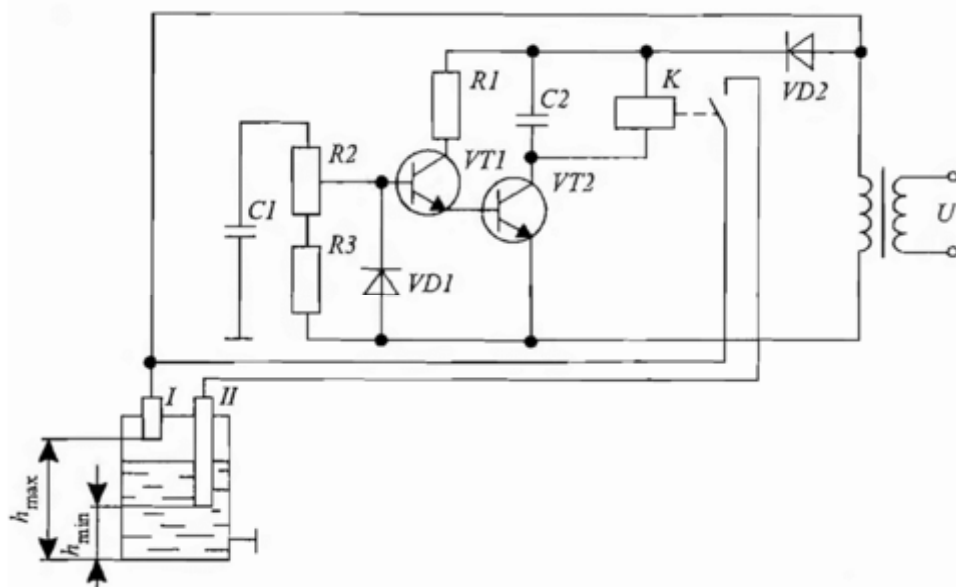


Рисунок 9.10 – Омичний датчик рівня рідини в танку з забортною водою

Омичний датчик має два електроди. У початковому стані при порожньому танку реле К знеструмлене. При досягненні рівнем рідини електрода I через цей електрод і конденсатор C1 напруга змінного струму подається на вхід напівпровідникового підсилювача на транзисторах VT1 і VT2. За допомогою діода VD1 на базу транзистора VT1 буде надходити позитивний потенціал, тому при наявності вхідного сигналу станеться відкриття транзистора VT1 і, отже, транзистора VT2, що викликає спрацювання реле К. Зниження рівня рідини не приводить до негайного відключення реле К, тому напруга змінного струму буде подаватися на вхід напівпровідникового підсилювача через електрод II і контакт реле К. Повертання системи контролю в початковий стан відбувається при оголенні електрода II.

9.7 РАДІОХВИЛЬОВІ ДАТЧИКИ РІВНЯ

Радіохвильовими називають рівноміри, принцип дії яких оснований на залежності параметрів коливань електромагнітних хвиль від висоти рівня рідини. До таких датчиків відноситься радіолокаційний рівномір, в якому використовується відбиття електромагнітних хвиль від межі розділу середовищ з різними електричними і магнітними властивостями.

Швидкість V розповсюдження електромагнітної хвилі в середовищі визначається її діелектричної ϵ та магнітної μ проникності у відповідності з

виразом: $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$, де c – швидкість світла в вакуумі.

На рисунку 9.11 показаний датчик рівня, що складається з випромінювача 1, приймача 2 електромагнітної хвилі й схеми 3 вимірювання інтервалу часу.

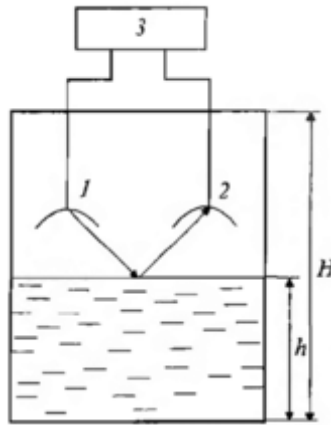


Рисунок 9.11 – Радіохвильовий датчик рівня

Значення рівня визначається вимірюванням часового інтервалу між моментом посилки сигналу випромінювача 1 та приходом відбитого сигналу на приймач 2.

Часовий інтервал можна визначити із наступного виразу

$$\Delta t = 2(H - h) \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{c}. \quad (9.4)$$

Зазвичай локація відбувається через газове середовище над рідиною, бо в даному випадку випромінювач та приймач не піддані дії рідини, а значення магнітної та діелектричної проникності газів невеликі та практично не залежать від зміни параметрів та властивостей газів.

Радіолокаційний датчик рівня **SUM – 21** виготовляє фірма **SAAB MARINE**. Цей датчик призначений для вимірювання рівня рідини в танку при тяжких умовах оточуючого середовища.

Всі елементи датчика відрізняються високою надійністю. Для вимірювання рівня використовують стрілочний прилад з автоматичним перемиканням шкали у відповідності з вимірюваним рівнем. Кожен танк має системи сигналізації про аварійний рівень.

Контрольні питання та завдання до глави 9

1. Наведіть класифікацію датчиків рівня.
2. Опишіть принцип дії датчиків рівня різних типів.

Глава 10. ДАТЧИК ПЕРЕМІЩЕННЯ РЕЙКИ ПАЛИВНИХ НАСОСІВ ДИЗЕЛЯ

У деяких системах дистанційного автоматизованого управління навантаження дизеля визначається за положенням рейки паливних насосів. У датчику переміщення використовується реверсивний індуктивний перетворювач, якір якого за допомогою важеля пов'язаний з рейкою паливних насосів. Максимальне переміщення якоря становить 80 мм.

Принципова схема такого датчика наведена на рисунку 10.1.

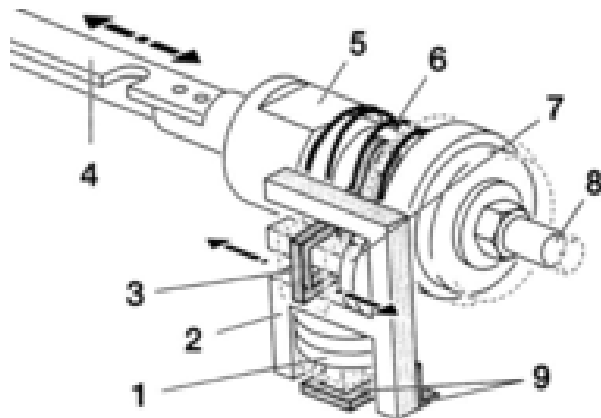


Рисунок 10.1 – Датчик положення рейки

- 1 – контрольна котушка; 2 – сердечник; 3 – короткозамкнений рухомий контур;
4 – рейка; 5 – лиска; 6 – пружина повернення; 7 – вимірювальна котушка;
8 – магнітопровід; 9 – нерухомий контур

Датчик складається з пластинчастого сталевого сердечника 2 з двома зовнішніми відкритими кінцями. На одному кінці закріплена вимірювальна котушка 7, яка живиться змінним струмом 10 кГц, на іншому кінці контрольна котушка 1. Короткозамкнений рухливий контур 3, призначений для реєстрації ходу рейки кріпиться до неї. Датчик ходу рейки з'єднаний з блоком управління.

Принцип роботи датчика полягає в тому, що короткозамкнений нерухомий контур 9, навколишній кінець сердечника, екранує змінне магнітне поле (індукцію), що виробляється контрольною котушкою 1. Поширення магнітного поля обмежується простором між котушкою і короткозамкненим кільцем. З огляду на те, що короткозамкнене рухливе кільце переміщається разом з рейкою і змінює своє положення щодо вимірювальної котушки, магнітне поле, що впливає на вимірювальну обмотку, змінюється. Коло перетворює відношення індукції вимірювальної котушки 7 до індукції контрольної котушки 1 у відношення напруг, які пропорційні ходу рейки. Величина вимірюваного напруги постійно порівнюється з напругою контрольної котушки.

Датчик інформує про поточне положення рейки з точністю 0,2 мм.

Електронний блок управління порівнює частоту обертання і інші параметри роботи двигуна з метою визначення оптимальної кількості палива, що подається (виражається як функція положення рейки). За допомогою електронного контролера порівнюється положення рейки насоса з конкретною точкою для визначення значення струму збудження соленоїда, який стискає зворотну пружину. Коли

звичайне явище обумовлено, регулюється струм збудження, забезпечуючи зміщення рейки насоса до більш точному положенню.

Контрольні питання та завдання до глави 10

1. Опишіть дію датчика положення рейки паливного насоса.

Глава 11. ДАТЧИКИ ВИТРАТИ РІДИНИ

Витратомір, як видно з назви - пристрій, призначений для вимірювання витрати певної речовини - як правило, рідини чи газу.

Слід відразу зазначити, що речовини, витрата яких необхідно виміряти, можуть бути стисливими (газ) або нестисливими (рідина), і методики вимірювання витрати в обох випадках мають свої особливості.

Незалежно від типу використовуваного пристрою визначення витрати речовини є досить складним комплексним завданням, при вирішенні якого доводиться враховувати безліч факторів, таких як:

- Фізичні характеристики досліджуваної середовища
- Фізичні характеристики навколишнього середовища
- Форма каналу і властивості матеріалу, з якого він виготовлений

До кожного датчику як правило додається набір документів, що описують технічні параметри приладу, його обмеження і рекомендації з експлуатації.

Серед досить великої різноманітності витратомірів за принципом дії можна виділити наступні основні групи:

- Датчики швидкості потоку по перепаду тиску
- Теплові витратоміри
- Ультразвукові витратоміри
- Електромагнітні витратоміри
- Мікровитратоміри
- Коріолісові витратоміри
- Витратоміри з мішенями
- Детектори зміни швидкості потоку

11.1 ТЕПЛОВІ ВИТРАТОМІРИ

В основі методу лежить досить проста ідея: якщо локально змінювати властивості речовини в потоці (наприклад, температуру) і реєструвати ці зміни на деякому віддаленні від місця впливу, можна визначити середню швидкість переміщення речовини в потоці (рисунок 11.1).

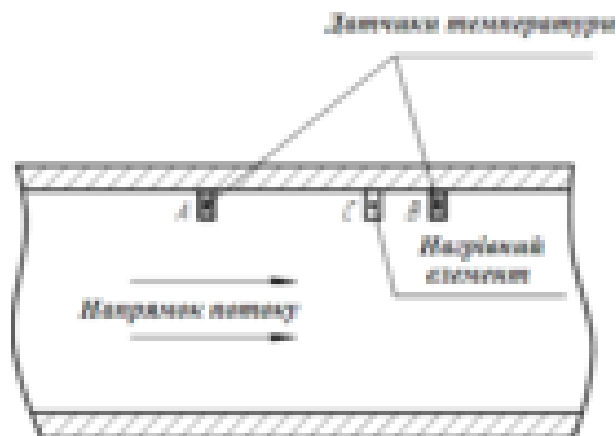


Рисунок 11.1 – Загальна схема розташування ключових елементів теплового витратоміра

Припустимо, в потоці встановлена пара датчиків температури (А і В) і один нагрівальний елемент С, причому відстані $AC > BC$. Якщо речовина нерухома, підвищення температури відбувається локально за рахунок теплопровідності, і датчик В нагрівається швидше, оскільки розташований ближче до нагрівального елемента. Якщо ж потік прийде в рух, температура в області А впаде до вихідної температури речовини в потоці, а температура в області В буде трохи вище початкової. Аналіз даних з датчиків дозволяє однозначно судити про швидкість переміщення речовини в потоці.

Подібним чином зміни можуть бути піддані і інші параметри речовини (наприклад, його хімічний склад), проте в більшості випадків це неприпустимо, наприклад, коли мова йде про медичне застосування витратомірів.

11.2 УЛЬТРАХВИЛЬОВІ ВИТРАТОМІРИ

У пристроях даного типу використовується властивість звукових хвиль змінювати швидкість свого поширення в рухомому середовищі. Якщо встановити джерело (А) і приймач (В) ультразвуку зі зміщенням (рисунок 11.2), то про швидкість потоку можна судити по зміні швидкості поширення звукової хвилі вздовж відрізка АВ.



Рисунок 11.2 – Загальна схема розташування ключових елементів ультразвукового витратоміра

11.2.1 Фазові ультразвукові витратоміри

Фазовими називають ультразвукові витратоміри, засновані на залежності фазових зсувів ультразвукових коливань, що виникають на прийомних п'єзоелементах, від різниці часів проходження цими коливаннями одного і того ж відстані по потоку рухомої рідини чи газу і проти нього.

Було запропоновано і реалізовано багато схем одно- і двоканальні фазових витратомірів. В одноканальних витратомірах великою різноманітністю відрізняються схеми перемикання п'єзоелементів з випромінювання на прийом, зокрема, схеми з одночасною посилкою коротких ультразвукових пакетів і одночасним перемиканням п'єзоелементів з випромінювання на прийом. Подібна схема застосована в одноканальному витратомірі, розробленим для вимірювання витрати суспензії поліетилену в бензині в трубі діаметром 150 мм, $Q = 180$ м / год, частота коливань 1 МГц. Кут випромінювання 22° . Наведена похибка $\pm 2\%$.

П'єзоелементи розташовані зовні труби . Електронна схема витратоміра включає в себе комутуючі пристрій; задаючий генератор; два генератора амплітудно-модульованих коливань, що надходять на п'єзоелементи; пристрій регулювання фази, що складається з підсилювача обмежувача, підсилювача потужності, реверсивного двигуна, фазообертача і фазорозщеплювача; вимірний фазометр і фазометр синхронізації, з яких кожен складається з катодного повторювача, селекторних підсилювачів, фазового детектора і схеми автоматичного регулювання посилення.

У витратомірі, розробленому для контролю нафти і нафтопродуктів, перемикання п'єзоелементів з випромінювання на прийом проводиться за допомогою мултивібратора, керуемого модуляторами задаючого генератора. Особливий генератор створює синусоїдальну напругу низької частоти, з якого в тригерному пристрої утворюються прямокутні імпульси. Задній фронт цих імпульсів служить для включення мултивібратора.

У схемі витратоміра, ультразвукові коливання частотою 2,1 МГц протягом 500 мкс поширюються назустріч один одному зі зсувом фази на 180° , після чого мултивібратор перемикає п'єзоелементи з режиму випромінювання на режим прийому. В іншому закордонному витратомірі перемикання проводиться особливим генератором, що створює сигнали двох форм. Один із сигналів включає генератор, збудливий коливання п'єзоелементів, другий сигнал перемикає п'єзоелементи на прийом. Прийняті коливання після посилення перетворюються в імпульси прямокутної форми. Після проходження через детектор зсуву фаз ширина імпульсів на виході пропорційна цьому зрушенню. На виході після випрямлення маємо напругу постійного струму, пропорційне витраті. Частота коливань 4,2 МГц, частота перемикання п'єзоелементів 4,35 кГц. Кут нахилу п'єзоелементів 300° . Діаметр труби 100 мм.

Зважаючи на складність більшості схем перемикання п'єзоелементів з випромінювання на прийом створені фазові одноканальні витратоміри, які не потребують перемикання. У таких витратомірах обидва п'єзоелементи безперервно випромінюють ультразвукові коливання двох різних, але дуже близьких частот, наприклад 6 МГц і 6,01 МГц.

Простіші електронні схеми мають двоканальні фазові витратоміри. На рис. 11.3 показана схема призначеного для вимірювання витрати рідин в трубах, що мають D , рівний 100 і 200 мм, і розрахованого на $Q_{\max}$, рівний 30; 50; 100; 200 і 300 $\text{м}^3 / \text{год}$.

Частота 1 МГц, максимальна різниця фаз (2-2,1) рад. Похибка витратоміра $\pm 2,5\%$. Генератор Г за допомогою узгоджувальних трансформаторів пов'язавши з п'єзоелементами И1 і И2. Ультразвукові коливання, що випромінюються останніми, проходять через рідинні хвилеводи 1, мембрани 3, герметично вмонтовані в стінки трубопроводу 4, проходять через вимірювану рідину 2 і потім через мембрани 5 і рідинні хвилеводи 6 надходять на прийомні п'єзоелементи П1 і П2. Останні на виході з'єднані з фазометричною схемою у складі фазорегулятора ФВ; двох однакових підсилювачів У1 і У2, керованих вузлами автоматичного регулювання АРУ1 і АРУ2; фазового детектора ФД і вимірний приладу (потенціометра) РП. Фазорегулятор ФВ призначений для регулювання початкової точки фазового детектора і коригування нуля. Наведена похибка витратоміра $\pm 2,5\%$.

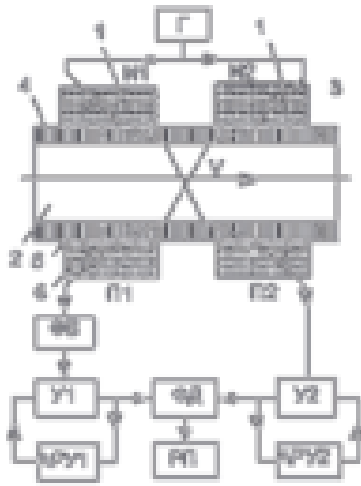


Рисунок 11.3 – Фазовий ультразвуковий витратомір

Фазові витратоміри були раніше найпоширенішими серед ультразвукових, але в даний час переважне застосування мають інші витратоміри, за допомогою яких можна отримати більш високу точність вимірювання.

11.2.2 Частотні ультразвукові витратоміри

Частотними називаються ультразвукові витратоміри, засновані на залежності різниці частот повторення коротких імпульсів або пакетів ультразвукових коливань від різниці часів проходження цими коливаннями одного і того ж відстані по потоку рухомої рідини чи газу і проти нього.

Залежно від того, вимірюються чи різниці частот пакетів ультразвукових коливань або коротких імпульсів, що проходять через рідину або газ, витратоміри називаються частотно-пакетними або частотно-імпульсними. Принципова схема останнього з двома акустичними каналами показана на рисунку 11.4.

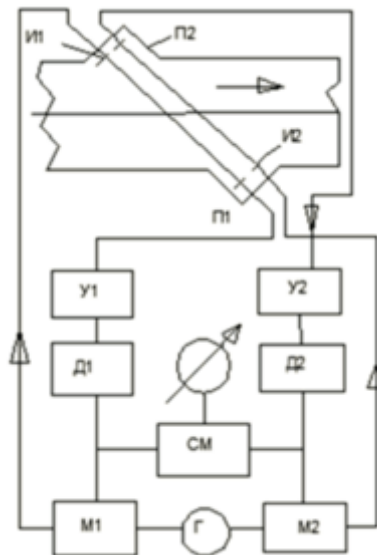


Рисунок 11.4 - Частотно-пакетний двоканальний витратомір.

Генератор Г створює коливання високої частоти (10 МГц), які після проходження через модулятори М1 і М2 надходять до п'єзоелементів П1 і П2. Як тільки перші електричні коливання, що створюються п'єзоелементами П1 і П2, пройшовши через

підсилювачі У1 і У2 і детектори Д1 і Д2, досягнуть модуляторів М1 і М2, останні, що працюють в тригерній режимі, замикають прохід коливань від генератора Г до п'єзоелементів И1 і И2. Модулятори відкриваються знову, коли останні коливання досягнуть їх. Прилад, підключений до змішувальному каскаду См, буде вимірювати різницю частот.

У частотно-імпульсних витратомірах генератор виробляє не безупинні коливання, а короткі імпульси. Останні надходять до випромінюючим п'єзоелементи з інтервалами, рівними часу проходження ультразвуку по і проти швидкості потоку. У них частоти в два рази більше, ніж у частотно-пакетних витратомірів.

Незначна різниця частот у частотних витратомірів - істотний недолік, що утруднює точне вимірювання.

Тому запропоновано декілька способів збільшення різниці частот, реалізованих в частотних витратомірах, побудованих в більшості випадків за одноканальною схемою (рисунок 11.5). До числа цих способів відноситься виділення з частот гармоніки і вимір різницевої частоти, а також множення різниці k раз перед вступом до вимірювальний пристрій. Способи множення різницевої частоти можуть бути різні.

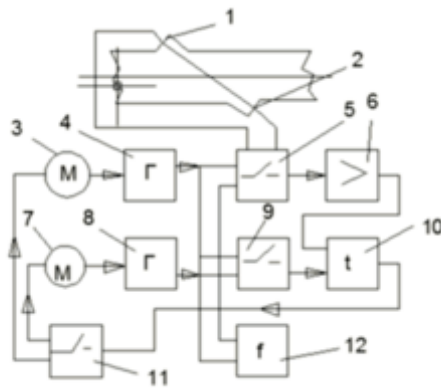


Рисунок 11.5 – Схема одноканального частотного витратоміра.

На рисунку 11.5 наведена схема, в якій вимірюється різниця частот двох керованих генераторів, періоди яких за допомогою автоматичного підстроювання частоти встановлюються в k разів меншими часу поширення ультразвукових коливань у напрямку швидкості потоку і проти неї. Перетворювач витрати одноканальний має п'єзоелементи 1 і 2, до яких по черзі надходять імпульси: до першого від генератора 4 з періодом повторення T_1 , а до другого від генератора 8 з періодом повторення T_2 . Час проходження акустичних імпульсів в трубопроводі по потоку t_1 і проти нього t_2 , в k разів більше періодів T_1 , і T_2 відповідно. Тому в потоці одночасно буде перебувати до імпульсів. При посиленні акустичних імпульсів по потоку комутатор 5 одночасно підключає п'єзоелемент 1 до генератора 4, в п'єзоелемент 2 до підсилювача прийомних сигналів 6. При зворотному посиленні імпульсів генератор 8 підключається до п'єзоелементи 2, а підсилювач 6 до п'єзоелементи 1. З виходу підсилювача 6 імпульси надходять на вхід дискримінатора часу 10, на який одночасно через комутатор 9 надходять імпульси від генератора 4 або 8, що створюють опорна напруга на дискримінаторі. Напруга на виході дискримінатора дорівнює нулю, якщо імпульси від підсилювача 6 надходять одночасно з імпульсами від генераторів. В іншому випадку на виході

дискримінатора виникне напруга, полярність якого залежить від того, випереджають Чи або відстають від опорних імпульси від підсилювача 6. Ця напруга через комутатор 11 подається через підсилювачі до реверсивним двигунам 3 або 7, які змінюють частоту імпульсів генераторів 4 і 8 до Доти поки напруга на виході дискримінатора стане рівним нулю. Різниця частот імпульсів, вироблюваних генераторами 4 і 8, вимірюється частотоміром 12. Витратоміри, аналогічні розглянутому, іноді називають частотно-часовими.

Інший шлях множення різницевої частоти полягає у вимірюванні різниці частот двох генераторів високої частоти, з яких у одного період коливань пропорційний часу проходження акустичних коливань у напрямку потоку, а в іншого - пропорційний часу проходження акустичних коливань проти потоку. Після проходження через дільник через кожні 6 мс надсилаються два імпульси, розділені часом. Перший імпульс проходить по потоку (або проти нього) і після посилення надходить на схему порівняння, куди подається також другий імпульс без проходження, через акустичний тракт. Якщо ці два імпульси надходять не одночасно, то включається пристрій, що регулює частоту одного генератора, поки на схему порівняння пам'ятати не будуть обидва імпульси одночасно. А це буде тоді, коли період цих імпульсів буде рівні. Похибка вимірювання витрати не перевищує $\pm 1\%$.

11.2.3 Час-імпульсні ультразвукові витратоміри

Час-імпульсними називаються ультразвукові витратоміри, в яких вимірюється різниця часів переміщення коротких імпульсів по напрямку потоку і проти нього на довжині шляху.

Час-імпульсні витратоміри в більшості випадків одноканальні і працюють на дуже коротких імпульсах тривалістю 0,1-0,2 мкс, що посиляються назустріч один одному по черзі або одночасно з частотою, наприклад, 0,5 кГц.

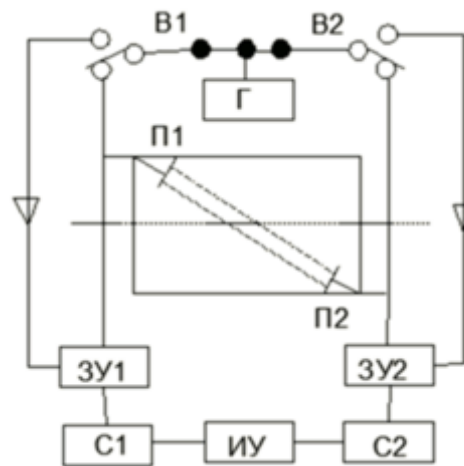


Рисунок 11.6 – Схема одноканального час-імпульсного витратоміра.

На рисунку 11.6 наведена спрощена схема одноканального час-імпульсного витратоміра. Генератор Г створює імпульси, що мають амплітуду 700 В, тривалість 0,2 мкс і частоту проходження 800 Гц, які за допомогою вібраторів В1 і В2, що працюють з частотою 400 Гц, подаються по черзі до п'єзoeлементи П1 і П2. Останні посиляють в рідину швидко затухаючі ультразвукові імпульси, а вібратори В1 і В2 включають зарядні пристрої ЗУ1 або ЗУ2. Від генератора Г одночасно надходить імпульс до п'єзoeлементи П1 і імпульс до тригера ЗУ2. встановлюючи його в

активний стан провідності. При цьому включається пристрій С2, що виробляє пилоподібну напругу протягом часу, проходження ультразвуку через вимірюваний речовину. Максимальне значення цієї напруги пропорційне часу. У момент приходу ультразвукового імпульсу до п'єзоелементи П2 пристрій С2 відключається. Таким же чином за час проходу ультразвукового імпульсу проти потоку від П2 до П1 пристрій С1 виробляє напругу, пропорційне часу. Різниця напруг вимірюється пристроєм ІУ. Такий цикл повторюється 400 разів на секунду. Загальна похибка вимірювання витрати дорівнює $\pm 0,5\%$.

В одному вітчизняному час-імпульсному витратомірі для підвищення динамічних характеристик та усунення можливості появи похибки від асиметрії на обидва п'єзоелементи одночасно подаються короткі імпульси, що збуджують ультразвукові коливання, рухомі назустріч один одному. Після досягнення ними протилежних п'єзоелементів в останніх утворюються електричні імпульси, які разом з імпульсами від генератора проходять через підсилювачі і формувачі, після чого надходять в пристрій, що виробляє напругу, пропорційну часу.

У розглянутих одноканальних частотно-імпульсних витратомірах є почергова комутація імпульсів, спрямованих по потоку і проти нього. Це вимагає точного вимірювання та запам'ятовування частот автоциркуляції імпульсів по потоку і проти нього з подальшим вимірюванням різниці. Крім того, неоднчасне зондування по потоку і проти нього може дати похибку через зміну гідродинамічних властивостей потоку.

Цих недоліків позбавлені одноканальні витратоміри в яких одночасно циркулюють ультразвукові сигнали по потоку і проти нього, які абсолютно безінерційні.

При цьому виключаються великі похибки, властиві способам запам'ятовування частот автоциркуляції ультразвукових сигналів по потоку і проти нього з подальшим виділенням сигналу різниці частот автоциркуляції, виділення сигналу різницевої частоти, заснованому на налаштуванні частот генераторів, на реверсивному рахунку імпульсів та ін. Крім того, в витратомірах передбачено автоматичне відновлення їх дії при порушенні роботи схеми внаслідок виникнення акустичної непрозорості речовини в трубі (поява газової фази, повний або частковий догляд рідини), витратоміри індують напрямок течії потоку і вимірюють витрату в обох напрямках течії потоку. Витратомір показав свою гарну працездатність в тривалій заводській експлуатації, наведена похибка витратоміра не перевищує $\pm 0,5\%$. Витратомір розроблений для динамічних вимірювань витрати палива в авіаційних двигунах, а також для вимірювання пального у вантажних автомобілях. Результати випробувань показали, що вимірювання витратоміром не змінювалися при різкому повороті потоку під кутом 90° на відстані одного діаметра умовного проходу перед перетворювачем в площині осі перетворювача і осі вузлів п'єзоелементів, т. Е. Абсолютно не потрібні довжини прямолінійних ділянок труб. Перехідна область плин у перетворювачі перебувала в початковій ділянці градувальної характеристики витратоміра. Різкого перегину або зламу характеристики в початковій ділянці не було, початкова ділянка градувальної характеристики був таким же. Прилад має дуже високу збіжність вимірювань. У різних точках діапазону вимірювань при сталому потоці повторювалися всі чотири цифри результатів двох або трьох послідовно проведених вимірювань.

11.2.4 Витратоміри на основі ефекту Допплера

Допплерівські витратоміри засновані на вимірі доплерівської різниці частот, що виникає при відображенні акустичних коливань неоднорідностями потоку. Різниця частот залежить від швидкості частинки, що відбиває акустичні коливання і швидкості поширення цих коливань.

При симетричному розташуванні випромінювального і приймального п'єзоелементів (рисунок 11.7) щодо швидкості або, що те ж, осі труби кути нахилу дорівнюють один одному.

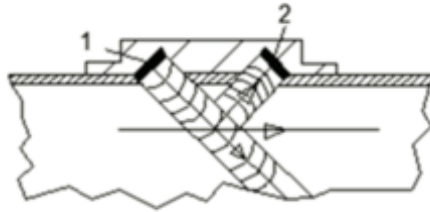


Рисунок 11.7 – Схема доплерівського перетворювача витрати (1,2 - випромінюючий і прийомний п'єзоелемент)

Таким чином, вимірювана різниця частот може служити для вимірювання швидкості частинки відбивача, тобто для вимірювання місцевої швидкості потоку. Це зближує доплерівські ультразвукові витратоміри з іншими витратомірами, заснованими на вимірі місцевої швидкості. Для їх застосування потрібно знати співвідношення між швидкістю і частинки відбивача і середньою швидкістю потік. В одній роботі розглянута можливість за допомогою доплерівського методу виміряти швидкості в ряді точок діаметрального перерізу потоку, тобто отримати профіль швидкостей. Для цього випромінювач посилає в потік акустичні імпульси тривалістю 0,1-1 мкс і частотою 15-23 кГц. Приймальний пристрій відкривається лише на мить через час затримки після посилки імпульсу. Вимірюючи час затримки, можна отримати інформацію про швидкість частинок, що знаходяться в різних точках перетину потоку.

При невеликих діаметрах труб (менше 50-100 мм) зустрічаються доплерівські витратоміри, у яких довжини випромінює і приймального п'єзоелементів рівні внутрішньому діаметру труби. Вони реагують не на одну, а на кілька місцевих швидкостей частинок, що знаходяться в діаметральної площини перетину труби. Приклад такого приладу показаний на рис. 16. п'єзоелементи з титанату барію, довжиною 20 мм, шириною 6-5 мм, частота випромінювання 5 МГц, доплерівський зсув частот порядку 15 кГц. Вимірюється речовина - одновідсоткова суспензія бетоніту, що має діаметри часток не більше 0,1 мм. Для виключення невизначеності показань в перехідній зоні п'єзоелементи в середній частині були екрановані. Завдяки цьому відношення швидкостей в ламінарної зоні різко зростає і практично стало таким же, як і у турбулентної зони, і нахил градувальної прямої став однаковим в обох зонах. Для запобігання утворення вихорів в порівняно великих кишнях, де встановлені п'єзоелементи, вільної простір у них заповнено фольгою з полістиролу, що має однакове з водою акустичний опір.

Тепер у більшості випадків п'єзоелементи у доплерівських витратомірів поміщають зовні труби. Це особливо необхідно в разі вимірювання забруднених і

абразивних речовин, але при цьому треба зважати на додатковими похибками, зумовленими, зокрема, заломленням променю в стінці труби.

У порівнянні з іншими ультразвуковими витратомірами доплерівські мають найменшу точність огляду на те, що вихідний сигнал представляє цілий спектр частот, що виникають внаслідок зсуву вихідної частоти не однією часткою - відбивачем, а поруч частинок, що мають різні швидкості. Тому відносна похибка вимірювання витрати зазвичай не менше 2-3%.

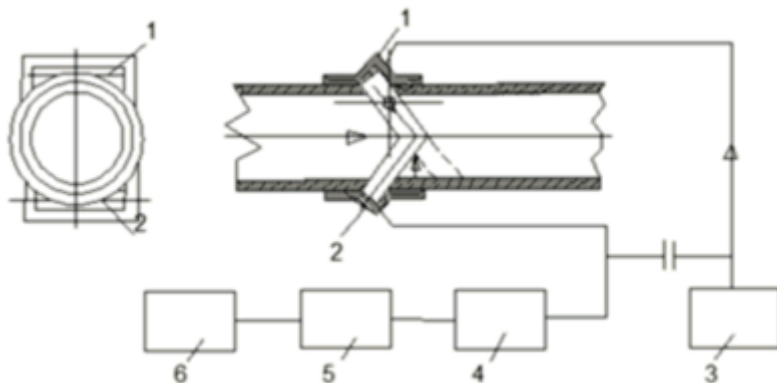


Рисунок 11.8 - Схема доплерівського витратоміра у трубі малого діаметра (1,2 - випромінюючий та прийомні п'єзоелементи; 3 - генератор коливань частотою 5 МГц; 4 - фільтр випрямляч; 5 - підсилювач; 6 - вимірювач доплерівського зсуву частот)

Доплерівські ультразвукові витратоміри знаходять все більш широке поширення. Вони застосовуються головним чином для вимірювання витрати різних гідросумішей, в тому числі пульпи, суспензій і емульсій, що містять частинки, що відрізняються по щільності від навколишньої речовини. Але й природних неоднорідностей (у тому числі газових міхурів), наявних у різних рідинах, буває достатньо для прояву ефекту Доплера. При їх відсутності рекомендується вдувати в потік повітря або газ через трубку з отворами 0,25-0,5 мм на відстані перед перетворювачем витрати. Витрата газу становить 0,005-0,1% від витрати вимірюваної речовини.

11.3 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВИТРАТОМІРИ

Принцип дії електромагнітних витратомірів заснований на законі електромагнітної індукції, відповідно до якого в електропровідній рідині, що перетинає магнітне поле, індукується ЕРС, пропорційна швидкості руху рідини. Серійні електромагнітні витратоміри призначені для вимірювання витрати рідини з електропровідністю не менше 10^{-3} См / м (відповідає електропровідності водопровідної води). Є спеціальні витратоміри, що дозволяють вимірювати витрату рідин з електропровідністю до 10^{-5} См / м. В даний час електромагнітні витратоміри це найпоширеніші прилади для вимірювання витрати води в трубопроводах діаметром менше 250 мм. Що пояснюється їх такими позитивними рисами:

- данні не залежать від в'язкості і щільності середовища;
- динамічний діапазон досягає 100 і більше;
- перетворювачі витрати є безінерційні;
- вони не мають частин, що виступають всередину труби, і, таким чином, не створюють втрати тиску;

- вплив місцевих опорів значно менше, ніж у інших витратомірів, тому необхідна довжина прямих ділянок для них мінімальна;
- електромагнітні витратоміри застосовуються на трубопроводах діаметром від 2 до 4000 мм;
- електромагнітні витратоміри можуть бути використані в ряді випадків, коли застосування витратомірів інших типів ускладнене або неможливе зовсім: при вимірюванні витрати агресивних, абразивних і в'язких рідин, пульпи, рідких металів.

До числа недоліків електромагнітних витратомірів слід віднести вимоги до мінімального значення електропровідності вимірюваної середовища, що звужує коло використання таких витратомірів. Інший недолік витратомірів - низький рівень інформативного сигналу (мкВ) і необхідність ретельного захисту перетворювача і ліній зв'язку від зовнішніх перешкод.

Вітчизняними і закордонними фірмами випускається широкий спектр мікропроцесорних електромагнітних витратомірів: МР400 (ф. «Зліт»), ПІРЕ-1 (Арзамаський приладобудівельний завод), РМ-5 (ф. «ТБН»), РОСТ 13, ТРЕМ-ПР (з-д «Блискавка»), ВІС. Т (ф. «Тепловизор»), РСМ-05 (ф. «ТЕМ-прилад»), VА 2305 (ф. Aswega), Magne W 3000 PLUS (ф. Honeywell), ІМТ96 (ф. Foxboro), АDMAD (ф. Yokogawa), SITRANS FM (ф. Siemens) та ін. Ці прилади крім цифрових показань і токового вихідного сигналу можуть мати імпульсний вихід, інтерфейси RS -232, RS-485, а в ряді випадків HART-, BRAIN- і Profibus-протоколи.

Принципова схема первинного перетворювача електромагнітного витратоміра показана на рисунку 11. 9, а.

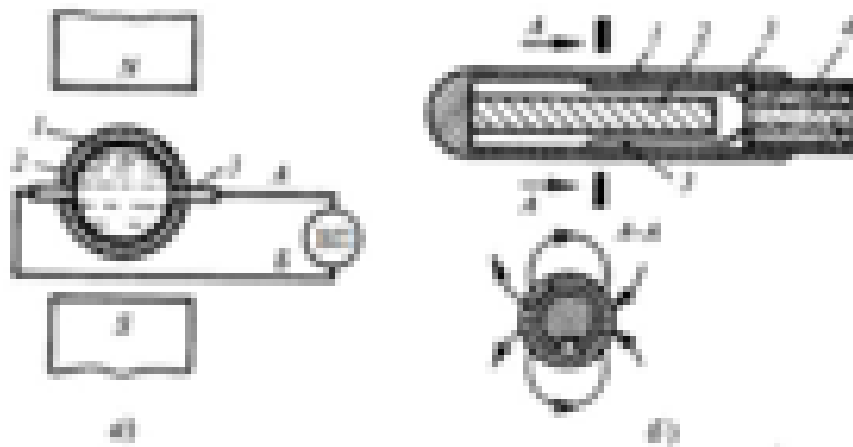


Рисунок 11.9 – Схема перетворювачів електромагнітних витратомірів:
а - із зовнішнім магнітом; 1 - перетворювач; 2 - електрична ізоляція; 3 - електроди; б - з внутрішнім магнітом; 1 - обтічний корпус; 2 - магніт; 3 - електроди; 4 – кабель

Робоча ділянка труби перетворювача 1 виготовлена з немагнітного матеріалу і покрита зсередини електричною ізоляцією 2 (гумою, емаллю, фторопластом тощо), розташована між полюсами електромагніту. Через стінку труби ізольовано від неї по діаметру введені електроди 3, що знаходяться в електричному контакті з рідиною. Силкові лінії магнітного поля спрямовані перпендикулярно площині, що проходить через вісь труби і лінію електродів.

Відповідно до закону електромагнітної індукції при симетричному відносно осі профілі швидкостей в рідині між електродами буде наводитися ЕРС.

ЕРС прямо пропорційна об'ємній витраті. Вимірювання наведеної ЕРС здійснюється вимірювальним приладом ВП.

Застосування постійних електромагнітів в витратомірах дозволяє полегшити боротьбу з перешкодами від зовнішніх електромагнітних полів, збільшити швидкодію приладу. Основним недоліком їх використання є поляризація електродів: концентрація у позитивного електрода негативних іонів, а у негативного позитивних. Внаслідок цього на поверхні електродів створюються потенціали, що утворюють ЕРС поляризації, спрямовану проти основний вимірюваної ЕРС, що змінює характеристику градування приладу і робить неможливою його стабільну роботу. Тому електромагнітні витратоміри з постійним магнітним полем не застосовуються для рідин з іонною провідністю. Широке поширення вони отримали для вимірювання витрати середовищ з електронною провідністю, наприклад розплавлених металів, в яких відсутнє явище поляризації.

Як приклад на рисунку 11.9, б представлена схема електромагнітного перетворювача швидкості з циліндровим магнітом. Основними елементами перетворювача є обтічний корпус 1, магніт 2 у формі циліндра і електроди 3. У найпростішому випадку електроди приварюються до внутрішньої поверхні корпусу в діаметрально протилежних точках і виводяться з корпусу за допомогою кабелю 4. При обтіканні перетворювача рідким металом між електродами з'являється різниця потенціалів, пропорційна швидкості металу.

Для вимірювання витрати середовищ з іонною провідністю застосовуються витратоміри зі змінним магнітним полем, створюваним електромагнітом (рисунок 11.10).

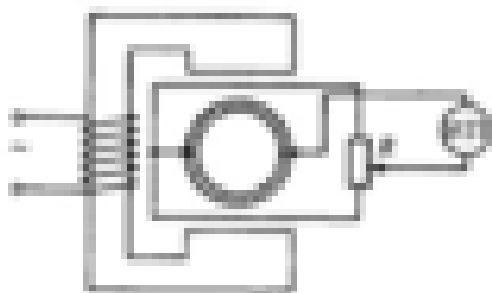


Рисунок 11.10 – Схема витратоміра з перемінним магнітним полем

При досить високій частоті поляризація електродів практично відсутня, однак використання змінного магнітного поля має свої недоліки. Найбільш серйозним з них є поява паразитної трансформаторної ЕРС E_T .

Значення E_T можна зменшити, розташовуючи дроти А і Б (див. рисунок 11.9, а) в одній площині, паралельній силовим лініям магнітного поля. Зазвичай для ослаблення впливу E_T використовується схема, представлена на рисунку 11.10. У цій схемі від одного з електродів відходять два дроти, симетрично охоплюють трубопровід з обох сторін і замикаються на резистор R. Вимірювальний прилад підключається до движку цього резистора і другого електроду. При нульовій витраті переміщенням движка резистора необхідно домогтися мінімального сигналу на вході вимірювального приладу.

Обидва описаних прийому не усувають трансформаторну ЕРС повністю. У сучасних витратомірах для її повного усунення використовується зсув по фазі на 90° між E і E_T . У цьому випадку вимірювальна схема містить два канали, один з

яких призначений для вимірювання корисного сигналу, другий-для компенсації трансформаторної ЕРС. За допомогою фазочутливого детектору по першому каналу пропускається лише інформативний сигнал, який потім вимірюється приладом. По другому каналу проходить тільки сигнал, пропорційний E_T який потім по колу негативного зворотного зв'язку надходить на вхід схеми і компенсує трансформаторну ЕРС.

Більшість перерахованих перетворювачів витрати мають зовнішнє магнітне поле. Вони випускаються на діаметри умовного проходу 2,5; 5; 10; 15; 25; 32; 40; 50; 80; 100; 150; 200; 300 мм для рідин з температурою від -40 до 180 ° С і тиском до 4 МПа. Витратоміри працюють в діапазоні швидкостей потоку 0,1 ... 10 м / с, деякі з витратомірів є двонаправленими, тобто можуть вимірювати витрату реверсних потоків. Межа основної відносної похибки загальнопромислових перетворювачів лежить в діапазоні $\pm (0,5 \dots 1)\%$.

Для живлення електромагнітів перетворювачів використовується струм змінний або однополуперіодний з частотою 5 ... 7 Гц. У деяких витратомірах на обмотки магнітів подається струм подвійний частоти 75 і 6,25 Гц (ADMAG АМ, АЕ, СА). Один з варіантів усунення ЕРС поляризації, що виникає при живленні електромагніту однополярним пульсуючим струмом, що створює магнітний потік з індукцією B , ілюструє схема на рисунок 11.11.

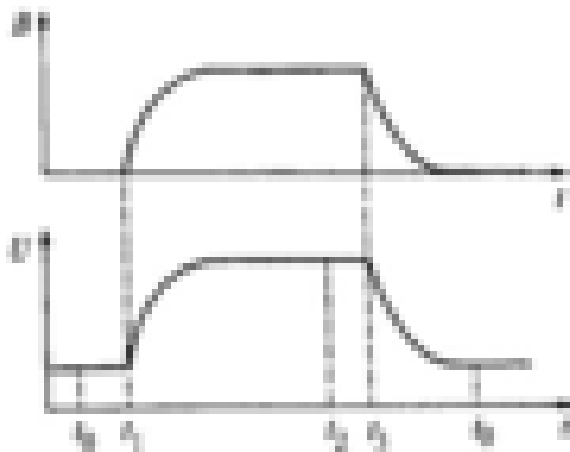


Рисунок 11.11 – Вихідний сигнал (меандр) електромагнітного перетворювача

У момент t_1 в обмотку подається імпульс струму, який припиняється в момент t_3 . У момент t_0 на електродах залишається ЕРС поляризації, оскільки цей процес є більш інерційним. Значення цієї напруги і напруги, що відповідає моменту t_2 , фіксується мікропроцесором. Різниця цих сигналів являє собою інформативний сигнал, пропорційний G_0 . При живленні електромагніту низькочастотними імпульсами струму різної полярності ЕРС поляризації для моментів, аналогічних t_0 віднімаються.

Для вимірювання витрат в трубопроводах діаметром більше 300 мм використовується метод вимірювання локальної швидкості потоку (методи і «площа-швидкість» і «площа-швидкість-градієнт»). У перетворювачах «площа-швидкість» електромагніт за допомогою штанги вводиться в потік на відстань 0,242 радіуса від стінки трубопроводу.

У цій точці при симетричному відносно осі потоці у фіксованому діапазоні витрат локальна швидкість потоку з невеликою похибкою дорівнює середній по перетину, тобто вихідний сигнал перетворювача визначається середньою швидкістю

і, отже, по (13.4) буде пов'язаний з об'ємною витратою. Сигнал перетворювачів типу «площа-швидкість-градієнт» менше залежить від асиметрії профілю швидкостей.

Схема перетворювача РМ-5-БЗ дана на рисунку 11.12.

У цих перетворювачах використовуються три вимірювача швидкості ІС, що включають локальні перетворювачі швидкості ПС та вимірювальні блоки ІБ, що утворюють вимірювальний блок ППС. Перетворювачі швидкості розташовуються рівномірно по колу, причому всі вони орієнтовані по радіусу каналу. Мікропроцесорна обробка сигналів трьох перетворювачів в вимірювально-обчислювальному блоці ІВБ-1П забезпечує вимірювання об'ємної витрати в трубопроводах діаметром до 5000 мм з відносною похибкою $\pm (1,5 \dots 2)\%$ (РМ-5-БЗ), при використанні одного перетворювача (РМ-5-Б1) похибка зростає до $\pm (2 \dots 3)\%$. Занурення ПС в трубопровід виробляється за допомогою шлюзових камер, що дозволяє проводити їх заміну та витяг без спустошення трубопроводу. Шлюзова камера відсікається від трубопроводу за допомогою кульового крана, що має прохідний отвір для штанги перетворювача. При тисках до 2 МПа три гумових кільця на штанзі перетворювача забезпечують її герметичний введення при виконанні наступної послідовності операцій: введення штанги в шлюз при закритому кульовому крані; ручне відкриття кульового крана; занурення штанги перетворювача в трубопровід. Для утримання штанги при відкритті кульового крана і подачі в шлюз тиску, а також для її занурення в трубопровід використовується спеціальне пристосування.

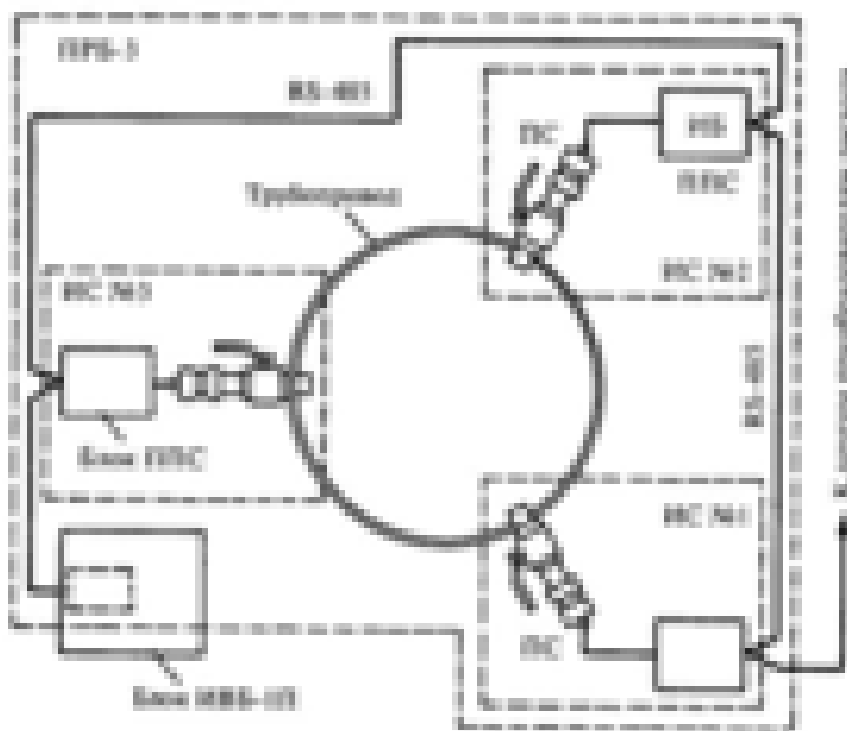


Рисунок 11.12 – Структурна схема електромагнітного витратоміра РМ-5-БЗ

11.4 КОРІОЛІСОВІ ВИТРАТОМІРИ

Витратоміри цього типу визначають масові витрати безпосередньо, а не через вимірювання швидкості чи об'єму. Робота витратоміра Коріоліса не залежить ні від тиску рідини, ні від її температури, ні від її в'язкості і густини. Тому такі датчики є універсальними і не вимагають проведення повторних калібрувань и 150

підналагодження під кожен конкретний тип рідкого середовища. Хоча перші витратоміри працювали тільки з рідинами, наступні конструкції були адаптовані і для роботи з газами.

До інших переваг вимірювання витратоміром Коріоліса слід віднести наступні:

- висока точність ($\pm 0,05\%$) та повторюваність ($\pm 0,02\%$) результатів вимірювання;
- можливість використання незалежно від напрямку потоку;
- не потрібні прямолінійні ділянки трубопроводу до і після витратоміра;
- тривалий термін служби і простота обслуговування завдяки відсутності рухомих і зношуваних частин;
- можливість вимірювання витрат середовища з високою в'язкістю;
- дозволене використання харчовій і фармацевтичній промисловості.

Основним недоліком витратомірів Коріоліса є їх порівняно висока вартість.

Коріолісовий витратомір складається з датчика витрати і електронного перетворювача.

Датчик перетворює витрату і щільність середовища, а також температуру сенсорних трубок в електричні сигнали.

Електронний перетворювач конвертує отриману від датчика інформацію в цифровий сигнал і в стандартні вихідні сигнали.

11.4.1 Вимірювання витрати

Потік рідини в датчику проходить через пару симетричних вигнутих вимірювальних трубок, що коливаються з певною частотою. Форма коливань однієї з цих трубок показана на рисунку 11.13. Трубка приводиться в рух електромагнітною котушкою, розташованою в центрі вигину трубки. Коливання трубки подібні коливанням камертона і мають амплітуду менше 1 мм і частоту в діапазоні 80 - 100 Гц.

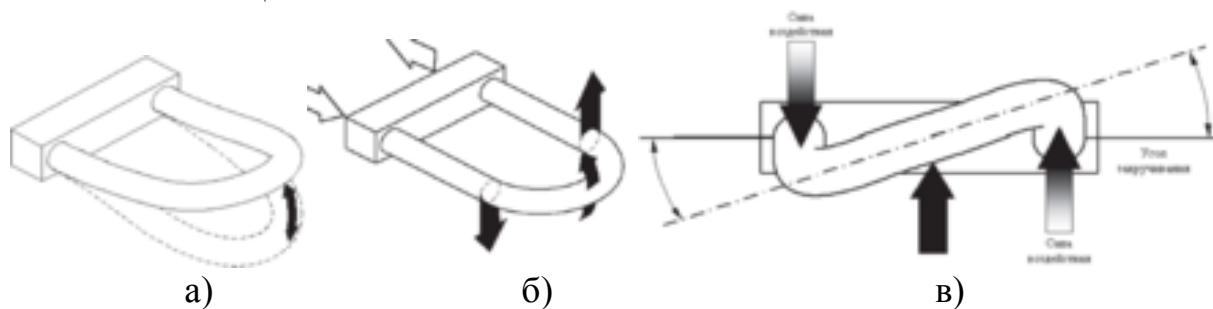


Рисунок 11.13 – Коливання трубки датчика

Вимірюваному середовищу, що проходить через трубку, надається вертикальна складова руху віброуючої трубки. При русі вгору під час першої половини циклу коливання (рисунок 11.13, б) рідина, впадає в трубку, створює опір руху вгору, далячи на трубку вниз. Поглинувши вертикальний імпульс при русі навколо вигину трубки, рідина, що випливає з трубки, чинить опір зменшенню вертикальної складової руху, штовхаючи трубку вгору (рисунок 11.13, в). Це призводить до закручування трубки. Коли трубка рухається вниз під час другої половини циклу коливання, вона закручується в протилежну сторону. Це закручування називається ефектом Коріоліса.

Виходячи з другого закону Ньютона, кут закручування трубки датчика прямо пропорційний кількості рідини, що проходить через трубку в одиницю часу.

Електромагнітні котушки-детектори, розташовані з кожного боку трубки, знімають сигнал, що відповідає коливанням трубки. Масова витрата визначається шляхом вимірювання тимчасової затримки між сигналами детекторів. При відсутності потоку закручування труби не відбувається, і між сигналами детекторів немає різниці в часі.

При наявності потоку труба закручується, при цьому виникає різниця за часом в надходженні двох сигналів по швидкості. Ця різниця в часі прямо пропорційна масовій витраті.

11.4.2 Вимірювання щільності

Власна частота коливань сенсорних трубок залежить від їх геометрії, матеріалу, конструкції і маси. Маса складається з двох частин: маси самих трубок і маси вимірюваного середовища в трубках. Для конкретного типорозміру сенсора маса трубок постійна. Оскільки маса вимірюваного середовища в трубках дорівнює добутку щільності середовища і внутрішнього обсягу, а обсяг трубок є також постійним для конкретного типорозміру, то частота коливань трубок може бути прив'язана до щільності середовища і визначена шляхом вимірювання періоду коливань.

11.5 ВИТРАТОМІРИ З МІШЕННЯМИ

Для вирішення завдання з вимірювання витрати рідин, (або газів), що містять сторонні включення або забруднення - наприклад нафти, мазуту, бітумів, і т.д., можна використовувати витратоміри так званого «мішеневого типу» (target type flowmeter).

Ці витратоміри здатні вимірювати в максимально широкому діапазоні (по в'язкості і потоку) як рідини так і гази, як чисті так і забруднені, при широкому діапазоні температур. Вони прості в установці і не вимагають додаткового обслуговування. Просто підключаються до таких систем як АСУ, моніторинг, тоталізатор і т.д. Мають краще співвідношення ціна / споживчі властивості.

11.5.1 Функціональні особливості

- висока чутливість - мінімальний потік, реєстрований витратоміром $\sim 0,08 \text{ м}^3 / \text{сек}$
- висока точність вимірювання (до $\pm 0,2\%$) потоків рідин, в т.ч. високов'язких, газів
- широкий діапазон температур
- відсутність рухомих частин, отже - висока безпека і надійність,
- мале падіння тиску на витратомірі (близько $\frac{1}{2}$ від падіння тиску на витратомірі з тарованим отвором),
- може використовуватися «сухе калібрування»
- при зміні потоку через трубу, досить змінити мішень, без повного демонтажу приладу
- виведення даних безпосередньо на витратомір, віддалена передача даних
- стійкий до впливу кислот, лугів і забруднень
- простий в монтажі та обслуговуванні

11.5.2 Принципи роботи

Витратомір мішеневого типу з цифровим дисплеєм використовує сучасні цифрові технології, поєднані з сучасними високотехнологічними датчиками. Він поєднує точність об'ємних витратомірів і високий ресурс, обумовлений відсутністю

рухомих частин в конструкції (рисунок 11.14)

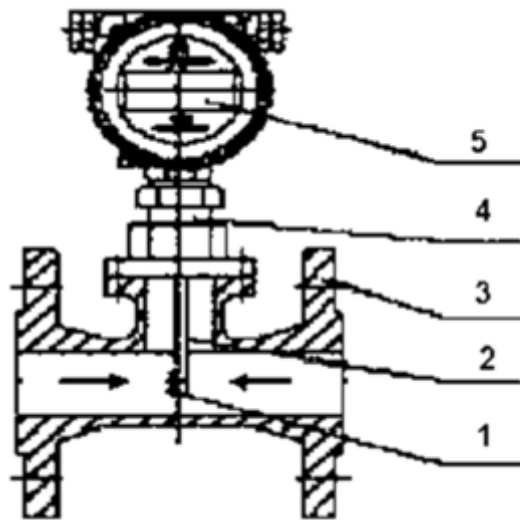


Рис. 11.14 – Витратомір з мішенню:

1. Елемент, що піддається силовому впливу (пластина мішені);
2. Чутливий елемент (включаючи датчики температури і тиску);
3. Корпус вимірювальної труби (може бути відсутнім в витратомірі вставного типу);
4. Перехідники;
5. Підсумовуючий лічильник з дисплеєм і виходами

Пластина мішені поміщена в центр труби і з'єднана з перетворювачем сигналу жорстким стрижнем. Середовище (рідина або газ) діє на мішень з певним зусиллям, яке пропорційне потоку.

Після відповідних перетворень і обчислень значення цієї сили, ми можемо отримати значення потоку. Величина цієї сили перетворюється в електричний сигнал, який після обробки і посилення надходить в підсумовуючий лічильник і ми отримуємо значення як поточного потоку, так і пройшов через витратомір об'єму, що пройшов через витратомір.

Для кожного типу середовищ випускаються витратоміри різних серій, для низької / нормальної / високої / надвисокої температур.

Для застосування даного виду вимірювання (витратомірів) необхідне дотримання певних умов:

- 1) Нормалізація потоку - необхідні прямі ділянки труби без вигинів, звужень, клапанів і т.д. - До витратоміра - не менше 10 діаметрів, після витратоміра - не менше 5 діаметрів трубопроводу.
- 2) Горизонтальна установка витратоміра. За спеціальним запитом можливе виконання в вертикальній ділянці труби.
- 3) Існує пряма залежність точності вимірювання витратоміром від діапазону витрат.

Це актуально для рідин з числом Рейнольдса $Re \leq 1500$.

Обмеження максимальної довготривалої швидкості середовища в трубопроводі:

- для рідини $V_{срж} = 5$ м / сек
- для газу $V_{срг} = 30$ м / сек
- для пара $V_{срп} = 50$ м / сек

Ця швидкість може бути короткочасно перевищена не більше, ніж в 1,2-1,5 рази без ризику руйнування приладу.

Рішення по вимірюванню середовищ на основі даного витратоміра є точним, довговічним і недорогим (вартість витратоміра визначається вартістю вимірювально-підсумовуючого блоку, додаткових датчиків для компенсації тиску і температури при великих діапазонах змін параметрів середовищ і вартістю труби виміру) особливо для вимірювання великих потоків і вимірювання високов'язких рідин.

Контрольні питання та завдання до глави 11

1. Опишіть принцип дії теплових витратомірів.
2. Опишіть принцип дії ультразвукових витратомірів.
3. Опишіть принцип дії електромагнітних витратомірів.
4. Опишіть принцип дії коріолісових витратомірів.
5. Опишіть принцип дії витратомірів з мишенями.

Глава 12. ДАТЧИКИ-ДЕТЕКТОРИ ПОЖЕЖІ

За принципом дії датчики-детектори пожежі поділяються на два види:

1. прилади ручної дії (кнопкові вимикачі);
2. автоматичні прилади.

У свою чергу, автоматичні прилади діляться на три види:

- біметалічні контактні детектори (аналог - електрична праска);
- ртутні термометри з електричними контактами;
- димові;
- детектори полум'я.

Ручні пожежні детектори встановлюються в місцях, де передбачається постійне перебування членів екіпажу або пасажирів (палуби, проходи, коридори, камбузи).

Автоматичні пожежні детектори встановлюються в місцях, де не передбачене постійне перебування членів екіпажу або пасажирів (наприклад, в приміщеннях ліхтарної із запасами гасу для заправки ліхтарів «Не можу управлятися», малярної із запасами фарб і миючих засобів, вантажних трюмах і багатьох інших службових приміщеннях).

Більш детальна інформація про місця установки ручних і автоматичних пожежних детекторів міститься в Правилах Регістру.

12.1 БІМЕТАЛІЧНІ ПОЖЕЖНІ ДЕТЕКТОРИ

У біметалевих пожежних детекторах чутливим до тепла елементом є біметалічна пластина (рисунок 12.1).



Рисунок 12.1 – Біметалічна пластинка

Біметалічна пластина складається з двох шарів металів з різними коефіцієнтами лінійного розширення α_1 і α_2 . Шари металу з'єднуються або зварюванням, або прокаткою в гарячому стані. При нагріванні пластина згинається в бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення. Вигин пластини використовується для дії на контакти реле. При виробництві біметалевих пластин застосовують матеріали з низьким коефіцієнтом лінійного розширення, наприклад, залізонікелевий сплав інвар, і з високим коефіцієнтом - хромонікелеві, молібденонікелеві і немагнітні сталі.

Різновидом автоматичних біметалевих детекторів є максимально-диференціальні (рисунок 12.2).

Чутливий механізм детектора знаходиться в пластмасовому корпусі 2. Два біметалевих чутливих елементи 3 і 4 нерухомими кінцями прикріплені до стійок, а рухливими - до осей контактних шайб. Елемент 3 розташований в закритій камері 7, а елемент 4 - у відкритій камері 6.

При повільному наростанні температури обидва елементи, однаково нагріваючись, обертають контактні шайби 9 і 10 з однаковою кутовою швидкістю. Тому електричні контакти залишаються замкнутими. При досягненні заданої температури рух контактної шайби 9 закритого елемента обмежується упором 1, внаслідок чого контакти розмикаються, і відбувається спрацювання детектора при максимально допустимій температурі.

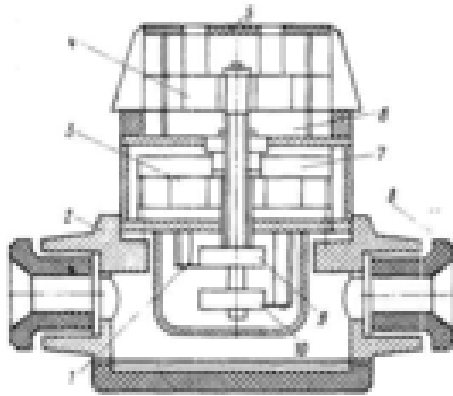


Рисунок 12.2 - Максимально-диференційний пожежний детектор

При різкому стрибкоподібному підвищенні температури навколишнього середовища відкритий елемент 4 швидше сприймає її, а отже, кутова швидкість контактної шайби 10 вище, ніж шайби 9. Відбувається вимикання контакту, тобто детектор спрацьовує як диференціальний.

Чутливий елемент 4 захищений від механічних пошкоджень перфорованим пластмасовим чохлом 5. Два сальникових вводи 8 служать для підключення проводів.

12.2 РТУТНІ ТЕРМОМЕТРИ З ЕЛЕКТРИЧНИМИ КОНТАКТАМИ

Такі термометри складаються з скляної колби, частково заповненою ртуттю.

У стінку колби упаюється платиновий електрод, який служить виводом. Другий вивід, розміщений у верхній частині колби, виконаний рухливим. Його можна переміщати вручну за допомогою магніту. Робочий об'єм колби заповнюється ртуттю. При підвищенні температури ртуть нагрівається і розширюється, тобто збільшується в об'ємі. Рівень ртуті в колбі підвищується, і при деякій температурі ртуть з'єднає обидва виводи між собою.

Для регулювання температури спрацювання змінюють відстань між електродами шляхом переміщення рухомого виводу за допомогою магніту: чим більша ця відстань, тим при більшій температурі замкнуться контакти.

12.3 ДИМОВІ (ІОНІЗАЦІЙНІ) ДЕТЕКТОРИ

Димові (іонізаційні) детектори виготовляються з радіоактивним препаратом - америцієм, виконаним у формі кілець, розміщених в двох іонізаційних камерах.

Одна камера (порівняльна) ізолюється від навколишнього середовища, через другу (вимірювальну) проходить повітря. Камери центральними електродами - анодами з'єднуються між собою.

При впуску димових газів в камеру підвищується електричний опір, що призводить до зміни рівноваги напруг, прикладених до цих камерам. Як тільки різниця цих напруг досягне напруги запалювання лампи з холодним катодом, вона відкриється і в сигнальній лінії виникне струм, що надходить на комутатор.

12.4. ДЕТЕКТОРИ ПОЛУМ'Я

Детектор полум'я є напівпровідниковим приладом, що реагує на світлове випромінювання, яке виходить від осередку пожежі. Основними елементами детектора є фотоелемент з лінзою, що пропускає тільки інфрачервоне випромінювання, транзисторний підсилювач і лампа з холодним катодом.

Під дією інфрачервоного випромінювання осередку пожежі на фотоелементі з'являється ЕРС, яка посилюється і відкриває лампу. Сигнал пожежної тривоги подається на комутатор в рульову рубку. Після прийняття сигналу тривоги вахтовий помічник вживає заходів до знищення вогнища пожежі, оголошуючи по судну пожежну тривогу.

12.5 СХЕМА ПОЖЕЖНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ

У схемі пожежної сигналізації (рисунок 12.3) використовуються датчики-детектори, контакти яких замкнуті при нормальній температурі.

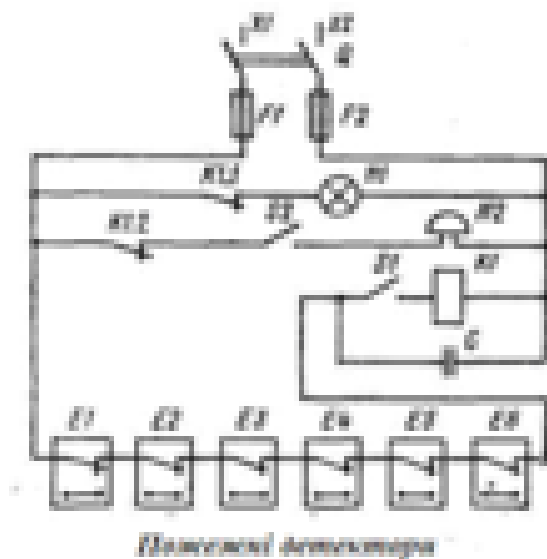


Рисунок 12.3 – Схема пожежної сигналізації

При пожежі сигнал тривоги поступає в ходову рубку на щиті пожежної сигналізації, в якому змонтовані електромагнітне реле, конденсатор, лампа, що сповіщає про пожежу, і два вимикача. Поруч з щитом встановлений дзвінок.

Живлення схеми пожежної сигналізації забезпечується від акумуляторної батареї дизель-генераторів напругою 24 В через груповий щит.

При подачі напруги на виводи з'єднувального щита схема автоматичної пожежної сигналізації готова до дії.

На щиті пожежної сигналізації (ЩПС) вимикачі S1, S2 повинні бути постійно включені (рисунок 12.3). Так як контакти пожежних детекторів при нормальній температурі замкнуті, струм проходить через котушку реле K1, однополюсний вимикач S1 і контакти всіх детекторів, з'єднаних послідовно. Реле K1 спрацьовує і

розмикає свої контакти в колах сигнальної лампи Н1 і дзвінка Н2. Схема знаходиться під напругою і постійно готова до дії. При підвищенні температури повітря в машинному відділенні до 70°C один або кілька детекторів, що знаходяться найближче від вогнища підвищеної температури, спрацьовують.

Розмикається коло живлення котушки реле К1 на ЩПС. Реле знеструмлюється і замикає свої контакти в колах живлення сигнальної лампи і дзвінка. Лампа вмикається, а дзвінок дзвонить.

Подача сигналу «Пожежа» продовжується до тих пір, поки температура повітря в машинному відділенні не стане нижче 70°C і детектор знову не замкне свої контакти в колі котушки реле К1.

Для зняття звукового сигналу на ЩПС встановлений вимикач S2.

Наявність в схемі живлення і справність реле, дзвінка і лампи перевіряють розмикаючи вимикачем S1 котушки реле. При вимиканні котушки реле К1 його контакти замикаються і подається сигнал «Пожежа», як і у випадку автоматичного спрацьовування пожежних детекторів.

Конденсатор С призначений для захисту від помилкових спрацьовувань детектора в умовах підвищеної вібрації корпусу судна. При розмиканні контактів детекторів реле короткочасно залишається включеним через струм розряду конденсатора. Конденсатори подібного призначення зазвичай вбудовані в детектори.

Контрольні питання та завдання до глави 12

1. Опишіть принцип дії біметалічних та ртутних детекторів пожежі.
2. Опишіть принцип дії димових детекторів і детекторів полум'я.

Розділ 3. ЗАДАЮЧІ УСТРОЇ

Для поширення експлуатаційних можливостей керуючих пристроїв та регуляторів, а також завдання вихідного значення регульованої змінної, використовують задаючі устрої, або задатчики. Ввід задаючого впливу може здійснюватися вручну, полу автоматичне або за допомогою обчислювальної техніки.

Глава 13. ЗАДАЮЧІ УСТРОЇ САУ

13.1 КЛАСИФІКАЦІЯ РЕГУЛЯТОРІВ ЗА ХАРАКТЕРОМ ЗАДАЮЧОГО ВПЛИВУ

Регулятори-стабілізатори характеризуються однократним вводом задаючого впливу на тривалий проміжок часу. У самому простому випадку це може бути одно режимний регулятор-стабілізатор, який розрахований на підтримку в процесі експлуатації тільки одного значення регульованої змінної. Більшість регуляторів-стабілізаторів – багаторежимні устрої, що мають задатчики та представляють саму значну групу автоматичних пристроїв в техніці.

У ряді виробництв технологічні процеси носять переривчастий характер із заданими змінними значеннями регульованої величини. Задаючий вплив вноситься багаторазово відповідно до заздалегідь заданої функції часу. Подібну задачу виконує програмний регулятор. Наприклад, зміна подачі газу в технологічну піч проводиться в залежності від часу знаходження виробів при заданій температурі в різних циклах - нагрівання, видержки, охолодження і т. п.

В окремих випадках певна програма не може забезпечити необхідну якість протікання технологічного процесу. Потрібно, щоб регульована змінна змінювалася залежно від іншої величини, від співвідношення між ними. Одна величина повинна слідувати за іншою, тому регулюючі пристрої такого типу називають слідкуючими регуляторами.

Найскладніші і досконалі автоматичні регулятори здатні самостійно змінювати алгоритм функціонування. До їх числа відносяться САР з самопристосуванням або самоналаштуванням, які адаптуються до змін, наприклад, параметрів об'єкта, регуляторів, зовнішніх умов і т. п. Екстремальні САР шляхом внесення пробних впливів на об'єкт та аналізу його реакції забезпечують відшукування таких регулюючих впливів, при яких регульована величина досягає оптимального значення. Такі регулятори називають оптимізаторами. До числа завдань, що вирішуються подібними пристроями, може бути віднесена експлуатація котла на максимальному ККД з мінімальною витратою палива або вибір швидкості руху автомобіля з мінімальним споживанням бензину.

Найважливішою якісною зміною в функціонуванні САР з'явилося використання дискретної і цифрової техніки, що в свою чергу призвело до появи в техніці регулювання керуючих обчислювальних пристроїв і мікропроцесорів.

13.2 ОСНОВНІ ВИДИ ЗАДАЮЧИХ УСТРОЇВ

Задатчик формує сигнал W , який порівнюється з сигналом x від датчика, тобто вид сигналу визначається застосуванням в регуляторі датчиком. Найчастіше задатчик

діє за принципом компенсації сил (переміщень) або електричних величин (рідше - пневматичних і гідравлічних).

Механічні задатчики мають, як правило, налаштувальну пружину з натяжним механізмом. На рисунку 13.1, а зображена струмина трубка з дією від датчика - трубчастої пружини, на рисунку 13.1, б - елементи регулятора рівня, в якому настройка відбувається зміною плеча балансира а, положень поплавка і протипаги. Там же показані допоміжні задаючі впливи, які використовуються для формування неузгодженості в складніших регуляторах.

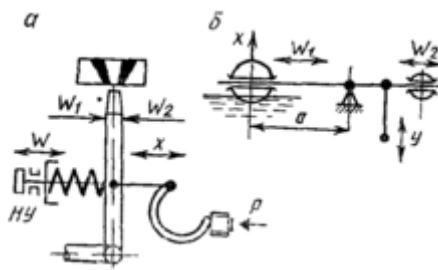


Рисунок 13.1 – Механічні задатчики

Електричні задатчики являють собою резистори зі змінним опором, змінні індуктивності і перемикачі. Приклад задаючого пристрою такого типу - резистор для налаштування на бажану температуру - показаний в схемі терморегулятора (рисунок 13.2.). Формування неузгодження в електричних схемах проводиться з використанням диференціальних та мостових методів включення.

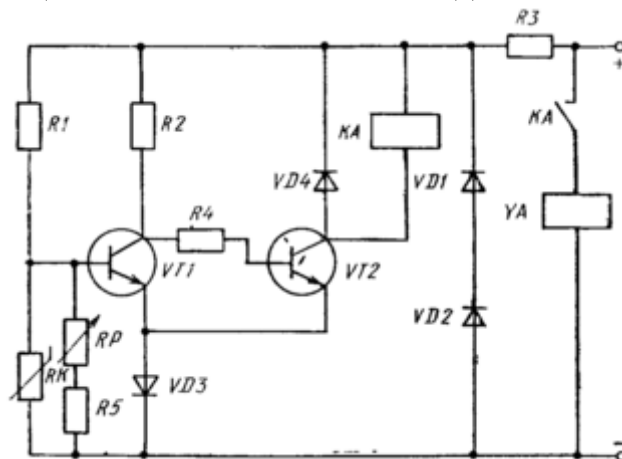


Рисунок 13.2 – Електричний задатчик

Для програмних і слідкуючих регуляторів однією з найважливіших ознак задатчику є вид носія - програми або заданої функціональної залежності - безперервної або дискретної. Для найбільш часто застосовуваних у САР регуляторів в задаючих пристроях безперервної дії використовуються кулачкові, лекальні і важільні механізми і функціональні резистори (потенціометри).

На рисунку 13.3 показані схеми кулачкового і лекального механізмів, призначення яких полягає в перетворюванні обертального (рисунок 13.3, а) і поступального (рисунок 13.3, б) рухів носіїв програми 2 в поступовий рух штовхача 1, пов'язаного з регулятором. Розрахунок кулачка (лекала) зводиться до знаходження потрібної функції в залежності від конфігурації поверхні носіїв програми. На рисунку 13.3, а показано задаючий пристрій регулятора температури

домашнього холодильника, схема на рисунку 13.3, б реалізується в регуляторах горіння котельних установок.

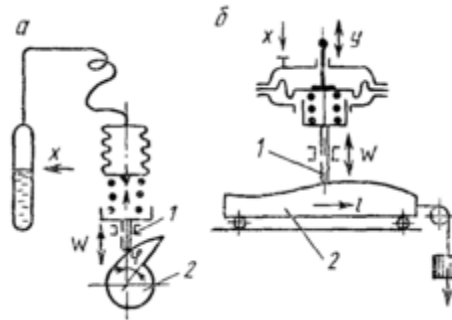


Рисунок 13.3 – Програмні задатчики

Переважають функціональні потенціометри поворотного типу з використанням залежності опору від кута повороту. Форма каркаса визначає програму. Профільні (рисунок 13.4, а), ступінчасті (рисунок 13.4, б) і з перемінним кроком (рисунок 13.4, в) потенціометри можуть бути виготовлені вугільними і з намотуванням дроту.

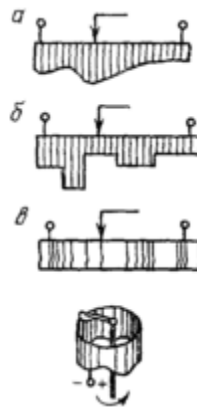


Рисунок 13.4 – Програмний задатчик на потенціометрі

З відомим допущенням до групи задаючих пристроїв можна віднести коригувальні елементи для введення в регулятор допоміжних сигналів, необхідних для додання САР необхідних статичних і динамічних властивостей.

13.3 САР ТА МІКРОЕОМ

У САР все ширше використовуються керуючі електронні обчислювальні машини, які порівнюють вимірювані параметри процесу з еталонними, що зберігаються в ЕОМ, і на цій основі утворюють керуючий вплив.

Сучасні ЕОМ дають можливість проектувати швидкодіючі САР з великим обсягом пам'яті, що дозволяють обслуговувати кілька технологічних процесів. Однак ЕОМ загального призначення поки ще дороги, а для регулювання декількох пов'язаних процесів необхідні лінії зв'язку, що в цілому значно здорожує САР.

МікроЕОМ і мікропроцесори (МП) є високопродуктивними і більш дешевими обчислювальними елементами, призначеними для масового випуску в якості

універсальної компонентної основи обчислювальної техніки. МП мають у своєму складі компактні однотипні блоки, які можна налаштовувати на необхідні функції і створювати на їх основі спеціалізовані САР.

Мікропроцесор створюється на основі однієї або декількох великих і надвеликих інтегральних схем (ВІС і НВІС), що дозволяють розміщувати велике число транзисторів на одній кремнієвій підкладці (в одному кристалі). Мікропроцесори можна розділити на однокристальні, вузли яких розташовані в одному кристалі, і мікропроцесорні комплекти з розміщенням в різних кристалах. Випускається значна кількість МП, на основі яких можна створити компактні мікроЕОМ, використовувані в різних галузях народного господарства, в науково-дослідній роботі і т. д.

На рисунку 13.5 показана спрощена структурна схема мікроЕОМ, побудована на базі МП, що входять до складу центрального процесору ЦП. Як видно зі схеми, додатково до ЦП складу мікроЕОМ поповнюється пристроями введення і виведення інформації.

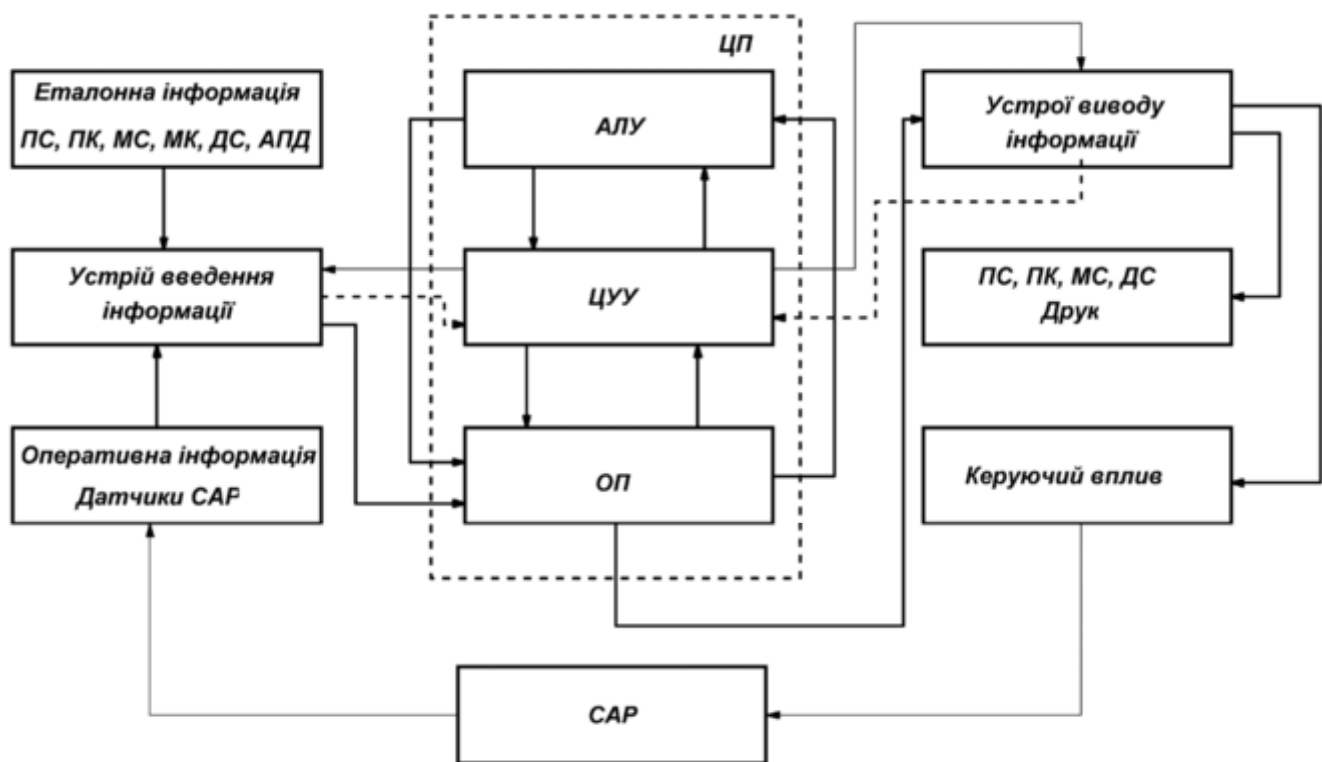


Рисунок 13.5 – Спрощена структурна схема ЕОМ

Спільною для зазначених видів мікропроцесорів є структура ЦП, в основні блоки якого входять: АЛУ - арифметично-логічний устрій, ЦУУ - центральний устрій управління і ОП - оперативна пам'ять.

АЛУ служить для виконання арифметичних і логічних операцій, вироблення сигналів керуючого впливу і вихідної інформації. ЦУУ може складатись з окремих функціональних МП і служить для організації вибірки команд даних з ОП, дешифровки команд та управління послідовністю арифметичних і логічних операцій в АЛУ. ОП призначена для зберігання введеної інформації, а також проміжних і остаточних результатів розрахунків. Жирні лінії зв'язку показують інформаційні канали (шини даних), тонкі - керуючі канали, пунктирні - канали зворотних зв'язків -

відповідних сигналів про виконання команд. Джерелами еталонної інформації можуть бути перфострічки ПС, перфокарти ПК, магнітні стрічки і карти МС і МК, дисплеї ДС та інша апаратура передачі даних АПД. Звернення до оперативної і зовнішньої пам'яті здійснюється за адресами, але передбачається також можливість роботи з магазинною (стековою) пам'яттю, при зверненні до якої не потрібно вказівки адреси.

Виконання кожної команди в МП визначається послідовністю керуючих сигналів, що виробляються ЦУУ. Команди можуть записуватися в такому ж вигляді, в якому вони будуть зберігатися в пам'яті, наприклад у вигляді двійкових кодів. При програмуванні використовується символічне зображення всіх частин (полів) команд. Такі програми перетворюються в двійковий код вручну або автоматично за допомогою спеціальної програми переведення. Двійкове подання команд називається машинною мовою, кодування команд в машинному коді - програмуванням.

Для програмування задач застосовується мова асемблер та мови більш високого рівня: ФОРТРАН, Паскаль, ПЛ / 1, БЕІСІК. Для перекладу програми з мов високого рівня застосовують транслятори, звані компіляторами. При трансляції програми з мови високого рівня на мову машинних команд кожне речення вихідної мови породжує $\neg$ скільки машинних команд, тоді як для АСЕМБЛЕРА в основному дотримується співвідношення один до одного. Тому програми, написані на мовах високого рівня, виявляються значно компактніше.

Контрольні питання та завдання до глави 13

1. Наведіть класифікацію регуляторів за характером задаючого впливу.
2. Наведіть основні види задаючих устроїв
3. Для чого використовують САР та мікроЕОМ?

Розділ 4. ПІДСИЛЮЮЧІ ТА ПЕРЕТВОРЮЮЧІ УСТРОЇ САУ

Глава 14. ПІДСИЛЮЮЧІ УСТРОЇ

14.1 ПРИЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ, ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Потужність сигналів датчиків в більшості систем автоматичного управління та контролю недостатня для приведення до дії виконавчого устрою.

Це викликає необхідність посилення сигналів за потужністю. Так як в процесі посилення відбувається перетворення сигналу, елементи, що виконують дану функцію, звуться підсилювальне-перетворювальними. В системах ці елементи розміщуються між датчиками та виконавчими пристроями. За видом допоміжного джерела енергії підсилювачі підрозділяють на

- електричні;
- гідравлічні;
- пневматичні.

Активний підсилювач - посилення сигналу здійснюється за рахунок енергії зовнішнього джерела: в сервоприводах (як то: гідро-, електро-, пневмопідсилювачі) посилюється вихідний механічний рух (як правило, оператора), за рахунок зовнішньої енергії. В електричних підсилювачах збільшується амплітуда вихідного сигналу (по напрузі і силі струму), в фотопомножувачах - посилюється інтенсивність вихідного світлового потоку. В активних підсилювачах часто використовується зворотний зв'язок: позитивний - для підвищення чутливості, і негативний - для поліпшення точності / стабільності.

Пасивний підсилювач - посилення однієї (необхідної) характеристики сигналу здійснюється за рахунок зменшення інших характеристик: наприклад, домкрат (а також тиси, ручна таль, важіль) є підсилювачем - руху (сили) руки - за рахунок швидкості (ця характеристика сигналу зменшується). Мухобійка, тенісна ракетка - для порівняння - є підсилювачами швидкості (за рахунок зменшення сили і / або часу впливу).

Резонатори та екрани - види пасивних підсилювачів, застосовуваних для посилення періодичних (гармонійних) коливань в приймачах і передавачах звукових і радіохвиль (відбувається посилення робочої смуги в обраному напрямку за рахунок зменшення загальної смуги та інших напрямків прийому / випромінювання).

Дзеркала й лінзи - аналогічно попередньому, для оптики, відбувається посилення для вибраної ділянки (кута) спостереження / освітлення, на шкоду іншим (ділянкам, кутах). Сюди відносяться всі оптичні системи від лупи до телескопа.

Системи з накопиченням енергії - види пасивних підсилювачів, в яких велику частину часу відбувається тільки накопичення енергії сигналу (подається відносно рівномірно), і меншу частину часу (частіше - імпульсне) - віддачу накопиченого і посиленого сигналу на виході: молоток, подолання крутої гірки автомобілем « з розгону », система запалювання (котушка запалювання) бензинових двигунів, рубінові лазери, гідротараний насос.

Збільшувач - практично повний синонім слова «підсилювач», проте частіше вживається для пристроїв, що збільшують лінійні розміри сигналу, що характерно

для оптики (фотозбільшувач, збільшувальне скло). Усталені терміни: «збільшувач зчіпного ваги», «збільшувач крутного моменту».

Прискорювач - пристрій, що збільшує швидкість здійснення процесу або руху частинок.

Помножувач - вид підсилювача, в якому збільшення характеристики сигналу відбувається в кратне число раз (відповідно числу ступенів). Приклади: помножувач напруги, помножувач частоти, фотоелектронний помножувач.

Підсилювальне-перетворюючі елементи, як й датчики сигналу, підрозділяються на два класи:

- параметричні, основою яких є нелінійний елемент, що дозволяє керувати процесами в колах живлення та навантаження за допомогою вхідного сигналу малої потужності;
- генераторні, в яких перетворення енергії живлення в енергію вихідного сигналу відбувається під дією малопотужного вхідного сигналу.

В підсилювальне-перетворювальних елементах будь-якого класу відбувається не зростання енергії, а управління потоком енергії допоміжного джерела великої потужності за допомогою сигналів малої потужності, які є вихідними сигналами датчиків. Тому для підсилювального елемента надається основна вимога – забезпечити на виході найбільш точне відтворення всіх змін вхідного сигналу з відповідним його посиленням. В значній мірі виконання цієї вимоги визначається наступними характеристиками підсилювальне-перетворювальних елементів:

- статична характеристика (залежність усталених значень вихідної величини від значення вхідної величини);
- динамічні властивості (інерційність – тривалість перехідного процесу);
- ступінь нелінійних спотворень (коефіцієнт нелінійних спотворень – величина, що дорівнює відношенню середньоквадратичної суми спектральних компонент вихідного сигналу, які відсутні в спектрі вхідного сигналу до середньоквадратичної суми всіх спектральних компонент вхідного сигналу

$$K_H = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots U_n^2}}, \text{ коефіцієнт гармонічних спотворень – величина,}$$

що дорівнює відношенню середньоквадратичної суми вищих гармонік сигналу

$$\text{до величини першої гармоніки } K_G = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}; \quad K_G = \frac{K_H}{\sqrt{1 - K_H^2}};$$

- коефіцієнт посилення за потужністю;
- вхідний опір (на вхідних затисках підсилювача при підключенні навантаження);
- вихідний (опір на вихідних затисках разом з відомим опором джерела сигналу);
- потужність сигналу на виході;
- рівень шумів підсилювача;
- смуга пропускання підсилювача; верхня та нижня граничні частоти.
- коефіцієнт корисної дії.

В лінійних системах автоматичного управління та контролю існують жорсткі вимоги до лінійності статичної характеристики в робочому діапазоні зміни

керуючого сигналу. Так як реальні підсилювальне-перетворювальні елементи мають статичні характеристики, які володіють різними типами нелінійності, то доводиться обмежувати допустимий діапазон лінійності. В системах релейного типу від підсилювача в деяких випадках потрібна суттєво нелінійна (релейна) статична характеристика. Тоді використовують релейний режим роботи підсилювальне-перетворювального елемента.

Динамічні властивості підсилювальне-перетворювальних елементів оцінюються за допомогою часових або частотних характеристик. По частотних характеристиках визначаються лінійні частотні спотворення, які вносяться підсилювачем, що складаються в зміні форми вихідного сигналу, котра викликана неоднаковим посиленням сигналу різних частот.

Причиною появи нелінійних спотворень в підсилювальне-перетворювальних елементах є нелінійності окремих елементів, що входять в схему підсилювача, наприклад, статичних характеристик електронних елементів, характеристик намагнічування заліза (дроселів, трансформаторів). В результаті нелінійних спотворень на виході підсилювальне-перетворювального елемента, крім основної гармоніки посиленого сигналу, з'являються вищі гармоніки, яких не було на вході. Нелінійні спотворення залежать від рівня сигналу, що подається на вхід.

Ступінь посилення вхідного сигналу підсилювальне-перетворювального елемента оцінюють за допомогою коефіцієнта посилення або перетворення. Найбільш загальним є коефіцієнт посилення елемента за потужністю, який в сталому режимі визначається співвідношенням:

$$K_p = \frac{\Delta P_{\text{вих}}}{\Delta P_{\text{вх}}},$$

де $\Delta P_{\text{вих}}$ - приріст потужності вихідного сигналу підсилювача, що відповідає приросту потужності вхідного сигналу.

В ряді випадків недоцільно користуватися поняттям посилення сигналу за потужністю, а розглядають ступінь підвищення середнього або амплітудного значення рівня вихідного сигналу відносно рівня вхідного сигналу. Тоді зручно застосовувати в якості характеристики підсилювального елемента поняття коефіцієнту посилення за рівнем. Для елементів електричного типу розрізняють два коефіцієнти посилення за рівнем: коефіцієнт посилення за напругою $K_U = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}}$

та коефіцієнт посилення за струмом $K_I = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вх}}}$, де $\Delta U_{\text{вих}}, \Delta U_{\text{вх}}, \Delta I_{\text{вих}}, \Delta I_{\text{вх}}$ - прирости напруг та струмів на виході і вході елемента.

14.2 МАГНІТНІ ПІДСИЛЮВАЧІ

Магнітний підсилювач - це електромагнітний пристрій, робота якого заснована на використанні нелінійних магнітних властивостей феромагнітних матеріалів і призначений для посилення або перетворення електричних сигналів. Застосовується в системах автоматичного регулювання, управління та контролю.

Різновиди:

- дросельний магнітний підсилювач;

- магнітний підсилювач з самонасиченням (МПС),
- диференційний магнітний підсилювач

14.2.1 Дросельний магнітний підсилювач

Робота магнітного підсилювача заснована на нелінійності характеристики намагнічування магнітопроводу.

На крайніх стрижнях магнітного підсилювача знаходиться робоча обмотка, яка складається з двох котушок, з'єднаних послідовно і зустрічно (рисунок 14.1, а).

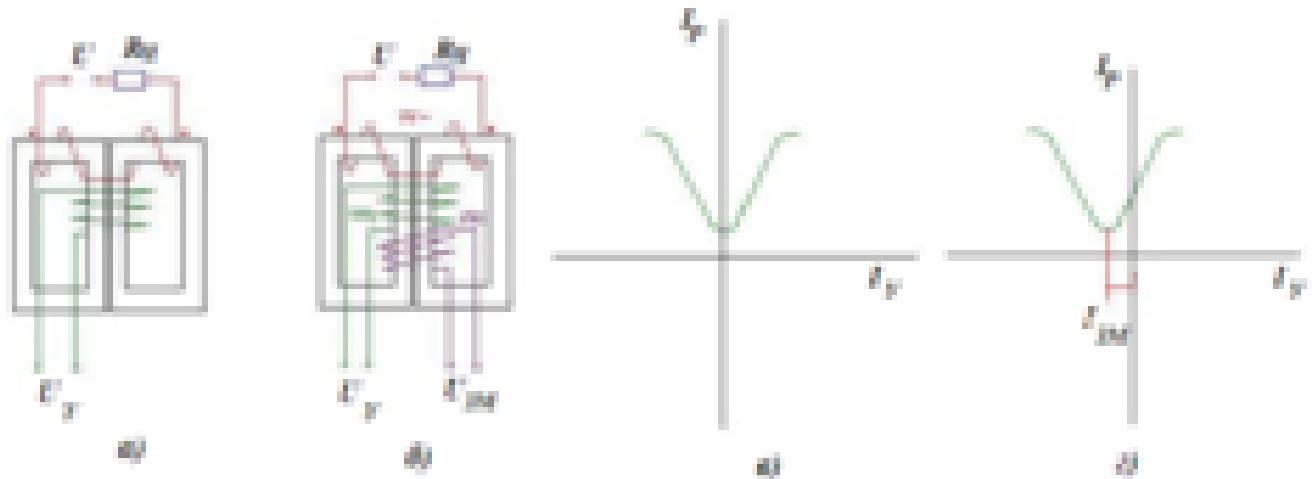


Рисунок 14.1 – Дросельний магнітний підсилювач без обмотки зміщення (а), з обмоткою зміщення(б) та їх навантажувальні характеристики (в, г)

Зустрічне включення робочих обмоток необхідно для того, щоб сумарна ЕРС в обмотці управління, наведена від робочої обмотки дорівнювала нулю. На середньому стрижні розміщується обмотка управління з великою кількістю витків $W =$. Якщо струм в неї не подається, а до робочій обмотці, з'єднаної послідовно з навантаженням, підведена змінна напруга U , то через малу кількість витків $W \sim$ магнітопровід не насичується, і майже все напруга падає на реактивному опорі робочих обмоток $Z \sim$. На навантаженні в цьому випадку виділяється мала потужність. Якщо тепер пропустити по обмотці управління струм I_y , то навіть при невеликому його значенні (через велику кількість витків $W =$), виникає насичення магнітопроводу. В результаті реактивний опір робочої обмотки різко зменшується, а величина струму в колі - збільшується. Таким чином, за допомогою малих сигналів в обмотці управління можна управляти значною величиною потужності в робочому колі магнітного підсилювача. Але подібна конструкція МП має низку недоліків: мале посилення і нелінійність, оскільки при малих токах управління робочий струм також буде невеликим (це пов'язано з нелінійністю на початку навантажувальної характеристики МП і отже малим її нахилом), в колі навантаження при нульовому струмі управління буде присутній ненульовий струм (струм холостого ходу) крім того робочий струм не буде залежати від полярності струму управління. Для збільшення коефіцієнта посилення і введення залежності робочого струму від полярності струму управління в МП застосовують додаткову обмотку, т.зв. «обмотку зсуву» (рис. 14.1, б), подаючи на яку постійну напругу від окремого джерела можна вибрати робочу точку МП (точку при струмі управління рівному нулю), чим можна домогтися лінійної залежності робочого струму управління та

істотного збільшення коефіцієнта посилення, а також залежності робочого струму від полярності струму управління, при цьому залежно від співвідношення полярності напруг на обмотці управління і обмотці зміщення навантажувальна характеристика зміщуватиметься: при згідному включенні обмоток - відбувається зміщення характеристики вліво (рис. 14.1, г), а при зустрічному – вправо від відповідної характеристики дроселя без обмотки зсуву (рисунок 14.1, в).

У найпростішому випадку магнітний підсилювач - це керована постійним струмом котушка індуктивності (дросель), яка включається в коло змінного струму послідовно з опором навантаження.

14.2.2 Магнітний підсилювач з самонасиченням

Включення в коло вихідної обмотки напівпровідникових вентилів - діодів призводить до насичення сердечника, оскільки по обмотках буде протікати струм одного напрямку, а в моменти спадання намагнічуючого струму в осерді буде присутня залишкова намагніченість (рисунок 14. 2). Керуюча обмотка створює поле, яке розмагнічує сердечник.

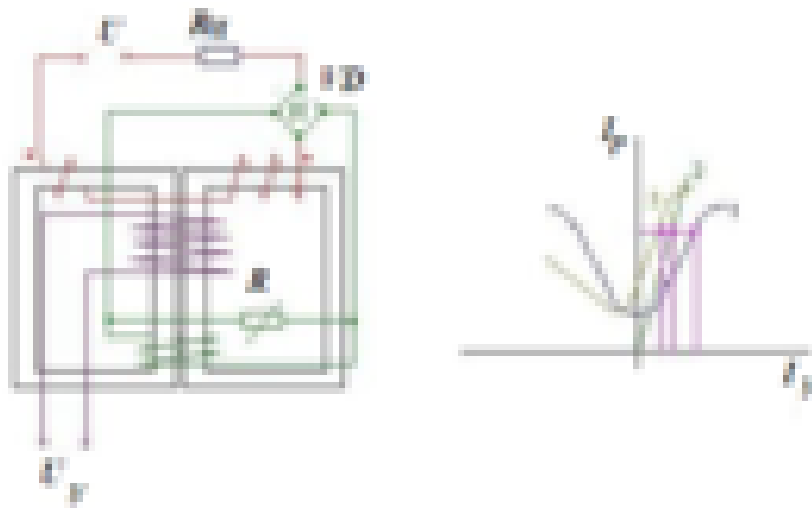


Рисунок 14.2 – МП з зовнішнім зворотним зв'язком та навантажувальні характеристики (1 – без ЗЗ, 2 – із ЗЗ, 3 – сумарна)

Для збільшення коефіцієнта посилення МП в них вводять зворотний зв'язок (ЗЗ), при цьому зворотний зв'язок може бути двох типів:

- зовнішній ЗЗ;
- внутрішній ЗЗ.

При зовнішньому ЗЗ вводиться додаткова обмотка, яку також намотують на середній сердечник магнітопроводу, як і обмотки управління і зсуву. При цьому обмотки ЗЗ включаються в коло робочих обмоток таким чином, що при збільшенні струму управління і значить робочого струму струм в обмотці ЗЗ також зростає, додатково підмагнічуючи сердечник і ще більш збільшуючи робочий струм. При цьому струм в колі робочій обмотці є змінним, тоді як в колі обмотки ЗЗ повинен бути постійним, тому останню включають послідовно в коло з робочою обмоткою через діодний міст.

При використанні МП з внутрішнім ЗЗ робочі обмотки включаються через різноспрямовані випрямні діоди, а навантаження включається між клемою мережі і загальною точкою обмотки, таким чином в один напівперіод навантаження

живиться від однієї обмотки, а в іншій напівперіод - від другої обмотки, в кожній робочій обмотці протікає знакопостійний струм (при цьому обмотки з'єднуються так, щоб їх потік намагнічування був направлений в одну сторону), додатково підмагнічуючи сердечник і цим самим ще більш збільшуючи струм в робочих обмотках.

В обох випадках зворотний зв'язок в одному напрямку полярності на обмотці управління МП є позитивним: при збільшенні струму управління робочий струм зростає, за допомогою зворотного зв'язку ще більш намагнічуючи сердечник, тим самим ще більше збільшуючи вихідний струм; при протилежній напрузі на обмотці управління ЗЗ стає негативним. Таким чином навантажувальна характеристика стає більш несиметричною, коефіцієнт посилення на зворотній гілці стає дуже малим, на прямій - сильно зростає, досягаючи 1000, а в окремих випадках до 3000-5000.

14.2.3 Диференціальний магнітний підсилювач

Для того, щоб керувати напрямком струму в навантаженні з великим коефіцієнтом посилення і дуже лінійною навантажувальною характеристикою з малим струмом холостого ходу застосовуються диференціальні магнітні підсилювачі. Диференціальний МП - це комбінація з двох МП (з обмотками ЗЗ, зсуву), включених так, що з одного боку їх робочі обмотки включаються зустрічно і до них підключається навантаження, з іншого боку навантаження підключається до середньої точки живильного трансформатора (дві інші його клеми живлять коло робочих обмоток). Обмотки управління обох МП включаються послідовно зустрічно і при подачі напруги один магнітний підсилювач буде працювати з ПЗЗ, інший - з НЗЗ, в результаті сумарна характеристика буде близька до характеристики МП, що працює з ПЗЗ, при зменшенні по модулю струму управління інтенсивність МП з ПЗЗ зменшується, а МП з НЗЗ збільшується, при цьому характеристика лінійно прагне до нуля, при зміні знака ролі МП змінюються, а характеристика має також таку ж лінійність в протилежній області. Подібні ДМП можуть застосовуватися для управління асинхронними електродвигунами, тому їх іноді називають реверсивними МП.

Основне призначення - управління силовим електроприводом (поширені в будівельній техніці), також застосовувалися в побутових стабілізаторах змінного струму, безконтактних реле, для модуляції сигналів, для подвоєння частоти, в регуляторах яскравості освітлювальних приладів кіноконцертних залів, в двійковій ЕОМ Лем-1 Л. І. Гутенмахера і в трійчастій ЕОМ «Сетунь» і «Сетунь-70» Н. П. Брусенцова, управлінні потужними електродвигунами, наприклад в прокатних станах, в колах управління тепловоза. Магнітні підсилювачі багато в чому в багатьох областях електротехніки та електроніки були витіснені активними напівпровідниковими приладами, але і зараз вони застосовуються в ряді областей.

Як і раніше магнітні підсилювачі використовуються в системах посилення постійних струмів від тензодатчиків. Гібридні пристрої, що включають мініатюрний магнітний підсилювач і напівпровідниковий підсилювач, володіють малим дрейфом нуля і високою точністю.

Магнітний підсилювач дозволяє безконтактно вимірювати постійні струми в лініях електропередач. Останнім часом для цього все частіше застосовують більш компактні датчики Холла.

14.3 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПІДСИЛЮВАЧІ

Електромеханічні підсилювачі широко використовуються для посилення слабких постійних і повільно мінливих струмів і напруг. Основними елементами є: магнітоелектричний гальванометр і перетворювач кута повороту рамки в електричний параметр (струм, напругу, коефіцієнт взаємної індуктивності і т.д.). Найбільше застосування отримали фотооптичні і індукційні (трансформаторні) перетворювачі, а також підсилювачі на основі реле.

14.3.1 Фотогальванометричні підсилювачі

Схема фотогальванометричного підсилювача зображена на рисунку 14.3.

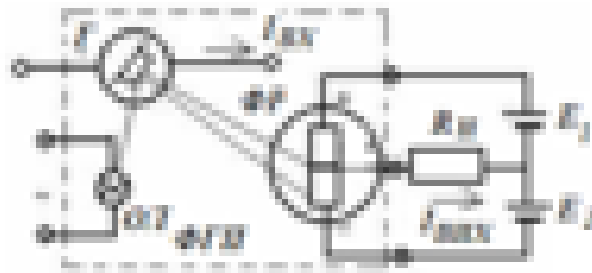


Рисунок 14.3 – Фотогальванометричний підсилювач

При відсутності струму $I_{\text{вх}}$ в рамці гальванометра Г, освітленість обох половин фоторезистора ФР світловим променем, відбитим від дзеркала гальванометра, однакова і струм $I_{\text{вх}}$ через навантажувальний опір $R_{\text{н}}$ дорівнює нулю. Поява струму в рамці гальванометра викликає її відхилення, що призводить до переміщення променя світла вздовж фоторезистора. При цьому опір однієї половини фоторезистора збільшується, а інший - зменшується. Баланс схеми порушується і по резистору $R_{\text{н}}$ починає протікати струм $I_{\text{вх}}$, значення якого пропорційне відхиленню рамки гальванометра, а полярність залежить від напрямку відхилення.

Перевагами фотогальванометричних підсилювачів (ФГП) є: 1) відсутність зворотної реакції перетворювача на рамку гальванометра; 2) малий рівень власних шумів; 3) більша стабільність нуля; 4) висока ефективність перетворення.

До недоліків ФГП слід віднести: 1) велику інерційність і чутливість до механічних впливів; 2) складність конструкції; 3) вихід за постійним струмом.

14.3.2 Підсилювачі з індукційним перетворювачем

На рисунку 14.4 показана схема підсилювача з індукційним перетворювачем. Принцип дії індукційних перетворювачів заснований на індукуванні змінної ЕРС в рамці гальванометра (або другий рамці, жорстко з нею пов'язаної).

Рамка 1 гальванометра жорстко пов'язана з рамкою 2, вміщеною в змінне магнітне поле, створюване за допомогою котушок 3. При протіканні постійного струму I_0 рамка 1 гальванометра повертається на деякий кут. Поворот рамки 1 приводить до повороту, жорстко пов'язаної з нею, рамки 2 і в ній індукується змінна ЕРС $U_{\text{вих}}$.

Перевагами гальванометричних підсилювачів з індукційними перетворювачами (ГП з ІП) є: 1) малий рівень власних шумів; 2) більша стабільність

нуля; 3) простота конструкції; 4) не вимагають спеціальної наладки; 5) повчання вихідного сигналу змінного струму.

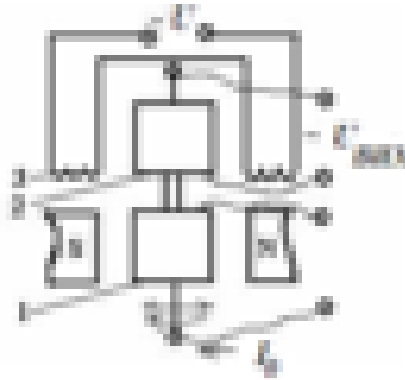


Рисунок 14.4 – Підсилювач з індукційним перетворювачем

До недоліків ГП з ІП відносяться: 1) велика інерційність і чутливість до механічних впливів.

14.3.3 Електромеханічні підсилювачі з реле

Основні визначення, класифікація, загальні відомості

Реле - це пристрої, що стрибкоподібно, східчасто змінюють свої вихідні параметри при певних значеннях вхідного параметра, сигналу.

На рисунку 14.5 показана характеристика управління реле в вигляді типової релейної залежності.

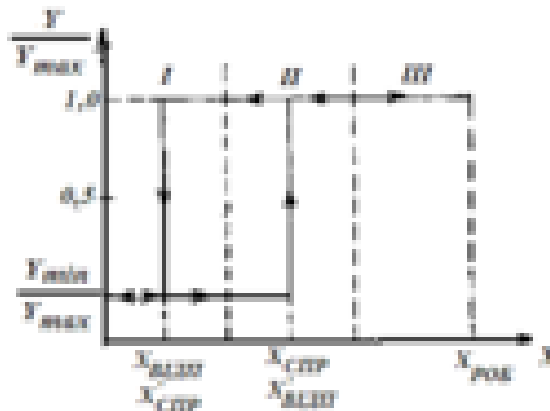


Рисунок 14.5 – Характеристика управління реле

Реле може працювати в трьох режимах:

- спрацьовування при стрибкоподібному зміні вихідної величини до її максимального значення - режим повторювача (вісь ординат в положенні **I**, $x_{спр}$; $x_{вдп}$ - вхідні сигнали спрацьовування і відпускання);
- східчасте зменшення вихідного параметра до мінімального рівня - режим інвертора (положення осі ординат **III**, $x'_{спр}$; $x_{вдп}$ - вхідні сигнали);
- робота в режимі реле з пам'яттю - режим тригера (вісь ординат проходить всередині релейної петлі - положення **II**, $x_{спр}$; $x'_{вдп}$ - вхідні параметри).
Досягнуте після спрацьовування або відпускання значення вихідного параметра зберігається, запам'ятовується після зникнення вхідного сигналу.

Будучи одним з основних технічних засобів (елементів) автоматики, реле дозволяють здійснювати певну послідовність в роботі окремих частин системи.

Класифікаційні ознаки реле досить численні.

Так, в залежності від природи фізичної величини, на яку реагують ці пристрої, розрізняють

- електромагнітні,
- акустичні,
- газові,
- радіаційні,
- оптичні,
- хімічні та інші види реле.

В залежності від призначення реле розділяють

- на комутаційні, що здійснюють взаємодію та зв'язок в релейних схемах,
- підсилювальні для посилення електричного вхідного сигналу
- контрольні (вимірювальні) для вимірювання (контролю) заданого струму або напруги.

Якщо вплив на кероване коло здійснюється стрибкоподібною зміною її індуктивності, ємності або іншого параметра, то говорять про безконтактні реле. Контактні реле розривають або з'єднують кероване коло, тому для них $y_{min} / y_{max} = 0$ на рисунку 14.5.

За принципом пристрою сприймаючих органів електричні реле розділяють на

- електромагнітні,
- електродинамічні,
- магнітоелектричні,
- індукційні,
- електронні та іонні,
- напівпровідникові та ін.

За родом керуючого струму розрізняють реле постійного і змінного струму.

Залежно від виду електричного параметра, на певні значення якого реагують реле, останні поділяють на реле

- струму ,
- напруги,
- потужності,
- частоти,
- опору і т. д.

За значенням споживаної потужності реле ділять на

- високочутливі (до 10 мВт),
- чутливі (до 0,1 Вт),
- нормальні (більше 0,1 Вт).

За видом контактів розрізняють реле з

- точковими,
- лінійними,
- площинними,
- ртутними контактами (останні дозволяють розмикати потужні кола).

За швидкодією виділяють такі реле:

- надшвидкодіючі (час спрацьовування й відпускання до 5 мс);
- швидкодіючі (5-50 мс);
- нормальні (50-150 мс);
- уповільнені (0,15-1 с);
- реле часу (понад 1 с).

Залежно від обсягу і маси розрізняють

- малогабаритні (не більше 40 см³ і 250 г),
- мініатюрні (3,5-8 см³, 10- 30 г)
- надмініатюрні (не більше 3,8 см³ і 10 г).

Матеріал цього підрозділу викладено стосовно електромагнітних реле, хоча в значній мірі справедливий і для контактних реле інших типів.

У конструктивному відношенні електромагнітне контактне реле можна розглядати як електромагніт, що діє на контактну систему. Тому нижче крім загальних відомостей, пов'язаних з дискретною природою електромагнітних контактних реле (см. рис. 14.5 з $y_{min} / y_{max} = 0$), викладені питання роботи контактних систем, герконів, феридів, віброперетворювачів, реле без якоря, контакторів і пускачів.

Функціональні можливості, допустимі режими роботи та області застосування електромагнітних реле визначаються наступними основними параметрами:

- номінальна напруга;
- номінальний струм;
- параметри спрацьовування $x_{СПР}$ (чутливістю реле) і відпускання $x_{ВДП}$;
- коефіцієнт повернення $k_{пов} = x_{ВДП} / x_{СПР} < 1$;
- коефіцієнти запасу при спрацьовуванні і відпусканні $k_{з.СПР} = x_{ном} / x_{СПР}$;
 $k_{з.ВДП} = x'_{ном} / x_{ВДП}$;
- комутована потужність;
- час спрацьовування $t_{СПР}$ і відпускання $t_{ВДП}$;
- допустима (максимальна) частота спрацьовування, тобто число спрацьовувань в одиницю часу;
- зносостійкість $N = (0,3 - 0,75) N_{пр}$, де $N_{пр}$ - експериментальне визначається числом спрацьовувань до систематичних відмов. У нейтральних електромагнітних реле допустиму кількість спрацьовувань становить $10^4 - 10^7$, у поляризованих $10^6 - 10^8$, у реле з магнітокерованими контактами $10^6 - 10^9$;
- термін служби, тобто гарантоване число спрацьовувань протягом певного часу експлуатації, умови якої оговорені.

На рисунку 14.6, а схематично показано реле з електромагнітом клапанного типу, на якому: 1-сердечник; 2-ярмо; 3-плата; 4 - висновки обмотки; 5 - висновки контактних груп; 6-упори; 7 - ізоляційний штифт; 8-пластини контактів; 9-12-контакти; 13-якір; 14-штифт відлипання; 15 - обмотка; 16 - каркас котушки.

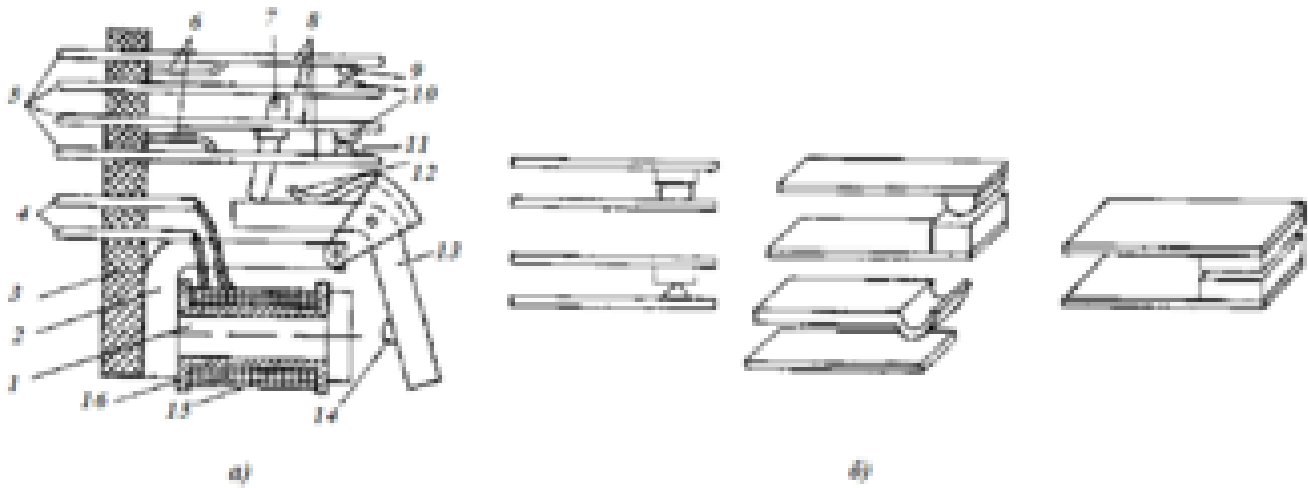


Рисунок 14.6 – Конструкція реле клапанного типу (а) та конструкція контактів (б)

Тягові і механічні характеристики і динамічні параметри електромагнітних реле

Щоб побудувати механічну характеристику електромагнітного реле, необхідно скласти протидіючі характеристики поворотної і всіх контактних пружин. За отриманою механічною характеристикою розраховують електромагніт з точки зору узгодження тягової і механічної характеристик електромагнітного реле.

Динаміка електромагніту і способи зміни його часових параметрів були описані вище. Узгодженням тягової і механічної характеристик домагаються отримання необхідних динамічних параметрів електромагнітного реле.

У першому наближенні електромагнітне реле за його динамічними властивостям можна представити як ланку чистого запізнювання, передавальна функція якого має вигляд виразу (4.25), де k і $t_{спр}$ - коефіцієнт передачі і час спрацювання реле відповідно.

Контактні системи реле

Контактну систему реле утворюють контакти, що безпосередньо розривають або замикають електричні кола; контактні пружини; утримувачі контактних пружин.

В електромагнітному реле одна з комутуючих деталей рухома. Незважаючи на ретельність обробки контактних поверхонь рухомого і нерухомого контактів (таку пару для стислості будемо називати рухомим контактом), струм між ними проходить тільки в окремих точках дійсного дотику, які, збільшуючись кількісно, звертаються в великі майданчики по мірі зростання контактного тиску (сил стиснення). Це обумовлює відносно велике значення перехідного опору рухомих контактів

$$R_{пер} = \varepsilon / Q^n, \quad (14.1)$$

де ε - константа, обумовлена матеріалом, формою контакту, способом обробки та станом контактних поверхонь; Q - контактний тиск (сила, що стискає контакти); n - показник ступеня, значення якого залежить від числа точок дотику, а останнє знаходиться в прямій залежності від умовної, геометричної площі контактування.

Перехідний опір залежить від температури і для міді може бути обчислений за формулою

$$R_{пер.гар} = R_{пер.хол} (1 + 0,67 \alpha \Theta), \quad (14.2)$$

де α - температурний коефіцієнт; Θ - перегрів.

Температура перегріву повинна бути нижче тої, що викликає розм'якшення матеріалу.

Залежно від форми контактування розрізняють точкові, лінійні і площинні контакти (рис. 14.6, б). У першому разі зіткнення контакт-деталей у вигляді двох сфер, сфери з площиною, вершини конуса з площиною і т. д. відбувається в одній точці-майданчику, у другому циліндр з циліндром, циліндр з площиною і т. п. стикаються не менше ніж у двох точках-майданчиках, розташованих на одній лінії, в третьому випадку контакт-деталі у вигляді двох поверхонь мають три або більше точки дотику. Багатоточкове контактування забезпечує більшу надійність і менший опір електричного з'єднання (електричного контакту).

Вибір матеріалу контактів повинен забезпечити виконання таких основних вимог; високі електро- і теплопровідність, температура плавлення, значення струму і напруги створення дуги, стійкість проти корозії, ерозії та створення плівок з великим електричним опором, оптимальна твердість як компроміс між необхідністю, з одного боку, високої твердості для зменшення механічного зносу, що викликається замиканням і розмиканням контактів, і, з іншого боку, малою твердості для зниження необхідного контактного тиску; простота обробки; низька вартість.

Під ерозією (електричним, фізичним зносом) контактів розуміють їх руйнування внаслідок перенесення, розплавлення, випаровування і розпилення часток металу з поверхонь контактів під час замикання і розмикання останніх і виникаючого при цьому газового розряду через пробій міжконтактного проміжку. Тліючий розряд виникає при відключенні струму менше 0,1 А при напрузі на контактах 250-300 В, мінімальний струм дуги для металів - порядку 0,5 А. При нагріванні контактів в середовищі, що містить кисень і сірку, на їх поверхнях можуть з'явитися оксидні і сульфідні плівки, що значно збільшують перехідний опір. Їх утворення і називають корозією контактів (хімічним зносом).

Доброю стійкістю проти корозії володіють благородні метали, тому малопотужні контакти виготовляють зі срібла (рідше із золота, платини і їх сплавів). Для більш потужних контактів їх використовувати не можна, так як їх стійкість проти ерозії недостатня. Тому при струмах 1-10 А застосовують контакти з твердих і тугоплавких металів (вольфраму, молібдену, їх сплавів з іридієм, платиною та ін.) і композицій, що одержані методами порошкової металургії (механічні суміші декількох металів нагрівають і пресують до спікання). Ще більш потужні контакти виготовляють з міді або металокерамічних матеріалів. Розроблені конструкції, які забезпечують притирання контактів для знищення оксидних і сульфідних плівок.

Для комутації струмів до 1 А застосовують точкові контакти, а маючі велику масу і, отже, більшу теплоємність лінійні контакти використовують в колах зі струмами до сотень ампер. У площинних контактів великі маса і поверхня охолодження дозволяють їх використовувати з допустимим нагрівом при струмах понад 1 кА.

Найважчий режим роботи контактів виникає при їх розмиканні: у міру ослаблення стиснення зростає перехідний опір, збільшується виділення тепла, нагрів контактів і прилеглих до них ділянок контактної системи; матеріал контактів може розплавитися; при розриві містка з рідкого металу з'являється іскра, а при великих токах і напрузі можлива поява дуги. При цьому майже вся електромагнітна енергія,

накопичена в колі, виділяється в дузі. Дуга характеризується великою щільністю струму і високою температурою в її каналі і опорних точках, а тому контакти руйнуються.

Нормальним прийнято вважати стан реле при знеструмленій обмотці. Значить, у реле, зображеного на рисунку 14.6, а, контакти 9-10 нормально розімкнуті, або замикаючі, а 10-11- нормально замкнуті, або розмикаючі. Розрізняють ще перемикаючі контакти, які складаються з двох нерухомих і одного розташованого між ними спільного рухомого контакту. Такий контакт у поляризованого реле з двохпозиційним налаштуванням (рисунк 14.7, а). Число контактів у одного реле може доходити до декількох десятків. Пружини 6 служать упорами для контактних пружин 8 (риунок 14.6, а). Вони гасять вібрації останніх після замикання і розмикання контактів, покращуючи процес комутації, забезпечують необхідний контактний тиск і відстань між створками контактів при меншому ході якоря, а також використовуються для настройки контактної системи шляхом зміни їх початкової деформації.

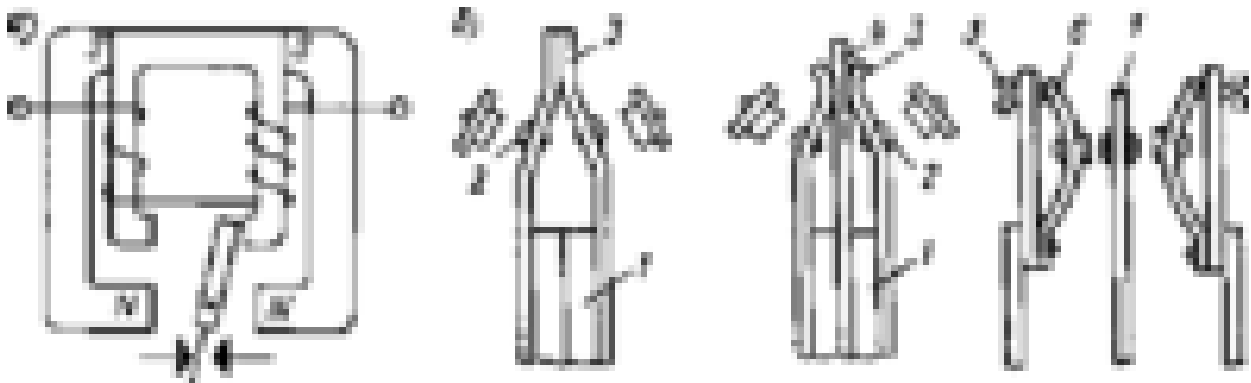


Рисунок 14.7 – Контакти електромагнітних реле

Контактні системи поляризованих реле представлені на рис. 14.7, б, де зліва направо показані: якір 1 з гнучким язичком, що складається з двох плоских бронзових пружин 3 з рухомими контактами 2 (вільні вигнуті кінці цих пружин тиснуть один на одного, внаслідок чого поглинається велика частина кінетичної енергії руху якоря при ударах рухомих контактів об нерухомі); якір з гнучким язичком з трьох пружин, причому третя, більш тонка, пружина 4, поверхня якої покрита тонким шаром срібла, служить для стабілізації в часі коефіцієнта тертя між двома контактними пружинами; якір з жорстким язичком і гнучким кріпленням нерухомих контактів (кінетична енергія якоря поглинається при терті кінців пружин 6 об опорні гвинти 5, тиск на які можна регулювати до зникнення брязкоту в контактах). Види налаштування поляризованих реле були детально розглянуті в підрозділі 3. 2.

Спеціальні електромагнітні реле

Віброперетворювачі

У віддалених пунктах і на рухомих об'єктах отримати постійну напругу 150-250 В досить важко. За допомогою віброперетворювачів цю задачу можна вирішити при наявності низьковольтних (2,5-12 В) акумуляторних батарейок.

Один зі способів уникнути труднощів посилення слабких сигналів постійного струму, пов'язаних з дрейфом нуля лампових і напівпровідникових підсилювачів

постійного струму, складається в їх перетворенні в змінну напругу, його посиленні і перетворенні в постійну напругу, тобто в модуляції, посиленні змінної напруги і її демодуляції. Використання для цих цілей віброперетворювачів забезпечує незначний дрейф нуля (порядку мікрвольт), високий вхідний опір (для посилення дуже слабких струмів потрібно вхідний опір порядку 10^9 Ом) і ресурс роботи, порівнянний з гарантованим терміном служби електронних ламп (2000- 3000 год). Вібратором називають швидкодіючий електромагнітний переривник або перемикач. На рисунку 14.8, а представлена схема віброінвертору на несинхронному (тобто з однією парою робочих контактів, що одночасно замикаються) вібраторі з пусковим контактом.

Суцільною лінією показана послідовно включена обмотка збудження, штриховою - паралельна (по відношенню до робочих контактам). Через розмикаючі пускові контакти **П** живиться обмотка збудження, внаслідок чого замикаються нижні робочі контакти **К_Н** та розмикаються пускові контакти **П** (при паралельному включенні обмотки вона шунтується контактом **К_Н**). Обмотка знеструмлюється, і якір, рухаючись під дією пружини у вихідне (нормальне) положення, за інерцією проскакує нейтраль і замикає верхні робочі контакти **К_В**. При цьому знову замикаються і пускові контакти **П**. Якір починає рух вниз, розмикаючи контакти **К_В** і **П**. Таким чином, середня точка трансформатора підключена до плюса батареї, а її мінус по чергово подається то на нижній, то на верхній кінці первинної обмотки трансформатора. Отже, у вторинній обмотці з частотою вібрації якоря індукуються змінна ЕРС. Цифрами **I-IV** вказана цоколювка.

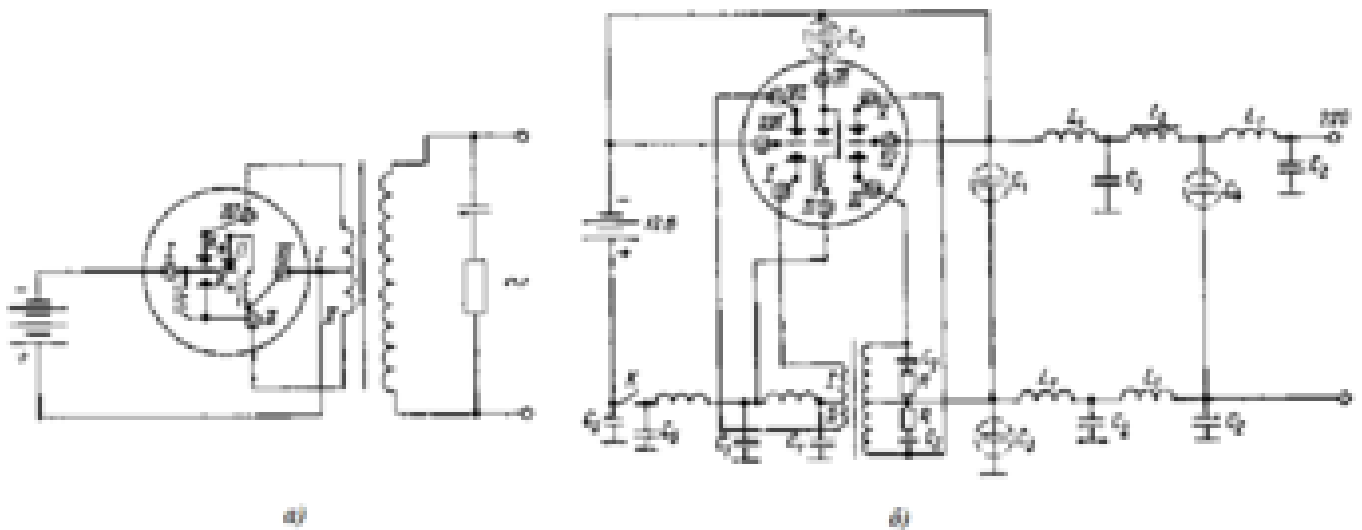


Рисунок 14.8 – Принципова схема віброінвертору (а) та віброперетворювача з двополуперіодним випрямленням (б)

На рисунку 14.8, б зображена схема віброперетворювача з двополуперіодним механічним випрямленням на синхронному вібраторі з двома парами робочих контактів, що одночасно замикаються. Коли замикаються дві нижні пари контактів I-VIII і III-IV, струм по первинній обмотці протікає від середньої точки до її верхнього кінця. У відповідності з принципом Ленца індукуються при цьому ЕРС у вторинній обмотці спрямована від її верхнього кінця до середньої точки, які і виводяться як плюс і мінус віброперетворювача. При замиканні двох верхніх пар контактів VII- VIII і IV-V струм у первинній обмотці трансформатора проходить від

середньої її точки до нижнього кінця. Значить, індукована ЕРС згідно з принципом Ленца має бути спрямована від нижнього кінця вторинної обмотки до її середньої точки, тобто середня точка вторинної обмотки весь час негативна по відношенню до початку і кінця вторинної обмотки, з яких за допомогою двох пар контактів III -IV і IV-V знімають «плюс» на вихід віброперетворювача. Ця пара контактів, працюючи синхронно з контактами I-VIII і VII-VIII, здійснює механічне випрямлення змінної напруги, що дозволяє усунути зі схеми напівпровідникові діоди.

До основних недоліків віброперетворювачів слід віднести істотно обмежену смугу пропускання сигналів, необхідність періодичного регулювання і обмежений ресурс роботи.

Контактори й магнітні пускачі

Контактором називають низьковольтний електричний апарат для дистанційного або автоматичного управління силовими електричними колами з частими включеннями і відключеннями. За родом комутованого струму розрізняють контактори постійного і змінного струмів. Крім головних, силових контактів є і допоміжні блок-контакти. У контакторів немає принципових відмінностей від електромагнітних реле, тому ми обмежимося розглядом контактора постійного струму КПВ-600, конструкція якого показана на рисунку 14.9, а.

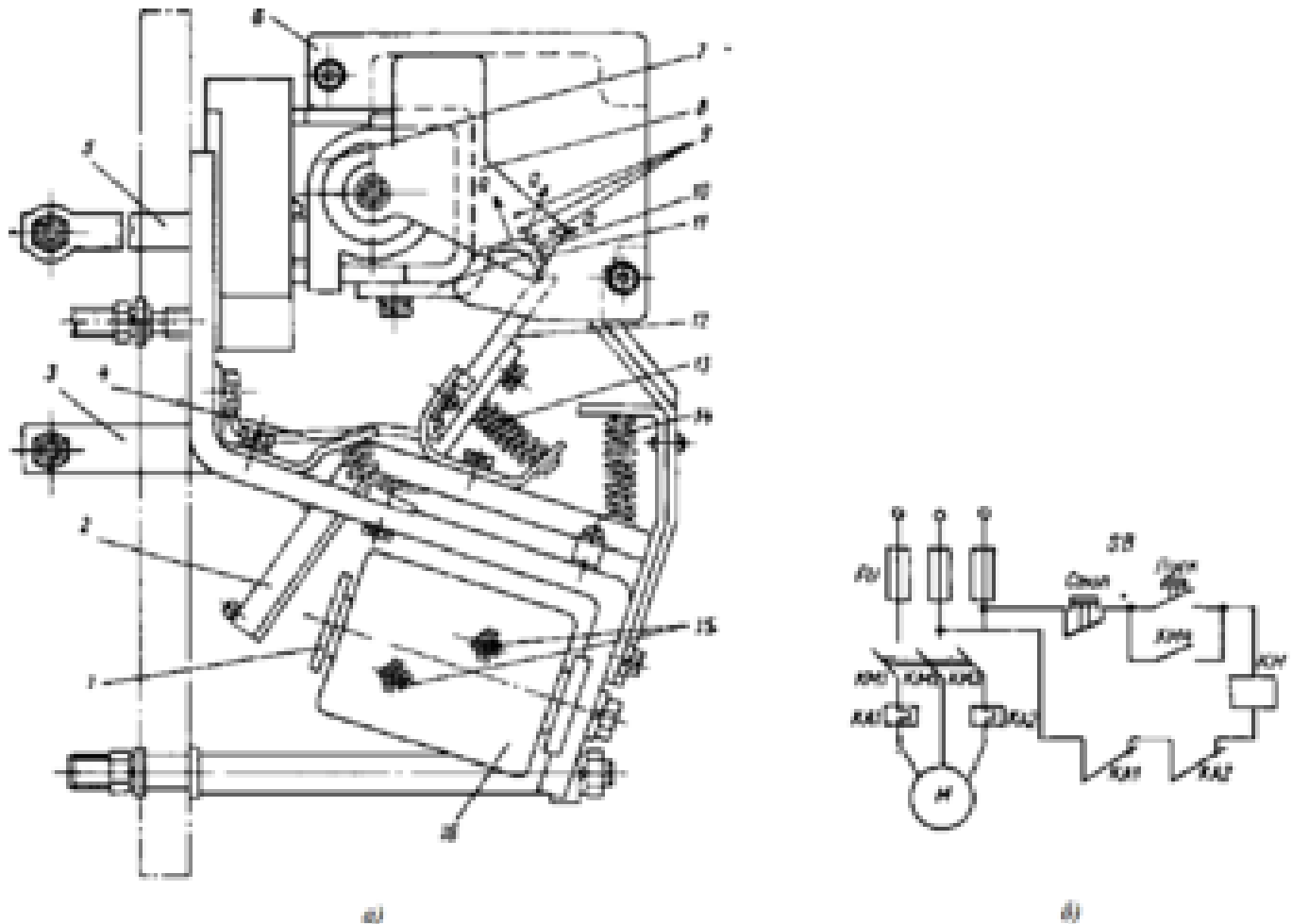


Рисунок 14.9 – Конструкція (а) та принципова схема (б) магнітного пускача

Струм в робочій котушці 16, що викликаний напругою на її виводах 15, створює тягове зусилля, і якір 2 прагне притягнутися до сердечника 1. Протидіюча

пружина 14 стискається. При правильно обраних значеннях тягового і протидіючого зусиль рухливий контакт 12 замикається з нерухомим 10. Їх виводи позначені цифрами 3 і 5. Пружина 13 своїм тиском гасить вібрації робочих контактів при їх замиканні і розмиканні, а поворотна пружина 14 після відключення струму робочої котушки 16 забезпечує вихідне положення якоря. Струм споживача, підключеного до затисків 3 і 5, протікає через контакти 12 і 10, гнучкий провідник 4, що з'єднує 12 і 3, дугогасильну котушку 7, що створює магнітне дуття (см. нижче). Інші цифрові позначення: 11-дуга, 8 - полюсні наконечники дугогасильного електромагніту (з котушкою 7), 9 - напрям магнітного поля дугогасильної котушки, 6 - азбоцементна дугогасильна камера. Стрілками Q позначені електродинамічні сили, що виникають від взаємодії струму дуги і поля дугогасильної котушки.

Магнітні пускачі - це контактори, призначені в основному для дистанційного оперативного управління двигунами малої та середньої потужності (2,5-75 кВт) при напругах 127, 220, 380 і 500 В змінного струму. Вони забезпечені тепловим захистом від перевантаження, блок-контактами для блокування і призначені для установки в пристроях, доступних і для некваліфікованого персоналу, тому, найчастіше усього, закриті захисним кожухом.

На рисунку 14.9, б показана принципова електрична схема магнітного пускача змінного струму з трьома силовими замикаючими контактами КМ1, КМ2 і КМ3 і блок-контактом КМ4, двома розмикаючими контактами КА 1 і КА2 теплового захисту і кнопками управління SB «Стоп» і «Пуск». При натисканні останньої по обмотці КМ тече струм. Пускач спрацьовує, підключаючи силовими контактами двигун М до трифазної мережі і здійснюючи електричне блокування кнопки «Пуск» її шунтуванням блок-контактом: двигун залишається включеним і після відпускання кнопки «Пуск». Відключається він натисканням кнопки «Стоп», що розриває коло обмотки пускача.

Тепловий захист здійснюється двома біметалічними тепловими реле КА1 і КА2. Рухомий контакт такого реле кріпиться на термобіметалічній платівці чи спіралі, що складаються з двох зварених або спаяних смуг металів з різними коефіцієнтами теплового розширення. Для підвищеної надійності теплового захисту нагрівальні елементи КА1 і КА2 включені у дві фази, а їх однойменні розмикаючі контакти в колі обмотки з'єднані послідовно. При тривалому перевантаженні двигуна М пластини (спіралі) КА1 і КА2 згинаються в бік металу з меншим коефіцієнтом теплового розширення і при достатньому нагріванні своїми рухливими розмикаючими контактами розривають коло обмотки КМ.

Блок-контакт КМ4 захищає двигун від надмірного зниження напруги мережі (нульовий захист): при визначеному його значенні струм в обмотці КМ знижується настільки, що розмикається блок-контакт КМ4, коло управління розривається і силові контакти відключають двигун. Після спрацьовування теплового або нульового захисту двигун включають натисканням кнопки «Пуск».

Кращі магнітні пускачі витримують 10-15 мільйонів включень без струму, до 2 мільйонів включень при максимальній потужності і 2000-3000 включень на годину.

Принцип дії дугогасильного пристрою постійного струму заснований на тому, щоб за допомогою теплового і (або) магнітного дуття розтягнути дугу, збільшити опір дугового проміжку і створити умови гасіння дуги. Теплове дуття здійснюється потоком повітря, нагрітого дугою 1 (рисунок 14.10), що підіймається вгору в

азбоцементній дугогасильній камері 2. Електромагніт з сердечником 3, дугогасильною обмоткою 4, що обтикається комутованим струмом, і полюсними наконечниками 5 у вигляді пластин, створює магнітне поле, перпендикулярне до площини рисунка. Якщо струм дуги спрямований зліва направо, як показано стрілкою, а магнітне поле «від нас» (см. хрестики), то за правилом лівої руки електродинамічна сила, що виникає від їх взаємодії, буде діяти вгору. дугогасильну котушку 4 включають послідовно з контактами. У колах постійного струму використовують і постійні магніти. Таким чином, спільна дія теплового і магнітного дуття розтягує дугу постійного струму і гасить її.

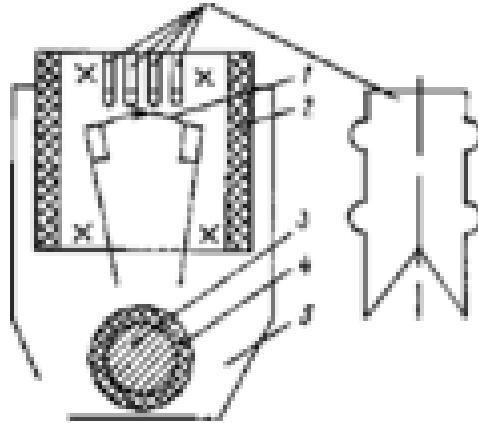


Рисунок 14.10 – Конструкція дугогасильного пристрою

Дуга змінного струму гасне двічі за період при переході струму через нуль. Щоб дуга не запалилась вдруге, її розбивають на ряд коротких ділянок.

На декількох ділянках дугу розбивають за допомогою феромагнітних пластин деіонної решітки 6 (праворуч зображена форма цих пластин) Набір останніх, встановлених поперек каналу дуги, і утворює деіонну решітку. У вирізах її пластин переміщається рухомий контакт і виникає дуга, яка, втягуючись в решітку, розбивається на ряд коротких дуг При першому ж переході через нуль дуга змінного струму гасне.

Геркони (герметизовані магнітокеровані контакти)

Герметизація традиційних реле створює більш сприятливі умови для роботи контактів, тому що істотно зменшується вплив зовнішнього середовища, але не оберігає від агресивних летючих речовин, що виділяються з деталей самих реле Найбільш вдале рішення бачиться в застосуванні герметизованих магнітокерованих контактах, скорочено званих герконами. Вони є елементами підвищеної надійності, широко вживаними в без'якірних реле, кінцевих, колійних та координатних перемикачах, датчиках положення і переміщення та ін.

Геркони можуть бути замикаючими, розмикаючими або перемикаючими; сухими (з твердими контактами) і рідино-металевими (з контактами, змоченими ртуттю, що дозволяє досягти найбільшої комутованої потужності (до 250 Вт) і максимальної зносостійкості (число вмикань 10^8), уникнути розривів керованого кола при вібрації контактів, стабілізувати їх перехідні опори, формувати сигнали з наносекундним фронтом та ін.), нейтральними і поляризованими, язичковими, мембранними, з жорстким рухомим контактним сердечником та поворотною пружиною і без неї .

Найпростіший геркон (рисунок 14.11, а) складається з двох пластин або стрижнів 3 з пермалою (іноді ковару), званих контактними сердечниками і заварених в скляну трубку 2 діаметром 2-5,5 мм, яка після виготовлення геркона являє собою герметизований балон довжиною 7,5-50 мм. У ньому або створюється розрідження (10^{-2} - 10^{-4} Па), або він заповнюється інертними газами (азотом, аргоном, гелієм, воднем, азотоводною сумішшю та ін.), причому тиск усередині балона або менше атмосферного ($0,35\text{--}0,8$) 10^5 Па, або підвищений (до декількох десятків мегапаскалів). Поверхні 4 контактних сердечників з покриттям із золота, срібла, родію, паладію та інших металів і сплавів на основі золота (у високовольтних герконах - з тугоплавких металів: вольфраму, молібдену та ін.) Являють собою власне контакти. Зовнішні висновки 1 служать для приєднання до керованого електричного кола.

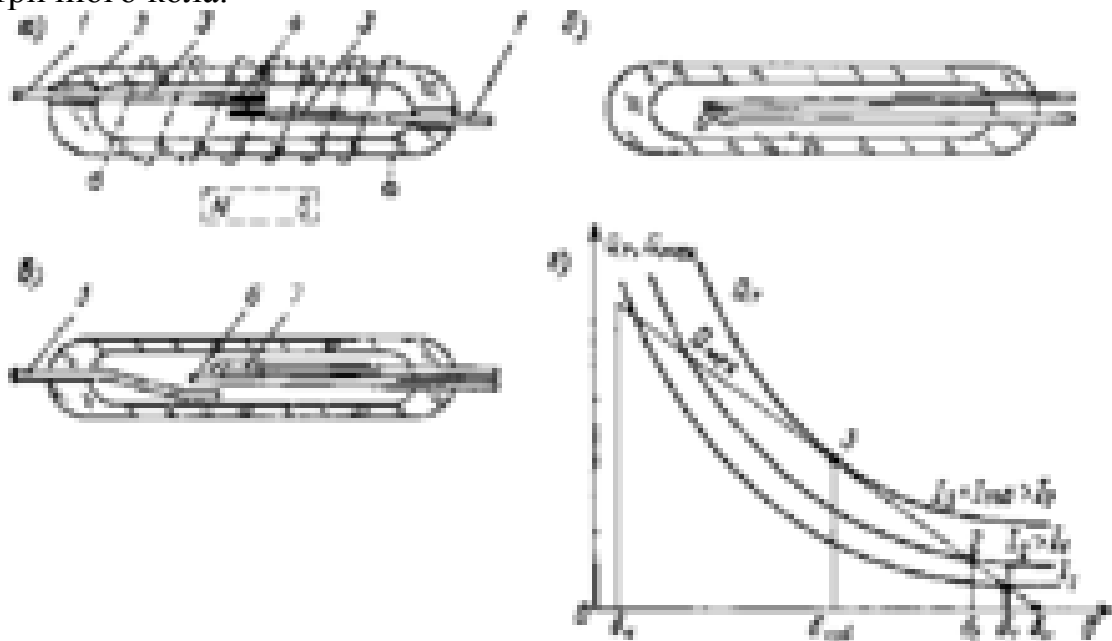


Рисунок 14.11 – Конструкції і характеристики герконів

Якщо помістити геркон в соленоїд, то магнітний потік пройде по пластинах 3, вийде з боку одного з виводів 1, пройде двома симетричними шляхами по повітрю і увійде в пластини з боку іншого виводу 1. У зазорі між пластинами створюється тягове зусилля, що притягує їх один до одного і замикає контакти внаслідок виникнення на них різнойменних полюсів (N та S).

Якщо прийняти довжину соленоїда дорівнює довжині трубки l , перекриття пластин позначити a , їх ширину - b , то з урахуванням того, що в розглянутому герконі середня силова лінія проходить по повітрю ділянку довжиною не δ , а $\delta + l$, отримаємо

$$Q_T = (\omega f)^2 \mu_0 ab / [2(\delta + l)^2] . \quad (14.3)$$

Таким чином, у розглянутому герконі пластини 3 виконують функції ділянки магнітопроводу, вимикаючих пружин, ділянки керованого електричного кола і контактів. Тому пластини 3 називають контактними сердечниками. Геркони з консольне закріпленими контактними сердечниками, що вигинаються під дією магнітного поля, називають язичковими.

Таке поєднання декількох функцій контактними сердечниками в язичкових і мембранних герконах (в останніх рухливий контактний сердечник виконується у вигляді мембрани) можливе лише при підборі матеріалів, що забезпечують: досить

низький електричний опір - замкнутих язичкових магнітокерованих контактів при необхідних для надійної роботи контактному натисканні, стійкості до вібрацій і ударних навантажень, невеликі індуктивність і ємність при комутації струмів високої частоти.

Деякі язичкові геркони дозволяють комутувати струми 10^{-10} - 10^{-12} А і напруги до 10^{-6} В, будучи перспективними елементами для комутації сигналів дуже низьких рівнів.

Розглянутий найпростіший геркон з замикаючими контактами може управлятися не тільки обмоткою, що живиться постійним струмом, а й полем постійного магніту (рисунок 14.11, а).

На відміну від його послідовної магнітної системи у геркона, показаного на рисунок 14.11, б, вона паралельна і дозволяє реалізувати розмикаючі контакти: обидва контактних сердечники намагнічуються в одному напрямку і на їх кінцях виникають однойменні полюси, що взаємно відштовхуються. На рисунку 14.11, в зображений геркон з послідовно-паралельною, або змішаною магнітною системою. Вона реалізує перемикаючі контакти при найменшій МРС спрацьовування, оскільки рухливий контактний сердечник 6 відчуває відштовхування від контактного сердечника 7 і притягне зусилля до контактного сердечника 5.

Сухі язичкові геркони в загальному характеризуються наступними експлуатаційними параметрами: максимальний час спрацьовування при полуторній - подвійній МРС спрацьовування з урахуванням часу брязкоту 0,8-3 мс; максимальний час відпускання 0,3-2,5 мс ; вібростійкість при впливі частот 200-3000 Гц і прискорень 5-25 g ; маса 0,2-4 г; робочий діапазон температур довкілля -60 - 150 ° С; МРС спрацьовування при поміщенні в соленійд 15-200 А.

Крім розглянутих послідовної, паралельної і змішаної в герконових реле застосовують диференціальні і мостові магнітні системи; за допомогою декількох обмоток на герконах реалізують різні логічні функції; розроблені різноманітні схеми силових герконів (герсіконів), герконів з пам'яттю, запам'ятовуванням (гезаконів), багатоконтактних герконів, герконів, керованих за допомогою магнітних шторок, порошкових герконів, герконів для передачі світлових потоків та ін.

На відміну від умови спрацьовування звичайного електромагнітного реле для початку руху контактних сердечників геркона не потрібно, щоб тягове зусилля переважало протидіюче в точці найбільшого, початкового зазору δ_{II} : рух контактних сердечників починається з появою струму в обмотці. Виникає тягове зусилля, долаючи силу пружності контактних сердечників, зближує їх. Для трьох різних значень струму $I_1, I_2 > I_1$ та $I_3 = I_{СПР} > I_2$ в обмотці геркона на рис. 14.11, г показані стійкі положення $\delta_1, \delta_2, \delta_{СПР}$ контактних сердечників, які визначаються рівністю тягового Q_T та протидіючого $Q_{МЕХ}$ зусиль. До $\delta = \delta_{СПР}$ відбувається попереднє зближення контактних сердечників, а при $\delta < \delta_{СПР}$ тягова характеристика $Q_T(\delta)$ навіть при постійному струмі $I_3 = I_{СПР}$ проходить вище механічної $Q_{МЕХ}(\delta)$, торкаючись її при «зазорі спрацьовування» $\delta = \delta_{СПР}$. Відбувається різкий перехід від $\delta_{СПР}$ до δ_K , званий «зривом».

Герконні (герконові, з магнітокерованими контактами, без'якірні, язичкові) реле в загальному випадку можуть мати кілька контактів і обмоток, зовнішні магнітопроводи, поляризуючі постійні магніти, екрани від впливу зовнішніх

магнітних полів та інші конструктивні елементи. Широко поширені реле з магнітокерованими контактами, розташованими всередині котушки, по якій протікає постійний струм. Внутрішнє розташування герконів доцільно, якщо їх не більше семи, так як збільшення розмірів і маси котушки, викликаючи підвищену витрату міді, практично не збільшує її МРС. У такому випадку застосовують зовнішнє розміщення герконів, яке може бути пакетним (в одній площині) і кільцевим. Іноді обмотки герконових реле виконують напильням. Одним із способів збільшення надійності реле служить герметизація його обмотки.

На базі герметизованих магнітокерованих контактів крім реле створено безліч перемикачів, програмно-часових і розподільних пристроїв, датчиків, цифрових пристроїв і перетворювачів постійного струму в змінний.

Фериди

Фериди - це герметизовані магнітокеровані контакти з елементами магнітної пам'яті. На відміну від герконів, що виконують функцію пам'яті за допомогою постійних магнітів і керуючих сигналів тривалістю десяти частки-одиниці мілісекунд, в феридах тривалість останніх зменшена до десятків мікросекунд.

Все різноманіття схемних і конструктивних виконань феридів можна розділити на дві групи: фериди з зовнішнім і внутрішнім елементами пам'яті (останні називають гезаконами). Зовнішнім елементом пам'яті служить феромагнітний сердечник, розташований поза трубкою геркона, а внутрішнім - контактні сердечники або їх частини, що виконуються з матеріалів з прямокутною петлею гістерезису (ППГ) і високим значенням H_c . У феридах обох груп, виключаючи керовані за допомогою постійних магнітів, операції з пам'яттю виробляються імпульсами, які подаються в обмотки.

Найпростіший послідовний ферид з однією обмоткою, керований різнополярними імпульсами, представлений на рисунку 14.12, а.

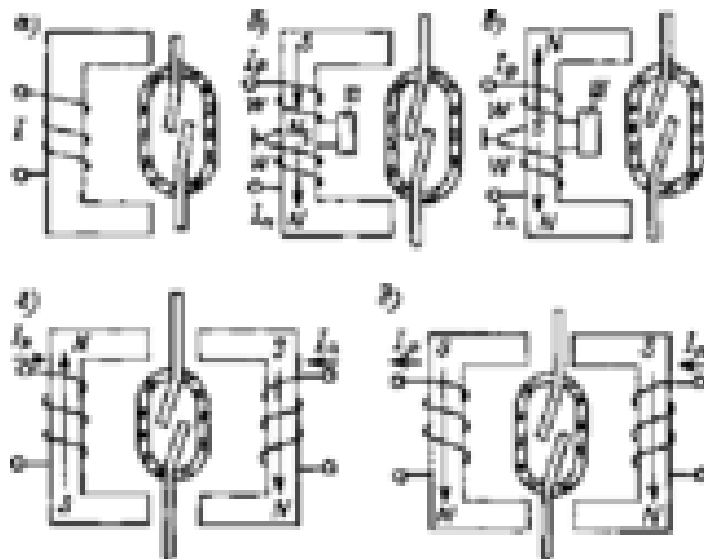


Рисунок 14.12 – Конструкції феридів

Подача імпульсу включення, достатнього для замикання контактів, призводить до намагнічування зовнішнього елемента пам'яті (сердечника) і збереженню досягнутого стану і після закінчення імпульсу. Контакти розмикаються під впливом імпульсу виключення протилежної полярності, що розмагнічує елемент

пам'яті (управління реверсним струмом). Такий ферид критичний до значення МРС відпускання: якщо воно менше необхідного, то сердечник розмагнічується недостатньо і контакти залишаються замкнутими якщо ж більше необхідного, то сердечник перемагнічується в протилежному напрямку і контакти знову-таки не можуть розімкнутися. Щоб запобігти цьому, фериди виконують з послідовною або паралельної системами елементів магнітної пам'яті і двома керуючими обмотками або застосовують диференціальне управління.

На рисунку 14.12, б, в, де буквою Ш позначений магнітний шунт, і на рисунку 14.12, г, д показані фериди відповідно з послідовною і паралельною системами елементів магнітної пам'яті. Тут використовується адитивне, або підсумовуюче, управління: кожна обмотка створює магнітний потік, недостатній для спрацьовування, але дія двох обмоток забезпечує достатній потік. Спрацьовування і відпускання відбувається при різній полярності сигналу I_p . Функцію струму I_{II} може виконувати постійний магніт.

Релейні підсилювачі володіють рядом вельми цінних позитивних рис, а саме:

- можливість отримання великих вихідних потужностей, які визначаються граничною потужністю, що комутують контакти;
- високий коефіцієнт посилення за потужністю;
- високий ККД, бо втрати в контактах та в колі управління малі;
- малі маса, габарити, простота конструкції;
- достатньо висока швидкодія.

Недоліки релейних підсилювачів:

- суттєва нелінійність статичних характеристик при роботі підсилювача в релейному режимі;
- ненадійна робота контактів, особливо в умовах тряски, вібрацій, дії перенавантажень;
- високий рівень власних низькочастотних перешкод.

14.4 ЕЛЕКТРОННІ ПІДСИЛЮВАЧІ

Електронний підсилювач - підсилювач електричних сигналів, в підсилювальних елементах якого використовується явище електричної провідності в газах, вакуумі і напівпровідниках. Електронний підсилювач може являти собою як самостійний пристрій, так і блок (функціональний вузол) у складі якої-небудь апаратури - радіоприймача, магнітофона, вимірювального приладу і т. д.

14.4.1 Загальні відомості

Підсилювач являє собою в загальному випадку послідовність каскадів посилення (бувають і однокаскадні підсилювачі), з'єднаних між собою прямими зв'язками.

У більшості підсилювачів, крім прямих, присутні і зворотні зв'язки (міжкаскадні і внутрикаскадні). Негативні зворотні зв'язки дозволяють поліпшити стабільність роботи підсилювача і зменшити частотні і нелінійні спотворення сигналу. У деяких випадках зворотні зв'язки включають термозалежні елементи (термістори, позистори) - для температурної стабілізації підсилювача або частотнозалежні елементи - для вирівнювання частотної характеристики.

Деякі підсилювачі (зазвичай УВЧ радіоприймальних і радіопередавальних пристроїв) оснащені системами автоматичного регулювання посилення (АРУ) або

автоматичного регулювання потужності (АРМ). Ці системи дозволяють підтримувати приблизно постійний середній рівень вихідного сигналу при змінах рівня вхідного сигналу.

Між каскадами підсилювача, а також в його вхідних і вихідних колах, можуть включатися атенюатори або потенціометри - для регулювання посилення, фільтри - для формування заданої частотної характеристики і різні функціональні пристрої - нелінійні та ін.

Як і в будь-якому активному пристрої, в підсилювачі також присутнє джерело первинного чи вторинного електроживлення (якщо підсилювач являє собою самостійний пристрій) або кола, через які напруги подаються з окремого блоку живлення.

Каскад підсилення - щабель підсилювача, що містить один або кілька підсилювальних елементів, кола навантаження і зв'язку з попередніми чи наступними ступенями.

В якості підсилюючих елементів зазвичай використовуються електронні лампи або транзистори (біполярні, польові), іноді, в деяких особливих випадках, можуть застосовуватися і двополюсники, наприклад, тунельні діоди (використовується властивість негативного опору) та ін. Напівпровідникові підсилювальні елементи (а іноді й вакуумні) можуть бути не тільки дискретними (окремими) але й інтегральними (у складі мікросхем), часто в одній мікросхемі реалізується повністю закінчений підсилювач.

Залежно від способу включення підсилювального елемента розрізняються каскади із загальною базою, загальним емітером, загальним колектором (емітерний повторювач) (у біполярного транзистора), із загальним затвором, загальним витоком, загальним стоком (стоковий повторювач) (у польового транзистора) і з загальною сіткою, загальним катодом, загальним анодом (у ламп).

Каскад із загальним емітером (витоком, катодом) - найбільш поширений спосіб включення, дозволяє підсилювати сигнал по струму і напрузі одночасно, зрушує фазу на 180° , тобто є інвертуючим.

Каскад із загальною базою (затвором, сіткою) - підсилює тільки за напругою, застосовується рідко, є найбільш високочастотним, фаза не змінюється.

Каскад із загальним колектором (стоком, анодом) - називається також повторювачем (емітерним, стоковим, катодним), підсилює струм, залишаючи напругу сигналу рівною вхідній. Застосовується в якості буферного підсилювача. Важливими властивостями повторювача є його високий вхідний і низький вихідний опору, фаза не змінюється.

Каскад з розподіленням навантаженням - каскад, що займає проміжне положення між схемою включення з загальним емітером і загальним колектором. Як варіант каскаду з розподіленням навантаженням, вихідний каскад підсилювача потужності «двухподвес». Важливими властивостями є задається елементами схеми фіксований коефіцієнт посилення по напрузі і низькі нелінійні спотворення. Вихідний сигнал диференційний.

Каскодний підсилювач - підсилювач, що містить два активних елемента, перший з яких включений за схемою з загальним емітером (витоком, катодом), а другий - за схемою із загальною базою (затвором, сіткою). Каскодний підсилювач володіє підвищеною стабільністю роботи і малої вхідний ємністю. Назва підсилювача походить від словосполучення «каскад через катод».

Каскади посилення можуть бути однотактним і двотактними.

Однотактний підсилювач - підсилювач, в якому вхідний сигнал надходить у вхідне коло одного підсилювального елемента або однієї групи елементів, з'єднаних паралельно.

Двотактний підсилювач - підсилювач, в якому вхідний сигнал надходить одночасно у вхідні кола двох підсилювальних елементів або двох груп підсилювальних елементів, з'єднаних паралельно, із зсувом по фазі на 180° .

Режими (класи) потужних каскадів

Особливості вибору режиму потужних каскадів пов'язані із завданнями підвищення економічності живлення і зменшення нелінійних спотворень.

Залежно від способу розміщення початкової робочої точки підсилювального приладу на статичних та динамічних характеристиках розрізняють наступні режими посилення (рисунок 14.13)



Рисунок 14.13 - Режими посилення : а) режим А, струм спокою становить $1/2$ максимального; б) режим В, струм спокою становить 1-3% від максимального; в) режим С, нульовий струм спокою; г) режим С, двотактний каскад

Класифікація

За видом посиленого сигналу

- аналогові підсилювачі (аналоговий вхідний сигнал без цифрового перетворення посилюється аналоговими підсилювальними каскадами. Вихідний аналоговий сигнал без цифрового перетворення подається на аналогову навантаження);
- цифрові підсилювачі (після аналогового посилення вхідного аналогового сигналу аналоговими підсилювальними каскадами до величини, достатньої для аналого-цифрового перетворення аналого-цифровим перетворювачем (АЦП, ADC), відбувається аналого-цифрове перетворення аналогової величини (напруги) в цифрову величину - число (код), відповідний величині напруги вхідного аналогового сигналу. Цифрова величина (число, код) або безпосередньо подається через буферні керуючі підсилювальні каскади на цифровий вихідний виконавчий пристрій, або подається на потужний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП, DAC), потужний аналоговий вихідний сигнал якого подається на аналоговий вихідний виконавчий пристрій.).

Види підсилювачів по елементній базі

- Ламповий підсилювач - підсилювач, підсилювальними елементами якого служать електронні лампи
- Напівпровідниковий підсилювач - підсилювач, підсилювальними елементами якого служать напівпровідникові прилади (транзистори, мікросхеми та ін.)

- Гібридний підсилювач - підсилювач, частина каскадів якого зібрана на лампах, частина - на напівпровідниках
- Квантовий підсилювач - пристрій для посилення електромагнітних хвиль за рахунок вимушеного випромінювання збуджених атомів, молекул або іонів.

Види підсилювачів за діапазоном частот

- Підсилювач постійного струму (ППС) - підсилювач повільно мінливих вхідних напруг або струмів, нижня гранична частота яких дорівнює нулю. Застосовується в автоматичній, вимірювальній та аналоговій обчислювальній техніці.
- Підсилювач низької частоти (УНЧ, підсилювач звукової частоти, УЗЧ) - підсилювач, призначений для роботи в області звукового діапазону частот (іноді також і нижньої частини ультразвукового, до 200 кГц). Використовується переважно в техніці звукозапису, звуковідтворення, а також в автоматичній, вимірювальній та аналоговій обчислювальній техніці.
- Підсилювач високої частоти (УВЧ, підсилювач радіочастоти, УРЧ) - підсилювач сигналів на частотах радіодіапазону. Застосовується переважно в радіоприймальних і радіопередавальних пристроях в радіозв'язку, радіо- і телевізійного мовлення, радіолокації, радіонавігації та радіоастрономії, а також у вимірювальній техніці і автоматичній
- Імпульсний підсилювач - підсилювач, призначений для посилення імпульсів струму або напруги з мінімальними спотвореннями їх форми. Вхідний сигнал змінюється настільки швидко, що перехідні процеси в підсилювачі є визначальними при знаходженні форми сигналу на виході. Основною характеристикою є імпульсна передавальна характеристика підсилювача. Імпульсні підсилювачі мають дуже велику смугу пропускання: верхня гранична частота декількох сотень кілогерц - кількох мегагерц, нижня гранична частота зазвичай від нуля герц, але іноді від декількох десятків герц, в цьому випадку постійна складова на виході підсилювача відновлюється штучно. Для точної передачі форми імпульсів підсилювачі повинні мати дуже малі фазові та динамічні спотворення. Оскільки, як правило, вхідна напруга в таких підсилювачах знімається з широтно-імпульсних модуляторів (ШІМ), вихідна потужність яких становить десятки мільватт, то вони повинні мати дуже великий коефіцієнт посилення по потужності. Застосовуються в імпульсних пристроях радіолокації, радіонавігації, автоматики та вимірювальній техніці.

Види підсилювачів за смугою частот

- Широкосмуговий (аперіодичний) підсилювач - підсилювач, що дає однакове посилення в широкому діапазоні частот
- Смуговий підсилювач - підсилювач, що працює при фіксованій середній частоті спектра сигналу і приблизно однаково підсилює сигнал в заданій смузі частот
- Селективний підсилювач - підсилювач, у якого коефіцієнт посилення максимальний в вузькому діапазоні частот і мінімальний за його межами

Види підсилювачів за типом навантаження

- з резистивним;
- з ємнісним;

- з індуктивним;
- з резонансним;
- з вихідним трансформатором.

Спеціальні види підсилювачів

- Диференціальний підсилювач - підсилювач, вихідний сигнал якого пропорційний різниці двох вхідних сигналів, має два входи і, як правило, симетричний вихід.
- Операційний підсилювач - багатокаскадний підсилювач постійного струму з великими коефіцієнтом посилення і вхідним опором, диференціальним входом і несиметричним виходом з малим вихідним опором, призначений для роботи в пристроях з глибоким негативним зворотним зв'язком.
- Інструментальний підсилювач - призначений для завдань, що вимагають прецизійного посилення з високою точністю передачі сигналу
- Масштабний підсилювач - підсилювач, що змінює рівень аналогового сигналу в задане число раз з високою точністю
- Логарифмічний підсилювач - підсилювач, вихідний сигнал якого приблизно пропорційний логарифму вхідного сигналу
- Квадратичний підсилювач - підсилювач, вихідний сигнал якого приблизно пропорційний квадрату вхідного сигналу
- Інтегруючий підсилювач - підсилювач, сигнал на виході якого пропорційний інтегралу від вхідного сигналу
- Інвертуючий підсилювач - підсилювач, що змінює фазу гармонічного сигналу на 180° або полярність імпульсного сигналу на протилежну (інвертор)
- Парафазний (фазоінверсний) підсилювач - підсилювач, застосовуваний для формування двох протифазних напруг
- Малошумливий підсилювач - підсилювач, в якому прийнятті спеціальні заходи для зниження рівня власних шумів, здатних вуалювати підсилюваний слабкий сигнал
- Ізолюючий підсилювач - підсилювач, в якому вхідні і вихідні кола гальванічне ізолювані. Служить для захисту від високої напруги, яка може бути подана на вхідні кола, і для захисту від перешкод, що поширюються по колах заземлення

Деякі функціональні види підсилювачів.

- Попередній підсилювач (передпідсилювач) - підсилювач, призначений для посилення сигналу до величини, необхідної для нормальної роботи крайового підсилювача.
- Крайовий підсилювач (підсилювач потужності) - підсилювач, що забезпечує при певній зовнішньої навантаженні посилення потужності електромагнітних коливань до заданого значення.
- Підсилювач проміжної частоти (ППЧ) - вузькосмуговий підсилювач сигналу певної частоти (456 кГц, 465 кГц, 4 МГц, 5,5 МГц, 6,5 МГц, 10,7 МГц та ін.), Що надходять з перетворювача частоти радіоприймача.
- Резонансний підсилювач - підсилювач сигналів з вузьким спектром частот, що лежать в смузі пропускання резонансної ланцюга, що є його навантаженням.
- Відеопідсилювач - імпульсний підсилювач, призначений для посилення відеоімпульсів складної форми широкого спектрального складу. Незважаючи на назву, застосовується не тільки в відео- та телевізійній техніці, але і в

радіолокації, обробці сигналів з різних детекторів, модемах, та ін. Принциповою особливістю даного підсилювача є працездатність аж до 0 Гц (постійний струм). Також сигнал даного спектра зазвичай називають відеосигналом, навіть якщо він не має ніякого відношення до передачі зображення.

- Підсилювач магнітного запису - підсилювач, навантажений на записувальну магнітну голівку.
- Підсилювач відтворення - малoshумний підсилювач електричних сигналів, що надходять з відтворюючої магнітної головки магнітофона, відеоманітофона, флорпі-дисковода, жорсткого диска, або з фотодіода в системах відтворення оптичної сигналограми (звукочитувальна система кінопроектора, оптичні диски). Як і підсилювач записи, містить ланцюга частотної корекції, щоб забезпечити максимально можливу лінійність АЧХ тракту запису-відтворення.
- Мікрофонний підсилювач - підсилювач електричних сигналів звукових частот, що надходять з мікрофона, до значення, при якому їх можна обробляти і регулювати. Професійні мікрофонні підсилювачі мають диференційний вхід (балансне підключення, роз'єми XLR) для зниження наведень і перешкод.
- Підсилювач-коректор (коригувальний підсилювач) - електронний пристрій для зміни параметрів відео- або аудіосигналу. Підсилювач-коректор відеосигналу, наприклад, дає можливість регулювання насиченості кольору, колірною тону, яскравості, контрастності і дозволу, підсилювач-коректор аудіосигналу призначений для посилення і корекції сигналів від звукознімача програвача грамофонних платівок, бувають і інші види підсилювачів-коректорів ,

Підсилювачі в якості самостійних пристроїв

- Підсилювачі звукової частоти
- Підсилювачі звукової частоти для систем проводового мовлення.
- Підсилювачі звукової частоти для озвучування відкритих і закритих просторів.
- Побутові підсилювачі звукової частоти. У цій групі пристроїв найбільший інтерес представляють підсилювачі високої вірності відтворення Hi-Fi та найвищої вірності високого класу. Розрізняються підсилювачі попередні, кінцеві (підсилювачі потужності) і повні, що поєднують в собі властивості попередніх і кінцевих.
- Вимірювальні підсилювачі - призначені для посилення сигналів у вимірювальних цілях.
- Підсилювачі біопотенціалів - різновид вимірювальних підсилювачів, використовуються в електрофізіології.
- Антенні підсилювачі - призначені для вимірювань слабких сигналів з антени перед подачею їх на вхід радіоприймача, бувають двонаправлені підсилювачі (для прийомо-передавальних пристроїв), вони посилюють також сигнал, що надходить з кінцевого каскаду передавача на антену. Антенний підсилювач встановлюється зазвичай безпосередньо на антені або поблизу від неї.

Контрольні питання і завдання до глави 14

1. Призначення, класифікація, основні характеристики підсилюючих пристроїв.
2. Який принцип дії мають магнітні підсилювачі? Наведіть їх класифікацію.
3. Який принцип дії мають електромеханічні підсилювачі? Наведіть їх класифікацію.
4. Наведіть класифікацію електронних підсилювачів.

Розділ 5. ВИКОНАВЧІ УСТРОЇ САУ

Глава 15. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ УСТРОЇ АВТОМАТИКИ

15.1 ЕЛЕКТРОМАГНІТИ

Електромагнітом називається джерело магнітного поля, що складається із сердечника (магнітом' якого феромагнітного матеріалу) та обмотки, по якій протікає струм.

Електромагніти широко застосовуються в різних електромагнітних механізмах (електромеханічних пристроях), дія яких відбувається внаслідок тяжіння рухомої феромагнітної частини пристрою (якоря) до нерухомої частини (сердечника) магнітопроводу. Подібні механізми (пристрої) також називають ЕМ.

У системах автоматики ЕМ застосовують в якості чутливих, проміжних і виконавчих елементів, пред'являючи в кожному випадку певні вимоги до їх чутливості, стабільності нуля, лінійності і стабільності характеристик «вхід-вихід», значенням потужності і ККД.

За родом струму в обмотці розрізняють ЕМ постійного і змінного струмів. ЕМ постійного струму, в свою чергу, підрозділяють на нейтральні, які не реагують на полярність вхідного сигналу, і поляризовані, у яких напрямок переміщення якоря визначається полярністю керуючої напруги.

15.2.1. Нейтральні електромагніти

Будь-який нейтральний ЕМ за конструктивним виконанням (способом дії) може бути віднесений до однієї з п'яти груп: 1) ЕМ клапанного типу; 2) ЕМ з втяжним якорем (ЕМ соленоїдного типу, прямо ходовий ЕМ, втяжний ЕМ); 3) ЕМ з поперечним рухом якоря; 4) електромагнітні пропорційні керуючі елементи (балансні електромагнітні системи, електромагнітні виконавчі пристрої); 5) ЕМ з поворотним якорем.

Клапанний ЕМ наведений на рисунку 15.1.

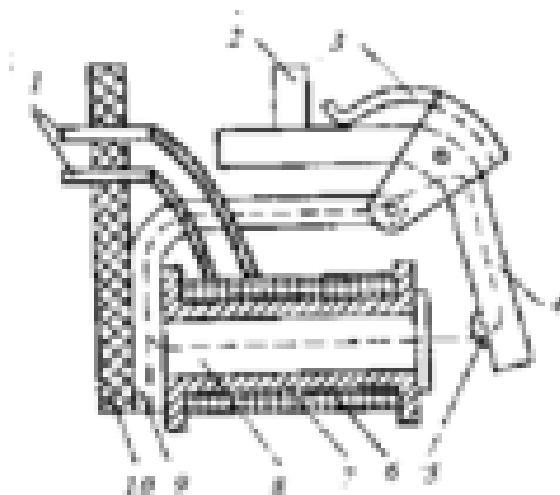


Рисунок 15.1 – Електромагніт клапанного типу

Він складається з сердечника 8 – частини магнітопроводу, на якому розміщена обмотка, ярма (корпусу) 9, тобто решти нерухомої частини магнітопроводу і якоря 4

- рухомої ділянки магнітопроводу. ярмо закріплене на платі 10, на якій розташовані висновки 1 обмотки (котушки) 6, навитої на каркасі 7. Штифт відлипання 5 не дозволяє якорю залишатися притягнутим до сердечника після зняття вхідної напруги під дією залишкового потоку. У вихідне положення при знеструмленні обмотки ярмо приходить під дію поворотної пружини 3. Цифрою 2 позначений штовхач для впливу, наприклад, на контактну систему.

На рисунку 15.2 наведені конструкції електромагнітів різних типів.

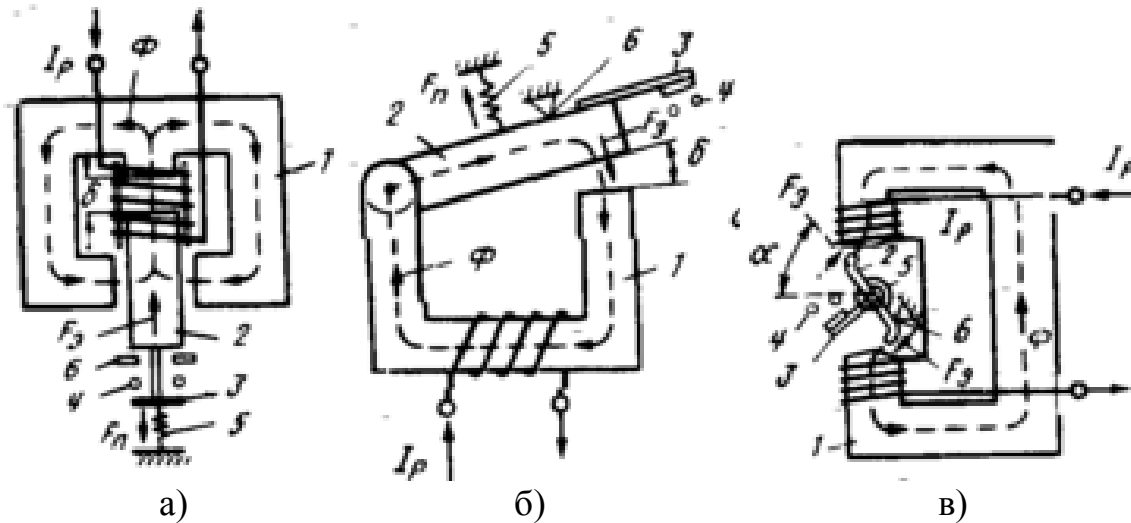


Рисунок 15.2 – Втяжний ЕМ (а), з поворотним якорем (б), з поперечним рухом якоря (в)
1- електромагніт (зі сталевго магнітопроводу та обмотки), 2 – сталева рухома система (якір),
3 – рухомий контакт, 4 – нерухомі контакти, 5 - протидіюча пружина

На рисунку 15.3 зображена конструкція балансного електромагніту

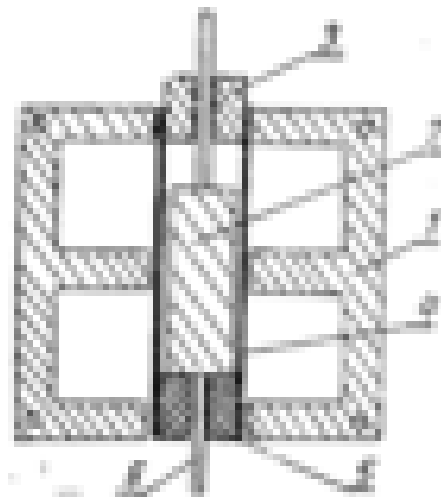


Рисунок 15.3 – Балансний ЕМ

1 – магнітопровід, 2 – ярмо, 3 – упор, 4 – латунна обойма з прорізом, 5 – гетинаксовий сухар, 6 – шток

15.2.2 Електромагніти змінного струму

Якір ЕМ притягається до сердечника і при подачі в обмотку змінного струму. Форма тягової характеристики ЕМ змінного струму залежить від співвідношення активного і індуктивного опорів кола його обмотки. В деякі моменти часу тягове зусилля обертається в нуль. При наявності протидіючої сили, що прагне відірвати якір від сердечника це може привести до вібрації якоря, яке викликає підвищений знос та шум. Одним з ефективних засобів зменшення вібрації якоря є зменшення пульсацій за допомогою магнітних екранів (короткозамкнених витків), що охоплюють частину перетину сердечника. Можна також використовувати двох - або трьохфазний електромагніт в яких струми зрушені по фазі.

Поляризовані електромагніти (ПЕМ).

Розрізняють три основні конструктивні схеми ПЕМ (рисунок 15.4):

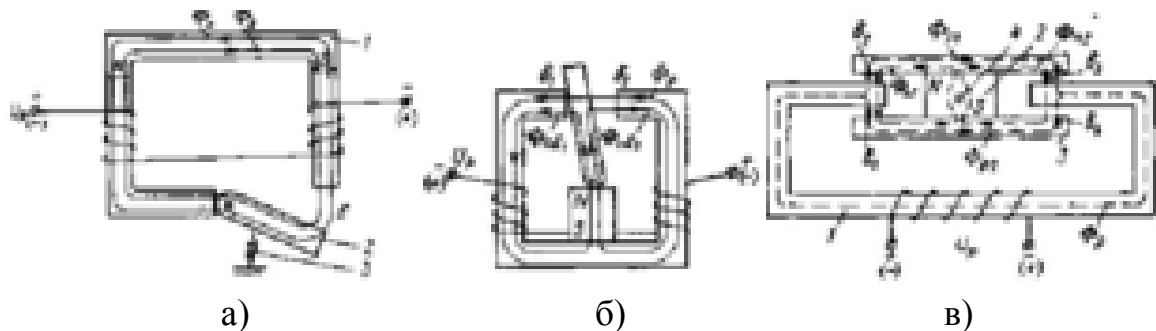


Рисунок 15.4 – Конструкції ПЕМ: послідовна (а); паралельна(диференціальна) (б), мостова (в)

Схема ПЕМ з послідовним магнітним колом, в якій робочий потік Φ_p , що створюється струмом робочої обмотки, і поляризуючий Φ_n постійного магніту замикаються в спільному нерозгалуженому магнітопроводі 1, показана на рисунку 15.4, а. При зустрічній дії цих потоків якір 2 відтягнений пружиною 3. Зміна полярності робочої напруги викликає притягнення якоря до сердечника.

На рисунку 15.4, б представлена одна з принципових схем ПЕМ з диференціальним (паралельним) магнітним колом. Тут поляризуючий потік Φ_n розгалужується на два потоки Φ_{n1} , Φ_{n2} , що проходять по сердечниках. Один з них при даній полярності робочої напруги діє з потоком Φ_p згідно, а другий - зустрічно. Якір притягається до лівого або правого полюса в залежності від того, в якому з зазорів робочий і поляризуючий потоки додаються. Тягове зусилля визначається різницею сил тяжіння в зазорах, звідки і назва «диференціальний ПЕМ». При зміні полярності робочої напруги якір перекидається до протилежного полюса.

Одна з конструктивних схем ПЕМ з мостовим магнітопроводом зображена на рисунку 15.4, в. Робочий потік Φ_p що проходить по С-образному магнітопроводу 1, розгалужується на два потоки Φ_{p1} , Φ_{p2} , а поляризуючий потік Φ_n постійного магніту 2 - також на два потоки Φ_{n1} , Φ_{n2} . При даній полярності робочої напруги потоки Φ_{n1} , Φ_{p2} в зазорі δ_1 і Φ_{p1} , Φ_{n2} в зазорі δ_3 додаються, а Φ_{n1} , Φ_{p1} в зазорі δ_2 і Φ_{n2} , Φ_{p2} в δ_4 віднімаються, внаслідок чого постійний магніт 2 з полюсними наконечниками 3 повернеться на деякий кут проти годинникової стрілки навколо осі

4. Зміна полярності робочої напруги викликає поворот магніту з полюсними наконечниками в зворотному напрямку.

Основні недоліки ПЕМ з послідовним магнітним колом це, по-перше, мала магнітна проникність магнітожорсткого матеріалу постійного магніту, через що потрібна підвищена МРС робочої обмотки, тобто знижується чутливість ПЕМ, і, по-друге, вплив розмагнічуючої робочої МРС на постійний магніт, що погано позначається на стабільності його намагніченості і збільшує розміри ПЕМ. В цьому відношенні краще конструкції, де замість постійного магніту використовують обмотку, тобто ПЕМ з двома обмотками. ПЕМ з паралельним магнітним колом більш досконалі, хоча і в них шляхи робочого і поляризуючого потоків розділені не повністю. Більш повного поділу цих потоків досягають в мостових схемах, які забезпечують більш стабільну роботу постійних магнітів і підвищення чутливості ПЕМ.

15.2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ РЕЛЕ

Електромагнітне реле – це комутаційний пристрій для переключення електричних кіл електромагнітним полем.

15.2.1 Устрій та класифікація електромагнітних реле

Електромагнітне реле, принцип дії якого є загальними для будь-якого типу, складається з наступних елементів:

- Основа.
- Якір.
- Котушка з витків дроту.
- Рухливі і закріплені контакти.

Усі деталі кріпляться на підставі. Якір виконаний з можливістю повороту і утримується пружиною. Коли на обмотку котушки подається напруга, по її виткам протікає електричний струм, створюючи електромагнітні сили в сердечнику. Вони притягують якір, який повертається і замикає рухливі контакти з парними нерухомими. При відключенні струму якір повертається пружиною назад. Разом з ним переміщуються рухомі контакти. Від типової конструкції відрізняються тільки герконові реле, де контакти, сердечник, якір і пружина поєднані в єдиній парі електродів. Електромагнітне реле є комутуючим пристроєм.

Електрична енергія перетворюється в магнітну, яка потім долає зусилля пружини й переміщує контакти. Електричні кола котушки і комутації нічим не пов'язані. За рахунок цього малі струми можуть управляти великими. В результаті реле електромагнітне є підсилювачем струму або напруги.

Функціонально воно включає три основних елемента:

- сприймаючий;
- проміжний;
- виконавчий.

Першим з них є обмотка, що створює електромагнітне поле. По ній проходить контрольований струм, при досягненні яких заданого порогового значення відбувається вплив на виконавчий елемент - електричні контакти, замикаючі або тих, що розмикають вихідне коло.

Реле класифікуються наступним чином:

- За способом управління контактами - якірні і герконові. У першому випадку замикання-розмикання контактів здійснюється при переміщенні якоря. У герконових перемикачах сердечник відсутній і магнітне поле впливає безпосередньо на металеві електроди з контактами.
- Керуючий струм може бути постійним або змінним. В останньому випадку якір і сердечник виконуються з пластин електротехнічної сталі для зменшення втрат. Для постійного струму пристрої бувають нейтральними і поляризованими.
- По швидкодії спрацьовування реле поділяються на 3 групи: до 50 мс, до 150 мс і більше 1 с.
- Захист від зовнішніх впливів передбачає пристрою герметизовані, заохлені і відкриті.

При всьому різноманітті типів, представлених нижче, дія електромагнітного реле засноване на загальному принципі комутації контактів.

Основними характеристиками реле є:

- Чутливість - перехід від подається в обмотку сигналу певної потужності, достатньої, щоб відбувалося включення.
- Опір обмотки.
- Напруга (струм) спрацьовування - мінімальне граничне значення параметра, при якому контакти перемикаються.
- Напруга (струм) відпускання.
- Час спрацьовування.
- Робочий струм (напруга) - величина, при якій відбувається гарантоване включення в процесі експлуатації (значення вказується в заданих межах).
- Час відпускання.
- Частота включень з навантаженням на контактах.

15.2.2 Реле струму та напруги

Реле струму та напруги застосовують в електричних колах для контролю величини струму та напруги.

Реле струму представляють собою різновид реле захисту. Вони діляться на три види: реле максимального струму; реле зворотного струму, реле мінімального струму, які застосовують в колах постійного та змінного струму для захисту двигунів при обриві кола збудження або переході генератора у режим двигуна.

Реле напруги представляють собою різновид реле захисту. Вони діляться на реле мінімальної та максимальної напруги.

Устрій та принцип дії реле струму та напруги однаковий за одним винятком: котушка реле напруги виконується тонким проводом та має значно більшу кількість витків. Крім того, ця котушка вмикається паралельно колу, напруга якого контролюється.

На рисунку 15.5 наведене зображення реле на принципових схемах.

Реле мінімальної напруги призначені для відключення кола при недопустимому зниженні напруги (провалі напруги). Застосування цих реле обов'язково в схемах суднових та берегових електроприводів.

Реле максимальної напруги призначені для відключення кола при недопустимому підвищенні напруги на ній (закиді напруги). На практиці закиди напруги зустрічаються значно рідше ніж провали та мають нетривалий характер.

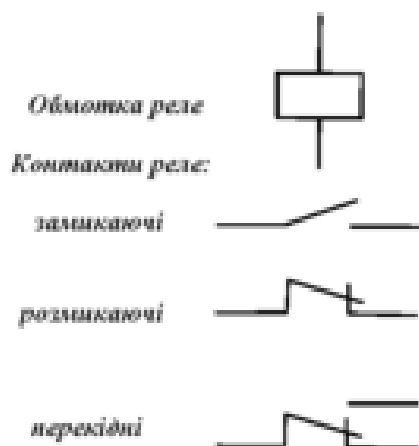


Рисунок 15.5 - Зображення реле на принципових схемах

15.2.3 Проміжні реле

Проміжні реле призначені для виконання наступних функцій: передачі команд від низьковольтних органів керування до апаратури основного кола керування, підсилення сигналів команд та помноження командних імпульсів, зв'язку між безконтактними елементами суднової автоматики та вихідними колами систем керування електроприводами.

15.2.4 Реле часу

Реле часу призначені для створення видержки часу при комутації слабкострумових кіл керування, сигналізації та контролю.

В **електромагнітних реле часу** котушка реле живиться тільки постійним струмом, а витримка часу починається при відключенні котушки від мережі. Електромагнітні реле застосовують і в схемах на змінному струмі, але в цьому випадку котушку реле вмикають в мережу через випрямний мостик. На рисунку 15.6 наведені конструкція реле та його регульовальні характеристики.

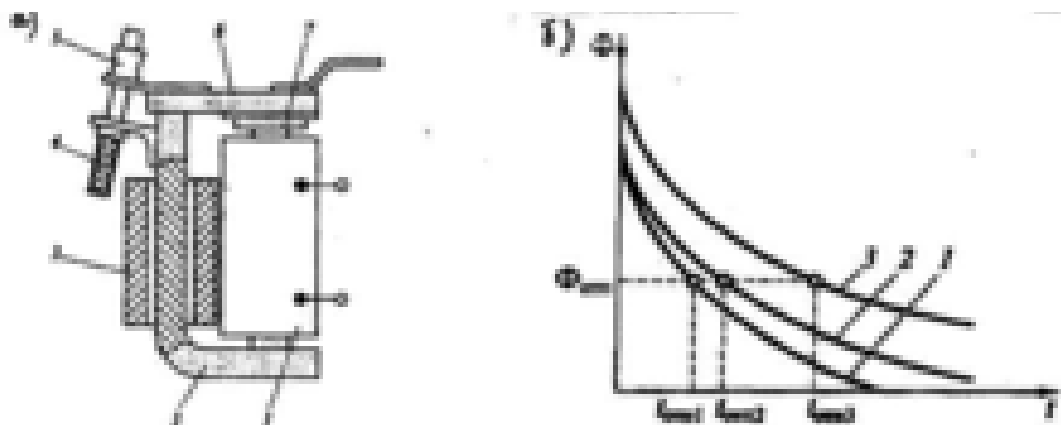


Рисунок 15.6 – Електромагнітне реле часу: а) устрій реле; б) вплив демпфера на час відпускання реле; 1 – котушка; 2 – сердечник; 3 – гільза; 4 – возвратна пружина; 5 – регульовальна гайка; 6 – якор; 7 – немагнітна прокладка

Наявність демпфера приводить до підвищення часу відпускання (крива 2) по зрівнянню із реле без демпфера (крива 1). Час відпускання реле можна також регулювати товщиною немагнітної прокладки 7 на якорі 6. і зменшенням товщини цієї прокладки час відпускання зростає. Ще одним засобом регулювання є зміна натягу пружини 4 гайкою 5: чим менше натяг пружини, тим більше час відпускання (крива 3). Електромагнітні реле часу мають менший діапазон регулювання.

Графічне зображення контактів реле часу.

При графічному зображенні контактів реле часу основне зображення контактів, прийняте для контакторів та реле, доповнюється напівсферою у вигляді «парашюта»: якщо при переміщенні контакта купол «парашюта» наповнюється повітрям, контакт перемикається із затримкою в часі.

Розрізняють 6 типів контактів реле часу (рисунок 15.7):

- 1 замикаючий із затримкою часу при замиканні (рисунок 15.7, рис. 1);
- 2 замикаючий із затримкою в часі при розмиканні (рисунок 15.7, рис. 2);
- 3 розмикаючий із затримкою в часі при замиканні (рисунок 15.7, рис. 3);
- 4 розмикаючий із затримкою часу при розмиканні (рисунок 15.7, рис. 4);
- 5 замикаючий із затримкою в часі при замиканні та розмиканні (рисунок 15.7, рис. 5);
- 6 розмикаючий із затримкою в часі при розмиканні та замиканні (рисунок 15.7, рис. 6).

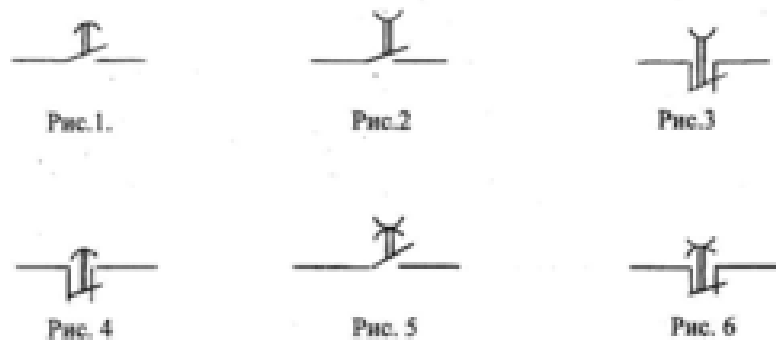


Рисунок 15.7 – Графічне зображення контактів реле часу

15.2.5 Геркони

Принцип дії герконових реле складається в замиканні та розмиканні контактів під дією магнітного поля. Устрій простіших герконових реле наведений на рисунку 15.8.

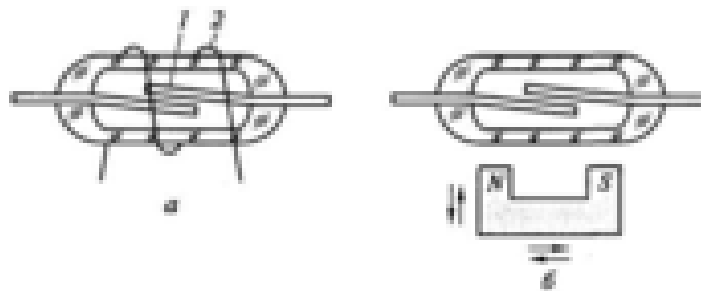


Рисунок 15.8 – Герконові реле: а) керовані струмом в котушці; б) керовані постійним магнітом;
1 – контакти; 2 – колба

Якщо усередину котушки помістити декілька герконових реле, то створиться багатоконтактне реле (рисунок 15.9, а)

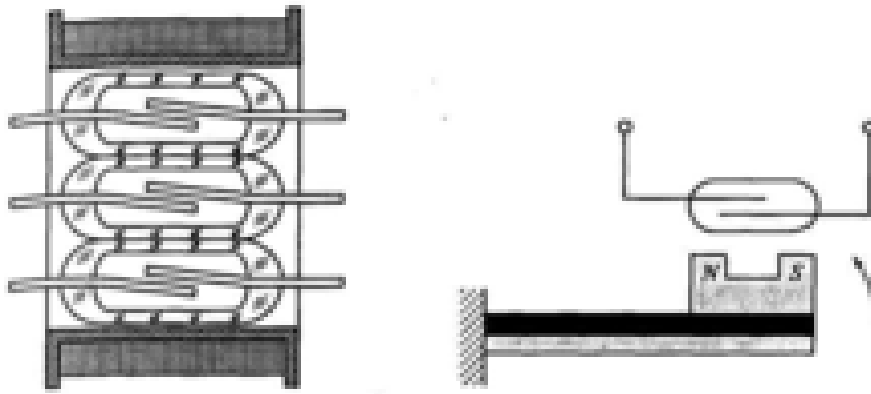


Рисунок 15.9 – Геркони : а) багатоконтактне реле; б) застосування герконів в теплових реле

Геркони застосовують в теплових реле (рисунок 15.9, б). В цьому випадку постійний магніт розміщують на біметалічній пластині, що при нагріві згинається убік геркона та його контакти замикаються.

Крім реле із замикаючими контактами існують герконові реле із розмикаючими контактами. Такі реле крім котушки включають до себе постійний магніт. Доки на котушку реле не подана напруга, контакти реле замкнені під дією цього магніту. При подачі напруги на котушку її магнітне поле послаблює поле постійного магніту, контакти розмикаються.

Геркони характеризуються великою частотою вмикання (до 100 вмикань в секунду), бо не мають масивного якорю, високою надійністю (контакти комутують в інертному середовищі або порожнечі, тобто не окислюються й не забруднюються), можливістю використання у вибухонебезпечних приміщеннях (перемикання відбувається усередині герметичного скляного балона), однак мають малу комутаційну та перевантажувальну здатність та низьку електричну міцність міжконтактного проміжку.

Геркони застосовують в системах керування, контролю та сигналізації, наприклад, в електроприводах в якості вихідного елемента логічних устроїв, що вмикають або вимикають електродвигун (замість більш складного тиристорного підсилювача). Їх можна використовувати також в шляхових вимикачах.

На судах геркони знайшли обмежене застосування.

15.3 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МУФТИ

Електромагнітні муфти застосовують для замикання і розмикання кінематичних кіл без припинення обертання, наприклад в коробках швидкостей і передачах, а також для пуску, реверсування і гальмування приводів верстатів. Застосування муфт дозволяє розділити пуск двигунів і механізмів, зменшити час пускового струму, усунути удари як в електродвигунах, так і в механічних передачах, забезпечити плавність розгону, усунути перевантаження, прослизання і ін., різке зменшення пускових втрат в двигунах знімає обмеження по допустимому числу включень, що дуже важливо при циклічній роботі двигуна.

15.3.1 Пристрій, принцип дії і характеристики електромагнітних муфт

Електромагнітні муфти, що застосовуються для автоматичного управління, поділяються на муфти сухого і в'язкого тертя і муфти ковзання.

Муфта сухого тертя виробляє передачу потужності з одного вала на інший через диски тертя 3 (рисунок 15.10, а).

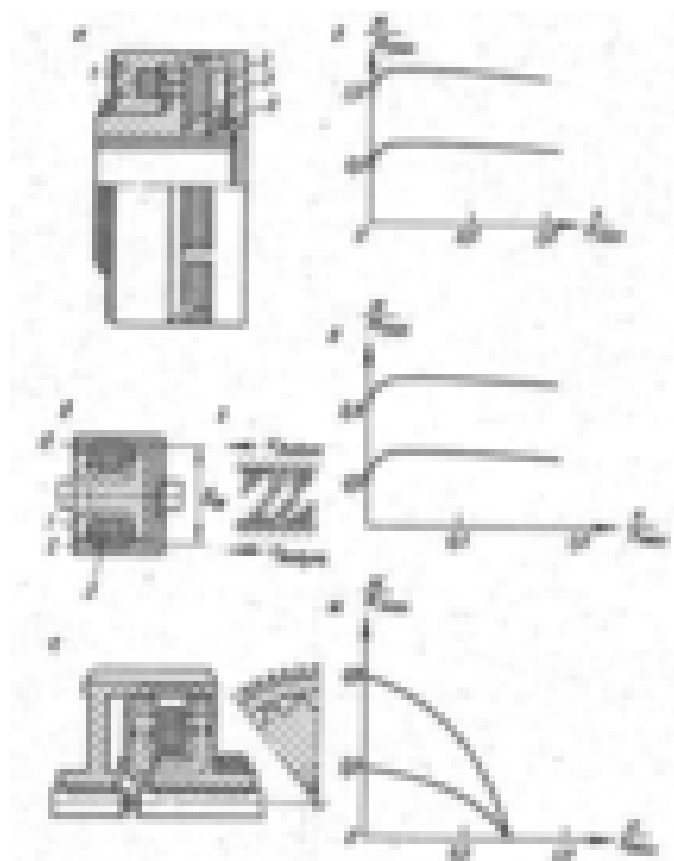


Рисунок 15.10 – Електромагнітні муфти: а - схема муфти сухого тертя, б - механічна характеристика муфти тертя, в - схема муфти в'язкого тертя, г - схема схоплювання феритового наповнювача, д - механічна характеристика муфти в'язкого тертя, е - схема муфти ковзання, ж - механічна характеристика муфти ковзання

Диски мають можливість переміщатися по шліцах осі вала і відомої напівмуфти. При подачі струму в обмотку 1 якір 2 стискає диски, між якими виникає сила тертя. Відносні механічні характеристики муфти наведені на риунку 15.10, б.

Муфти в'язкого тертя (див. рисунок 15.10, в) мають постійний зазор δ між провідною 1 і веденою 2 напівмуфтами. У зазорі за допомогою обмотки 3 створюється магнітне поле, яке впливає на заповнювач (ферритовое залізо з тальком або графітом) і утворює елементарні ланцюжки магнітів (див. рисунок 15.10, г). При цьому заповнювач якби схоплює провідну і провідну напівмуфти. При виключенні струму магнітне поле зникає, ланцюжки руйнуються і напівмуфти прослизують відносно один одного. Відносна механічна характеристика муфти приведена на рисунку 15.10, д. Ці електромагнітні муфти дозволяють плавно регулювати швидкість обертання при великих навантаженнях на вихідному валу.

Фрикційна муфта складається з двох зубовидних напівмуфт (див. рисунок 15.10, е) і котушки. При подачі струму в котушку утворюється замкнуте магнітне поле. При обертанні муфти прослизують одна щодо іншої, в результаті чого утворюється змінний магнітний потік, це і є причиною виникнення ЕРС і струмів. Взаємодія утворених магнітних потоків приводить в обертання ведену напівмуфту.

Характеристика фрикційної напівмуфти приведена на рисунку 3.30, ж. Основне призначення таких муфт - створювати найбільш сприятливі умови пуску, а також згладжувати динамічні навантаження при роботі двигуна.

Електромагнітні муфти ковзання мають ряд недоліків: низький коефіцієнт корисної дії при малих швидкостях, малий передається момент, низька надійність при різкій зміні навантаження і значна інертність.

У електромагнітних порошкових муфт з'єднання між провідною і відомою частинами здійснюється за рахунок підвищення в'язкості сумішей, що заповнюють зазор між поверхнями зчеплення муфт при збільшенні магнітного потоку в цьому зазорі. Головним компонентом таких сумішей є феромагнітні порошки, наприклад карбонільне залізо. Для усунення механічного руйнування частинок заліза через сили тертя або їх злипання додають спеціальні наповнювачі - рідкі (синтетичні рідини, індустріальні масло або сипучі (оксиди цинку або магнію, кварцовий порошок). Такі муфти мають високу швидкість спрацьовування, проте експлуатаційна надійність їх є недостатньою для широкого застосування в верстатобудуванні.

Контрольні питання та завдання до глави 15

1. Що таке електромагніт?
2. Які нейтральні електромагніти вам відомі?
3. Опишіть недоліки та переваги електромагнітів змінного струму.
4. Що таке електромагнітне реле?
5. Наведіть класифікацію електромагнітних релею
6. Яке основне призначення мають реле струму та напруги?
7. Для чого використовуються проміжні реле та реле часу ?
8. Які типи контактів реле вам відомі, їхнє означення?
9. Чим відрізняються муфти сухого та в'язкого тертя?
10. Які недоліки мають фрикційні муфти?
11. Для чого в порошкові муфти додають наповнювачі?

Глава 16. ЕЛЕКТРОМАШИННІ УСТРОЇ АВТОМАТИКИ

Електромашинні пристрої в сучасному технологічному обладнанні і в системах управління ним відіграють першорядну роль. Електричні машини або їх комплекси широко використовують в якості елементів систем управління: різного роду датчиків, фазообертачів, перетворювачів одних фізичних величин в інші і т. д.

В першу чергу слід відзначити переважне застосування електричних машин для перетворення механічних величин в електричні. Кутову швидкість оцінюють за допомогою тахогенераторів, що представляють собою малопотужні генератори постійного або змінного струму. Кут повороту (або різниця кутів) визначають за допомогою сельсинов або поворотних трансформаторів, які використовують також в аналогових обчислювальних пристроях для вирішення завдань, пов'язаних з перетворенням тригонометричних функцій. Електричні машини застосовують у вимірювальних органах регуляторів і слідкуючих систем.

Вельми часто електричні машини служать коригуючими ланками систем управління. Тут в першу чергу слід згадати тахогенератори, які включаються в якості диференціюючих ланок у колі зворотного зв'язку. Застосовують електричні машини і для створення додаткових інтегруючих ланок з великою постійною часу, наприклад так званого інтегруючого приводу, який складається з електричного двигуна і електричної машини, що перетворює кут повороту в електричну величину – напругу

Широко використовують електромашинні пристрої в системах управління як виконавчі органи, призначені для повороту осей різного роду вентилів, засувки, затискачів та ін. В тих випадках, коли необхідно створити крутний момент, пропорційний напрузі на вході системи, застосовують електричну машину в режимі моментного двигуна.

Електромашинний пристрій, що складається з електричного двигуна, системи управління ним і механічного редуктора, називається електричним приводом. Від передавального відношення механічного редуктора істотно залежать динамічні властивості приводу. Природно, конструктивні особливості редуктора в даному випадку значення не мають.

16.1 АСИНХРОННІ МАШИНИ

16.1.1 Загальні відомості про асинхронні машини

Асинхронними машинами називаються електричні машини змінного струму, які звичайно використовуються в режимі електродвигуна й призначені для перетворення електричної енергії в енергію обертального руху. Асинхронні машини характеризуються нерівністю кутових швидкостей основного магнітного поля й ротора. Було відзначено, що для забезпечення існування моменту електродинамічних сил, що врівноважують момент сил опору обертальному руху, необхідно, щоб спостерігалася ковзання ротора щодо магнітного поля. Кутова швидкість ротора повинна бути менше кутової швидкості поля. Момент електродинамічних сил повинен бути, принаймні, не менше моменту сил тертя ротора. Збільшення моменту сил, що перешкоджають обертанню ротора, викликає збільшення ковзання ротора відносно поля. Збільшення ковзання вимагає індуквання більших ЕРС і струмів.

16.1.2 Устрій і основні характеристики асинхронних машин

Асинхронна машина має нерухливі й рухливі конструктивні елементи, що утворюють її статор і ротор (рисунок 16.1).

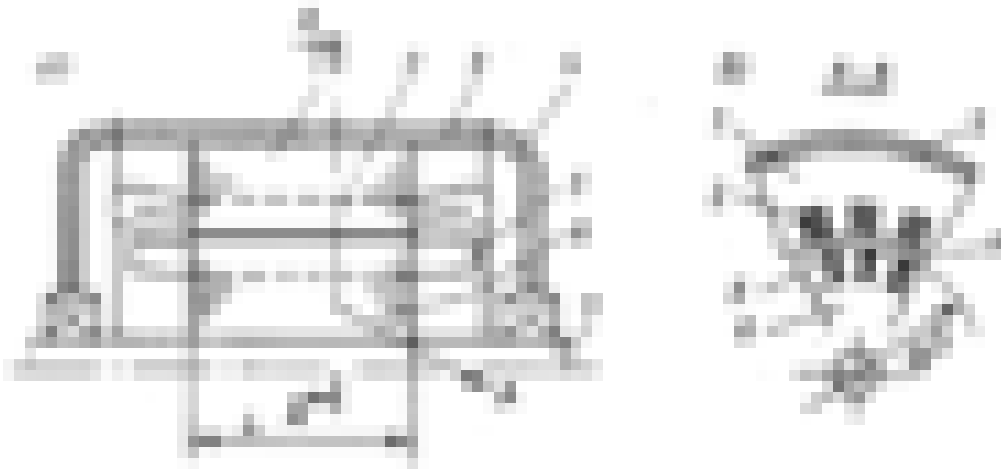


Рисунок 16.1 – Схематичне зображення поздовжнього (а) і поперечного (б) перетинів асинхронної машини з короткозамкненим ротором

До числа основних елементів статора ставляться: магнітопровід 1 (статорна частина), обмотки статора 2, корпус 3 і підшипникові щити 4.

Магнітопровід статора призначений для посилення й потрібної орієнтації магнітного поля в зоні обмотки статора. Магнітопровід, що має форму товстостінного циліндра, є набором окремих пакетів плоских тонких листів. Кожен лист кільцеподібної форми штампується з електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. Шарувата система магнітопроводу призначена для зменшення втрат, що виникають під дією обертового магнітного поля (втрати на вихрові струми, або струми Фуко). Внутрішня циліндрична поверхня магнітопроводу статора має поздовжні пази для укладання обмотки статора. Внутрішній діаметр D магнітопроводу статора і його довжина L в аксіальному напрямку є головними геометричними параметрами машини, що залежать від її потужності й частоти обертання, що визначають її масогабаритні показники й вартість.

Обмотки статора обтикаються струмами, що створюють основний обертовий магнітний потік машини. У звичайних асинхронних машин на статорі три обмотки, які називаються **фазами**. Кожна фаза виконується у вигляді декількох котушок, намотаних із гнучких ізольованих по поверхні мідних або алюмінієвих провідників. У машин середньої й великої потужності обмотки формуються у вигляді твердих секцій, які укладаються в поздовжніх пазах магнітопроводу статора. Частини обмотки, що перебувають у межах пазів магнітопроводу якоря, називаються **пазовими**, а вихідні за його межі – **лобовими**. Число котушок у кожній фазі обмотки статора визначається числом пазів у залозі статора й числом пар полюсів у даній машині.

Пакети заліза статора запресовуються в корпусі 3, що представляє собою чавунний або алюмінієвий циліндр. На торцях корпус зміцнюють підшипникові щити, у яких співвісно із корпусом і магнітопроводом статора перебувають підшипники, у які встановлюється ротор машини.

Основними елементами ротора є магнітопровід ротора 6, обмотка ротора 5 і вал машини 7.

Магнітопровід ротора призначений для посилення й орієнтації магнітного поля в зоні обмотки ротора й виконаний у вигляді набору дисків з пазами для обмоток ротора. Магнітопровід ротора жорстко закріплений на валу машини.

Повітряний зазор 8 між статором і ротором залежно від потужності машини перебуває в межах від декількох часток до декількох міліметрів.

Обмотка ротора у звичайного асинхронного двигуна виконана у вигляді ряду масивних стрижнів, розташованих у пазах ротора, електрично й механічно з'єднаних один з одним за межами пазів. У машин потужністю в кілька десятків Квт обмотки виготовляються безпосереднім zalиванням алюмінію в пази ротора.

Асинхронні машини, у яких масивні стрижні обмотки ротора безпосередньо з'єднані один з одним, називаються двигунами з короткозамкненим ротором або просто короткозамкненими. Такий тип асинхронних машин найпоширеніший.

Іншої, менш розповсюдженою різновидом роторів, є **фазний ротор**, у якого трифазна обмотка виконується так само, як у статора, і з'єднується за схемою «зірка». Кінці обмотки приєднуються до трьох контактних ізолюваних друг від друга кільцями, нерухомо укріпленими на валу ротора. За допомогою трьох нерухливих щіток (звичайно у вигляді мідно-графітових стрижнів) здійснюється приєднання кінців фаз обмотки ротора до нерухливих елементів кіл керування машиною.

16.1.3 Характеристики асинхронної машини

Механічна характеристика асинхронної машини (рисунок 16.2) розглядається у вигляді залежності кутової швидкості (частоти обертання, ковзання) ротора від магнітного моменту в сталих режимах.

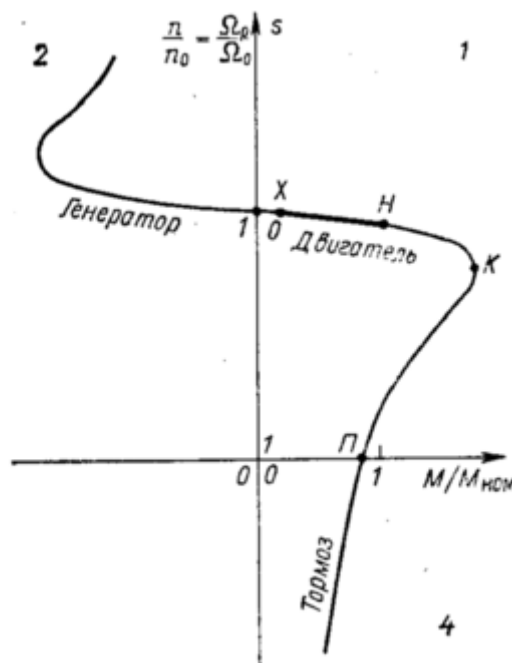


Рисунок 16.2 – Механічна характеристика асинхронної машини

Характеристика розташовується в трьох квадрантах, описуючи режими роботи машини: рухового, генераторного й електромагнітного гальмування. Асинхронні машини майже завжди використовуються в руховому режимі, у якому механічна

характеристика має особливі точки: точка П - початок процесу пуску або «стоянка» під напругою (пусковий момент МП, частота обертання ротора n і його кутова швидкість Ω дорівнюють нулю); точка К – критичний режим (електромагнітний момент має найбільше можливе критичне значення M_K , йому відповідає критична частота обертання $n = 30\Omega_H/\pi$, критичне ковзання s), точка Н – номінальний режим (номінальні значення моменту, частоти обертання й ковзання), точка Х – холостий хід (момент обертання приєднаного механізму дорівнює нулю, електромагнітний момент дорівнює моменту сил тертя, кутові швидкості ротора й магнітного поля майже рівні). Ділянка характеристики між точками Х и Н описує нормальні режими роботи в руховому режимі. У наближених розрахунках режимів роботи асинхронного двигуна його механічну характеристику зручно представити у вигляді:

$$\frac{M}{M_K} = 2 \frac{s_K + s}{s_K^2 + s^2}, \quad (16.1)$$

де індекс К ставиться до критичного режиму.

Механічна характеристика на основній ділянці нормальної роботи в руховому режимі приблизно описується лінійною залежністю:

$$s = a, \quad (16.2)$$

де $a = s_{\text{НОМ}}/M_{\text{НОМ}}$.

Робочі характеристики асинхронних двигунів являють собою залежності від потужності P_2 (що віддається механізму, який приводиться в обертання, M) наступних величин, що описують режим роботи асинхронного двигуна: потужності P_1 , споживаної з мережі, струму фази I_1 , коефіцієнта потужності $\cos\varphi_1$, n (Ω , s) – частоти обертання (кутової швидкості, ковзання) ротора, ККД η електродвигуна. Типові робочі характеристики електродвигуна наведені на рисунку 16.3.

У таблицях технічних характеристик асинхронного двигуна для номінального режиму роботи приводяться значення: вихідної потужності $P_{2\text{НОМ}}$, частоти обертання $n_{\text{НОМ}}$, струму обмотки статора $I_{1\text{НОМ}}$, ККД $\eta_{\text{НОМ}}$, коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{1\text{НОМ}}$ і ковзання $s_{\text{НОМ}}$. Крім того приводяться кратності пускових і критичного (максимального) моментів (M_P і M_K) і маховий момент ротора.

Залежно від номінальної потужності, типу й частоти обертання асинхронних двигунів їхній коефіцієнт потужності в номінальних режимах лежить у межах від 0,7 до 0,9. При меншому завантаженні коефіцієнт потужності ще нижче. Для підтримки коефіцієнта потужності варто вибирати електродвигуни так, щоб їхня реальна потужність була близька до номінального.

На судах використовуються асинхронні короткозамкнені трифазні електродвигуни з незмінним числом пар полюсів (одношвидкісні) і з перемиканням числа пар полюсів (дво- і тришвидкісні) на напругу 380/220 В 50 Гц. Синхронні частоти обертання 375, 500, 750, 1000, 1500 і 3000 про/хв. Серійні судові електродвигуни мають номінальні потужності 0,5-200 Квт.

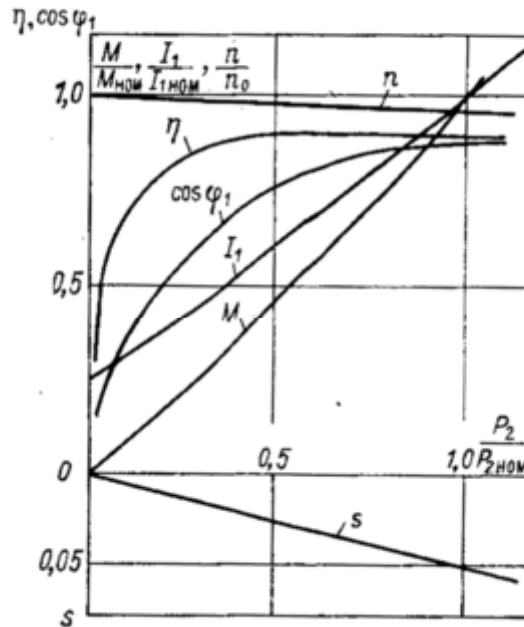


Рисунок 16.3 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

16.1.4 Режим роботи асинхронних двигунів

Пуск асинхронного короткозамкненого двигуна супроводжується значним збільшенням струмів у статорних і роторних обмотках (в 4-6 разів більше їхніх номінальних значень). Кратність пускового струму стосовно номінального вказується в довідниках для кожного типу двигуна. У міру розгону ротора струми двигуна зменшуються й наближаються до значень, що відповідають робочим характеристикам у сталих режимах (рисунок 16.4).

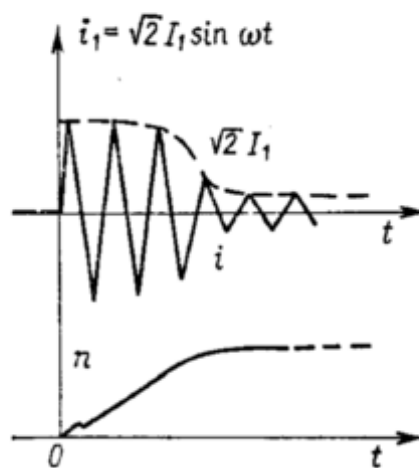


Рисунок 16.4 – Залежності струму й частоти обертання ротора асинхронного двигуна при пуску

Значні пускові струми викликають зниження напруги, що підводиться до двигуна напруги через збільшення падіння напруги на опорах лінії й зниження напруги джерела. Останнє особливо характерно для судових умов, де потужності асинхронних двигунів і генераторів порівнянні. Зниження напруги істотно знижує

пусковий момент двигуна й при більших моментах опору механізму може перешкодити його пуску.

Для зменшення пускових струмів їх включають через автотрансформатори або шляхом перемикання схеми сполучення фаз обмотки статора з «зірки» на «трикутник», якщо в нормальних робочих режимах використовується схема «трикутник».

Асинхронні двигуни з фазним ротором пускаються при тимчасовому (на період пуску) включенні в коло кожної фази ротора (через кільця й щітки) додаткових однакових опорів.

Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна вимагає зміни механічної характеристики. Ця зміна може бути досягнуто різними способами (рисунок 16.5):

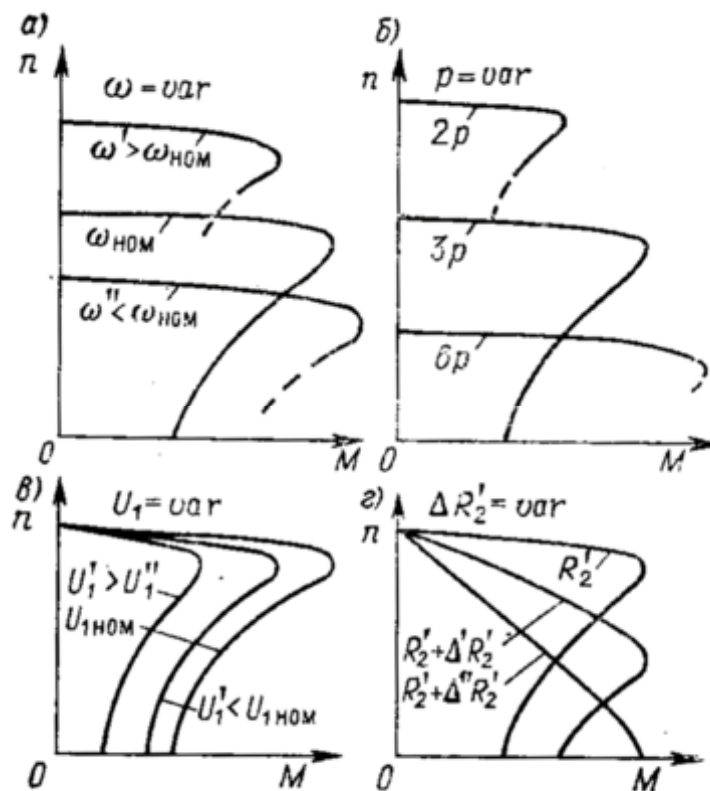


Рисунок 16.5 – Зміна механічних характеристик асинхронних двигунів при зміні частоти обертання (а), числа полюсів (б), напруги живлення статора (в), додаткового опору в колі ротора (г)

а) зміною частоти живлячої напруги для плавного підвищення або зниження частоти обертання стосовно частоти номінального режиму;

б) перемиканням схем сполучення обмоток статора зі зміною числа пар полюсів p , чим досягається дискретна зміна частоти обертання;

в) зміною величини живлячої напруги, чим досягається зменшення частоти обертання;

г) збільшенням опору в колі обмотки фазного ротора, чим досягається плавне або східчасте зменшення частоти обертання.

Зміна напрямку обертання трифазних асинхронних двигунів досягається перемиканням будь-яких двох фаз, чим забезпечується зміна напрямку обертання

магнітного поля. Якщо перемикання двох фаз виробляється при обертовому роторі, то спочатку (до зупинки) двигун переходить у режим електромагнітного гальмування з рекуперацією (поверненням) частини кінетичної енергії ротора в електричну мережу. Після зупинки ротора починається його пуск. Такий електродинамічний реверс забезпечує швидку зміну напрямку обертання, але приводить до значних поштовхів струму двигуна. Прискорене гальмування асинхронного двигуна можна одержати замиканням обмоток статора після відключення його з мережі.

Обрив однієї з ліній живлення еквівалентний перетворенню двигуна в однофазний, що перебуває під лінійною напругою. Якщо звичайний трифазний двигун працював з обмеженим моментом навантаження, то відключення однієї з фаз (наприклад, при перегорянні запобіжника) не спричинить зупинку двигуна. Пуск двигуна при однофазному живленні можливий шляхом попереднього механічного розкручування в потрібному напрямку, що важко здійснити на практиці.

Однофазні асинхронні двигуни використовуються для приводів невеликої потужності – від часток до кількох сотень ватів. У такому діапазоні потужностей їхнє застосування економічно доцільно, тому що вони вимагають лише однофазного живлення від двопровідних мереж. Для пуску однофазних двигунів тут передбачається друга обмотка статора, що включається або постійно, або тимчасово через конденсатор, що зрушує на те ж джерело напруги, що й основна обмотка (рисунок 16.6). У деяких типах однофазних двигунів ненульове значення пускового моменту одержують шляхом асиметричного накладення короткозамкненого витка на частину полюса статора.

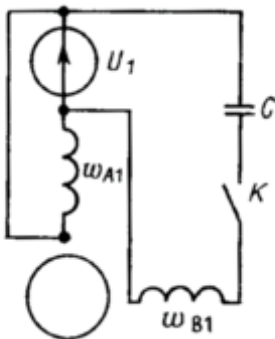


Рисунок 16.6 – Схема включення однофазного асинхронного двигуна

16.1.5 Тиристорне керування асинхронними короткозамкненими двигунами на судах. Багато суднових механізмів, що обертаються електродвигунами, вимагають плавного керування кутовою швидкістю й швидкими змінами її в широких межах. Керування кутовою швидкістю електродвигуна досягається зміною його механічної характеристики. Істотної зміни механічної характеристики можна домогтися варіюванням амплітуди й частоти джерела живлення. У суднових мережах, від яких харчуються електродвигуни, напруга постійна по амплітуді й частоті. Це спричиняє необхідність проміжного перетворення електричної енергії, переданої з мережі до двигуна. У цей час у судновій електротехніці для цієї мети використовуються статичні напівпровідникові перетворювачі на основі тиристорів, які можуть забезпечити оптимізацію режимів

роботи механізмів і мають гарні експлуатаційні характеристики (постійна готовність до роботи, тривале функціонування без обслуговування й спостереження).

Для керування асинхронними електродвигунами розроблений ряд модифікацій тиристорних перетворювачів, основні з яких представлені на рисунку 16.7.

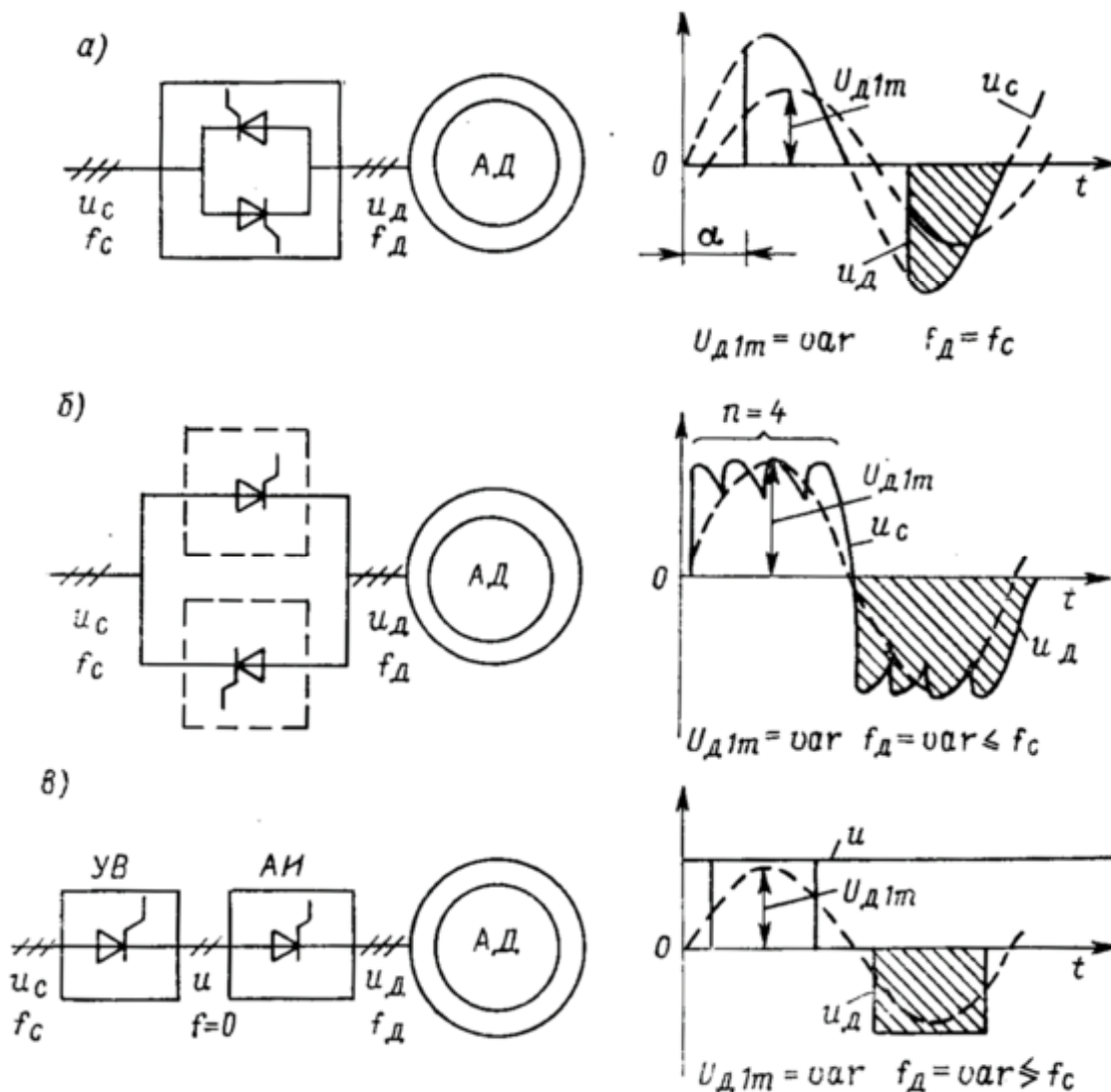


Рисунок 16.7 – Керування асинхронним короткозамкненим двигуном тиристорним комутатором (а), безпосереднім (б) і інверторним (в) перетворювачами частоти

Тиристорним комутатором (керованим випрямлячем) регулюють амплітуду основної (першої) гармоніки мережі за рахунок зміни кута відмикання тиристора α .

Безпосереднім перетворювачем частоти регулюються як амплітуда, так і частота живлення електродвигуна, за рахунок зміни фази відкриття й числа напівхвиль напруги, що пропускаються, мережі. Такі перетворювачі досить компактні, але можуть тільки зменшити частоту, а, отже, і кутову швидкість електродвигуна.

В інверторному перетворювачі частоти напруга мережі попередньо випрямлюється за допомогою випрямляча з керованою вихідною напругою (УВ на рисунку 16.7, в), а потім інвертується в змінну напругу необхідної частоти. Перетворювачі цього типу мають можливість підвищувати частоту напруги електродвигуна, а, отже, і його кутову швидкість. Межі можливої зміни частоти 0,1-0,2 від частоти мережі. Ці перетворювачі забезпечують до 500 циклів «пуск-стоп» у 208

годину, що вище, ніж у безпосередніх перетворювачів і магнітних пускачів (до 300 циклів). Крім того, енергія здійснення циклу при використанні перетворювачів, що інвертують, у два рази менше. Разом з тим вони мають більше складну схему й меншу компактність (до 0,3-0,4 від маси електродвигуна).

16.2 СИНХРОННІ МАШИНИ

16.2.1 Загальні відомості про синхронні машини

Синхронними машинами називаються обертові електронні машини змінного струму, що відрізняються рівністю (синхронністю) кутових швидкостей ротора й існуючого в них обертового магнітного поля. Синхронні машини призначені для перетворення електричної в механічну енергію обертового руху (синхронні двигуни) або для зворотного перетворення енергії (синхронні генератори).

16.2.2. Конструкція й основні характеристики синхронних машин

Синхронний генератор звичайного типу, принциповий устрій якого показано на рисунку 16.8, має пристрій статора, аналогічний статору асинхронного двигуна. Ротор синхронної машини, суті-по-істоті, являє собою обертовий електромагніт. Його обмотка, називана обмоткою збудження, обтикається постійним струмом від зовнішнього джерела напруги. Виникаюче завдяки цьому струму магнітне поле нерухомо щодо ротора.

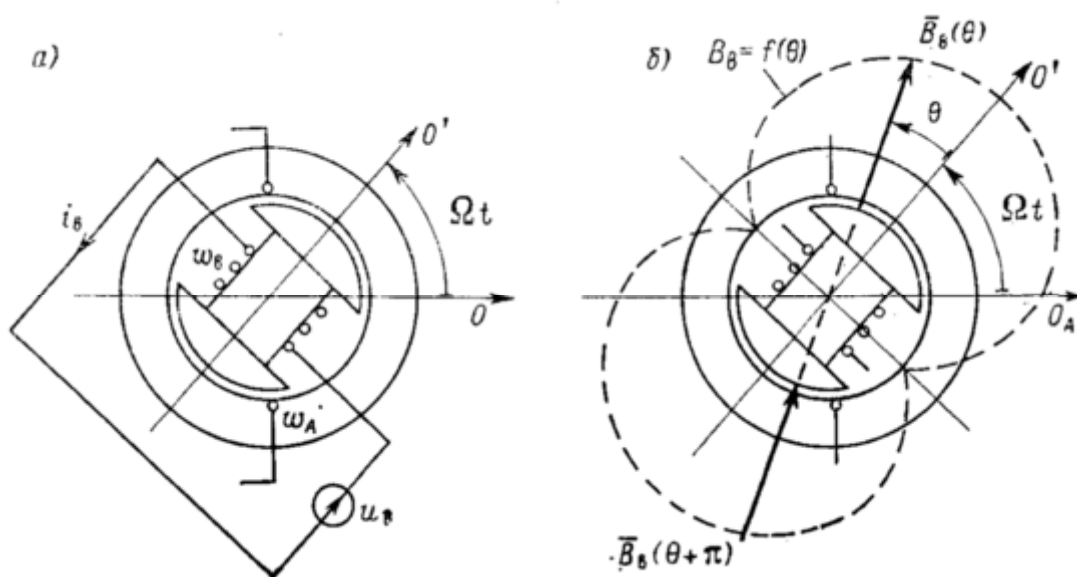


Рисунок 16.8 – Схема поперечного перерізу синхронної машини (а) і епюра індукцій магнітного поля в повітряному зазорі

У повітряному зазорі між циліндричними поверхнями «заліза» статора й ротора (рисунок 16.8, б) магнітне поле в кожній точці з кутовою координатою θ щодо ротора описується вектором магнітної індукції. Конструктивними заходами забезпечується приблизно косинусоїдне щодо осі обмотки збудження розподіл магнітної індукції.

Величина амплітуди індукції при ненасиченому магнітопроводі пропорційна току збудження. При обертанні ротора з кутовою швидкістю Ω магнітне поле в повітряному зазорі буде обертатися навколо статора. Отже розподіл індукції B_A

щодо осі O_A обмотки статора w буде змінним у часі. При симетричних трифазних обмотках, зсунутих на 120° , зсуви по фазі розподілів індукції також рівні 120° .

Потокозчеплення обмоток трифазного статора, обумовлені обертанням разом з ротором магнітного поля, є гармонійними функціями часу з кутовою частотою ω . Кутова частота тут дорівнює кутовій швидкості ротора, тому що в розглянутій моделі одна пара полюсів p . Внаслідок закону електромагнітної індукції завдяки струму порушення в обмотках статора виникає ЕРС, називана ЕРС холостого ходу.

У трифазних синхронних генераторах (найбільше широко застосовуваних на судах як джерела енергії змінного поля) ЕРС в обмотках статора зсунуті відносно одна одної на 120° .

Включення обмоток синхронного генератора СГ із первинним двигуном ПД на зовнішнє симетричне трифазне навантаження Н (рис. 16.9, а) приводить до виникнення симетричних струмів у всіх трьох фазах. Струми статора створюють додаткову складову магнітного поля, що також обертається синхронно зі складовим полем, яке створюється обмоткою збудження. Загальне магнітне поле синхронного генератора обертається синхронно з ротором. Взаємодія струму статора й магнітного поля машини створює електромагнітний момент, що діє на ротор проти напрямку його обертання (гальмовий момент M). Електромагнітний момент урівноважується обертаючим моментом приводного двигуна M_M ,

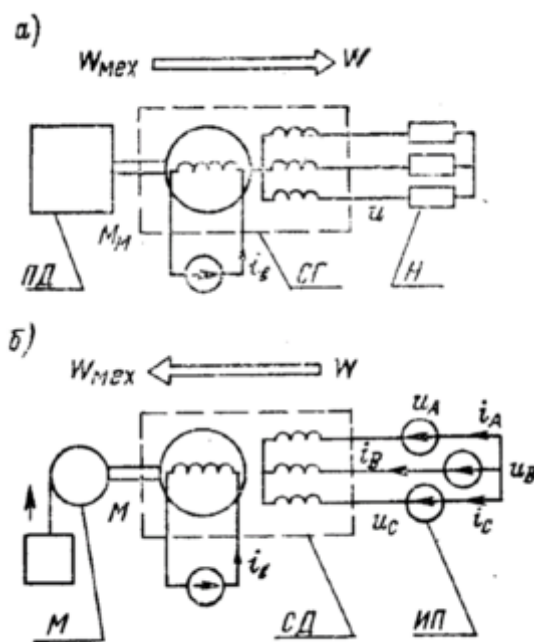


Рисунок 16.9 – Схеми використання синхронної машини в генераторному (а) і руховому (б) режимах

У повітряному зазорі між циліндричними поверхнями «заліза» статора й ротора (рисунок 16.8, б) магнітне поле в кожній точці з кутовою координатою Θ щодо ротора описується вектором магнітної індукції. Конструктивними заходами забезпечується приблизно косинусоїдне щодо осі обмотки збудження розподіл магнітної індукції. механічна енергія обертання якого перетворюється в електромагнітну, що віддається генератором у зовнішнє коло.

Синхронний двигун СД (рисунок 16.9, б) включається обмотками статора на зовнішнє джерело живлення ДП (звичайно трифазне). Частота напруги джерела обов'язкова дорівнює частоті ЕРС у фазах статора. Струми у фазах, що виникають при спільній дії в колі статора напруги трифазного джерела й внутрішніх ЕРС,

створюють, як і в генераторному режимі, додаткову складову магнітного поля. Загальне магнітне поле від струмів обмоток статора й ротора обертається синхронно з ротором (нерухомо щодо ротора). Електромагнітний момент M , викликаний струмами статора й ротора, діє на ротор у напрямку його обертання й урівноважується моментом M_M сил опору механізму, що обертається синхронним двигуном СД. Електрична енергія джерела перетвориться в механічну енергію обертання ротора й з'єднаного з ним механізму.

Синхронні машини використовуються в основному як генератори. На судах використовуються синхронні генератори потужністю від десятків кіловатів до десятків мегаватів із частотою 50 Гц. Для розглянутої схеми синхронної машини з однією парою полюсів частота обертання ротора становить 3000 об/хв. При тій же частоті напруги кутові швидкості поля й ротора можуть бути зменшені за рахунок збільшення числа пар полюсів. Серійні судові генератори мають частоту обертання ротора 750, 100, 1500 об/хв при числі пар полюсів 2, 3, 4, відповідно.

На рисунку 16.10 схематично показані ротори явнополюсного (а) і неявнополюсного виконання відповідно із двома й однією парою полюсів, розраховані на номінальні частоти обертання 1500 і 3000 об/хв.

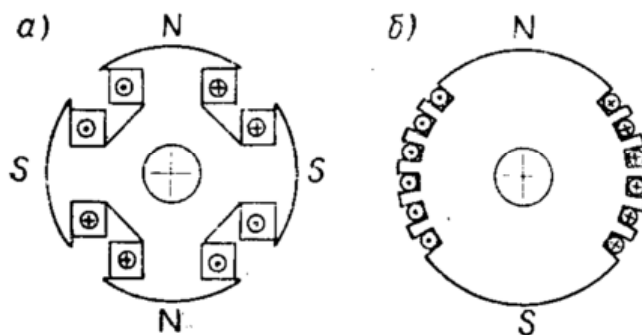


Рисунок 16.10 – Схема явнополюсного й неявнополюсного роторів синхронної машини

Неявнополюсна конструкція роторів застосовується у швидкохідних машинах. Обмотка збудження включається на джерело живлення через два обертові провідні кільця К (рисунки 16.11), укріплених нерухомо на валу В з втулкою для електричної ізоляції І, і через нерухомо закріплені на поверхні статора машини щітки Щ, до яких приєднується кола джерела постійної напруги порушення.

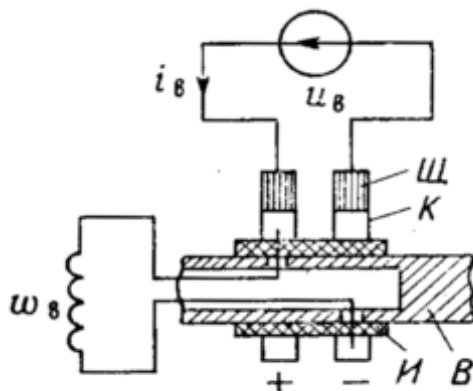


Рисунок 16.11 – Схема щіткового апарату синхронної машини

Відвід тепла, що виділяється в обмотках, магнітопроводі й у результаті тертя, виробляється шляхом вентиляції. У потужних синхронних генераторів використовується водяне охолодження обмоток статора й ротора, які мають спеціальні внутрішні канали для протікання охолодного дистилату.

16.2.3 Характеристики синхронної машини

У генераторному режимі найчастіше розглядаються характеристики холостого ходу, короткого замикання, зовнішні й регулювальні. Характеристика холостого ходу описує залежність ЕРС в обмотках ненавантаженого статора від струму збудження при номінальній частоті обертання ротора (рисунок 16.11)

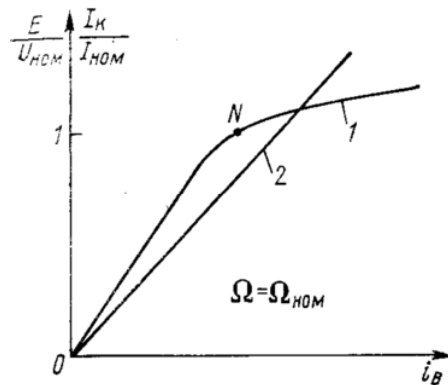


Рисунок 16.11 – Характеристики холостого ходу (1) і короткого замикання (2)

У міру росту струму збудження збільшується напруженість магнітного поля в сталі статора й ротора. Потім відбувається насичення магнітопроводу, що приводить до вповільнення росту залежності. Характеристика короткого замикання дає залежність струму статора від струму збудження при замкнених вихідних затискачах статора.

Зовнішня характеристика в генераторному режимі показує якою мірою напруга U , подавана споживачам електроенергії, залежить від струму й коефіцієнта потужності (рисунок 16.12).

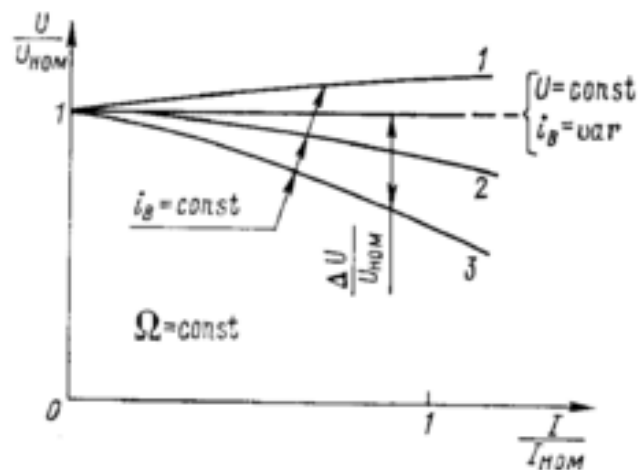


Рисунок 16.12 – Зовнішні характеристики синхронного генератора при ємнісному (1), активному (2) і індуктивному навантаженнях

Напруга генератора може істотно змінитися (до десятків відсотків) при зміні струму навантаження, тому для підтримки відхилення в межах 5% необхідно за допомогою автоматичних регуляторів робити зміну струму збудження.

Регулювальні характеристики синхронного генератора зображують залежність струму збудження від струму навантаження при різних значеннях коефіцієнта потужності (рисунок 16.13).

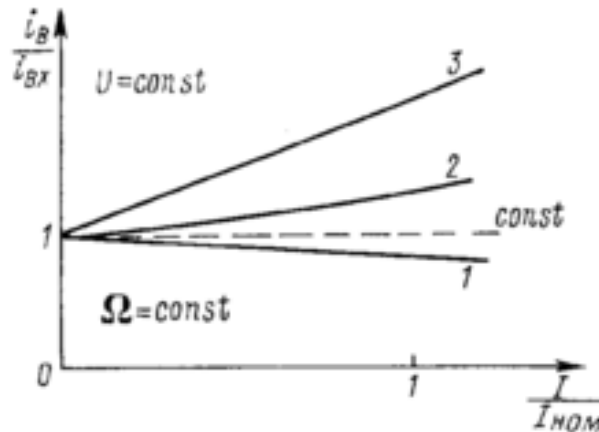


Рисунок 16.13 – Регулювальні характеристики при ємнісному (1), активному (2) і індуктивному (3) навантаженнях

Сучасні суднові синхронні генератори працюють із пристроями автоматичного регулювання струму збудження й забезпечують стабілізацію вихідної напруги з точністю до часток відсотка. Включення на синхронний генератор навантаження через напівпровідниковий перетворювач у зв'язку зі зміною струму статора протягом декількох мілісекунд при комутації приводить до перекручування форми кривих напруг фаз статора (рисунок 16.14), що несприятливо позначається як на генераторі, так і на споживачах його енергії.

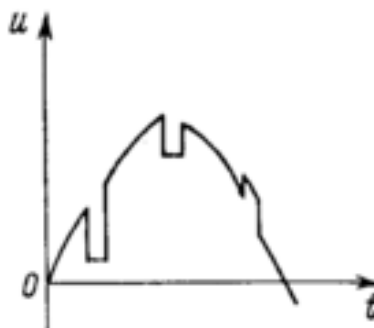


Рисунок 16.14 – Характер перекручувань синхронного генератора при включенні на напівпровідникове навантаження

Для загальної характеристики цих перекручувань використовується **коефіцієнт нелінійних перекручувань V** , дорівнює відношенню кореня квадратного із суми квадратів амплітуд вищих гармонік, до амплітуди першої гармоніки, що у судових генераторів не повинен перевищувати 0,1. У перехідних режимах синхронних генераторів, обумовлених раптовими змінами навантаження при комутаціях (включеннях і відключеннях) ділянок електричних мереж або окремих споживачів, виникають зміни напруги, які не можуть бути повністю усунуті навіть швидкодіючими регуляторами збудження. На рисунку 16.15 наведений графік зміни напруги при раптових включенні й відключенні навантаження.

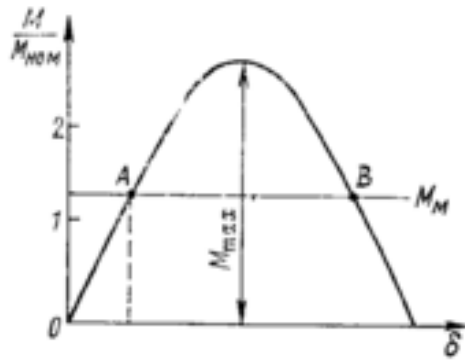


Рисунок 16.17 – Кутова характеристика синхронної машини

Механічна характеристика синхронного двигуна - ідеально жорстка (рисунок 16.18).

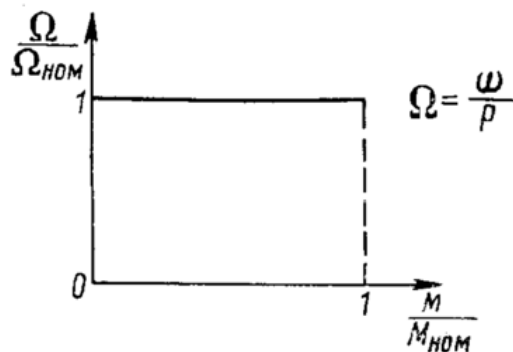


Рисунок 16.18 – Механічна характеристика синхронного двигуна

Кутова швидкість ротора синхронного двигуна визначається тільки частотою живлячої напруги й числом пара полюсів і не залежить від моменту навантаження. Для статичної стійкості режиму необхідно, щоб кут δ перебував у межах від 0 до 90° . Момент навантаження в реальності може бути більше величини M_M , що викличе випадання двигуна із синхронізму.

Для запобігання цього його максимальний момент вибирається в 1,5-3 рази більше, ніж момент номінального розрахункового навантаження M_{MAX} .

Таким чином, у нормальних експлуатаційних режимах синхронного двигуна відставання ротора від осі поля струмів статора, перебуває в межах від нуля (холостий хід) до 20-400 (номінальне навантаження).

Збільшення збудження синхронного двигуна підвищує його максимальний електромагнітний момент за рахунок посилення магнітного зв'язку ротора й статора. U-образні характеристики двигуна (рисунок 16.19) описують його властивість змінювати при даному моменті навантаження M_M величину й фазу струму статора I залежно від струму збудження i .

Така особливість синхронного двигуна забезпечує можливість його експлуатації при коефіцієнті потужності, близькому до одиниці, тобто режимі, найбільш вигідному в енергетичному відношенні. Як слідує з рисунку 16.19, режиму $\cos\varphi = 1$ відповідає мінімум струму статора, тобто мінімальні втрати.

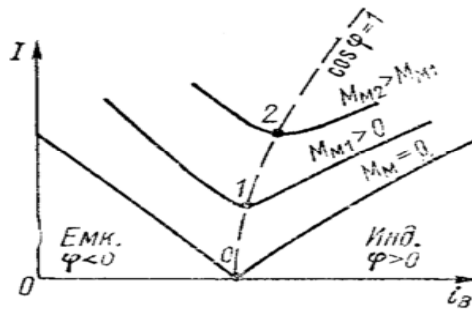


Рисунок 16.19 - U-образні характеристики синхронного двигуна

Синхронні двигуни незважаючи на свої гарні енергетичні показники використовуються обмежено, тому що вимагають застосування складних пускових схем і пристроїв, що забезпечують їхню синхронізацію із джерелами живлення.

16.2.4 Паралельна робота синхронних генераторів

На судах передбачається спільна робота джерел енергії на загальне навантаження в мережі. На рисунку 16.20 показана однофазна принципова схема включення синхронних генераторів СГ1 і СГ2 на паралельну роботу в режимі загального навантаження мережі.

Установка на судні декількох генераторів замість одного, еквівалентного їм по потужності, потрібна для підвищення надійності живлення електроенергією, а також для збільшення моторесурса й економічності роботи.

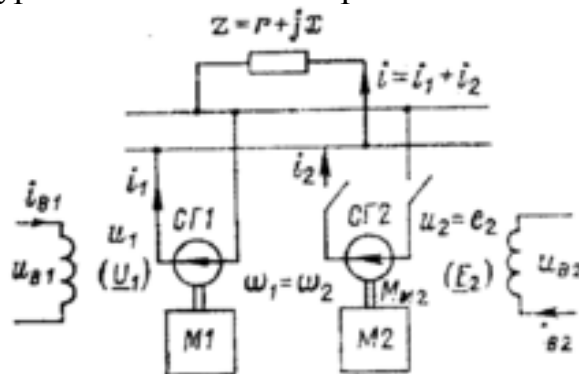


Рисунок 16.20 – Схема паралельного сполучення синхронних генераторів

Використання паралельної схеми ефективно, якщо загальне навантаження мережі розподіляється між генераторними агрегатами пропорційне їхнім номінальним потужностям. Закономірності керування розподілом навантажень зручно розглядати за допомогою однофазної схеми заміщення (рисунок 16.21).

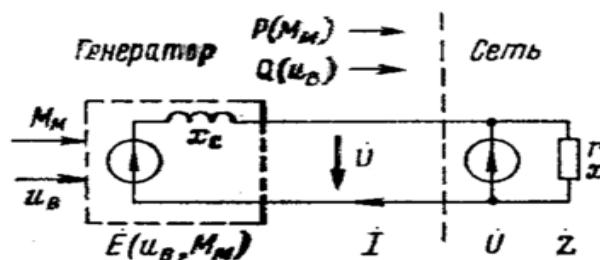


Рисунок 16.21 – Схема для розрахунку потужності синхронного генератора при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності

У схемі передбачена паралельна робота синхронного генератора СГ із мережею, що має ідеальне джерело напруги $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ і опір $\underline{Z} = r + jx$. Будь-яке навантаження в мережі не впливають на сталість амплітуди, частоти й фази джерела. Тому таку мережу називають мережею нескінченної потужності. Якщо ЕРС синхронного генератора, представленого на рисунку 16.21, дорівнює по амплітуді й частоті й протилежна по фазі напрузі мережі, то струм генератора буде дорівнює нулю (рисунок 16.22, а).

Збільшення обертового моменту приводного механізму приведе до появи додаткового зсуву фаз δ між напругою й ЕРС, при якому виникне електромагнітний момент гальмування M , що врівноважує M_M (рисунок 16.23, б). Активна й реактивна складові комплексної потужності, що віддається в мережу (з напругою U) синхронним генератором як джерелом ЕРС, навантаженим струмом I , відповідно до векторної діаграми на рисунку 16.23, б, визначаються виразами:

$$P = \frac{2U^2}{x_c} \cos \frac{\delta}{2} \sin \frac{\delta}{2}; \quad Q = \frac{2U^2}{x_c} \sin^2 \frac{\delta}{2}.$$

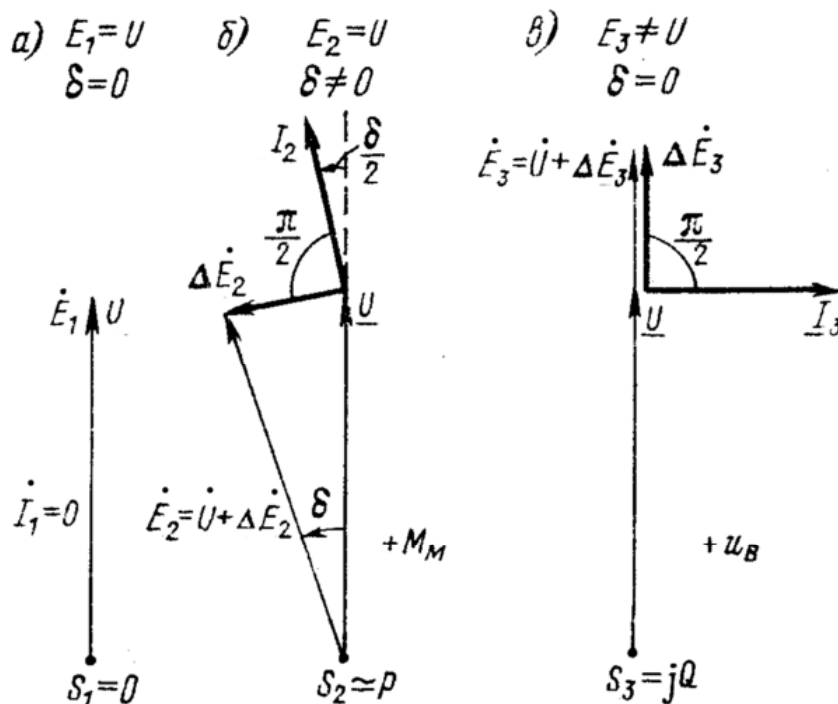


Рисунок 16.22 – Векторні діаграми паралельної роботи синхронної машини з мережею нескінченної потужності з напругою U : а - при відсутності обміну потужністю, б - при обміні активною потужністю, в - при обміні реактивною потужністю.

Співвідношення цих складових у робочому діапазоні значень кутів δ (рисунок 16.23) показує, що зміна моменту первинного двигуна M_M впливає, головним чином, на зміну активної потужності, що віддається генератором у мережу.

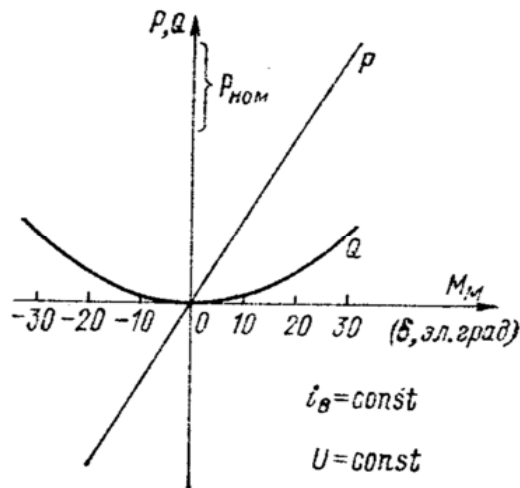


Рисунок 16.23 – Залежність активної й реактивної потужності паралельно працюючої синхронної машини при зміні прикладеного моменту обертання

Якщо зневажити втратами в генераторі, то буде справедливо рівність потужностей, що підводиться від двигуна та віддається в мережу.

Якщо первинний двигун створить гальмовий момент ($M_M < 0$), то з'явиться струм з негативною активною складовою у відношенні ЕРС і, отже, зміниться знак активної потужності.

Це вказує на перехід синхронного генератора в руховий режим, у якому електромагнітна енергія перетвориться в механічну.

Отже, для збільшення активної потужності, що віддається синхронним генератором при паралельній роботі, необхідно збільшувати момент його двигуна. Для зменшення цієї потужності момент двигуна повинен знижуватися.

Збільшення напруги порушення приводить до зростання ЕРС, показаного на рисунку 16.22, в для режиму без навантаження активною потужністю. При прийнятих умовах ЕРС E_3 збігається по фазі з напругою U , тому струм I_3 зсунутий по фазі на кут -90° , тому що опір контуру має індуктивний характер.

Зміна ЕРС генератора, викликана зміною його струму збудження, впливає в основному на зміну його реактивної потужності й незначно - на зміну його активної потужності (рисунок 16.24).

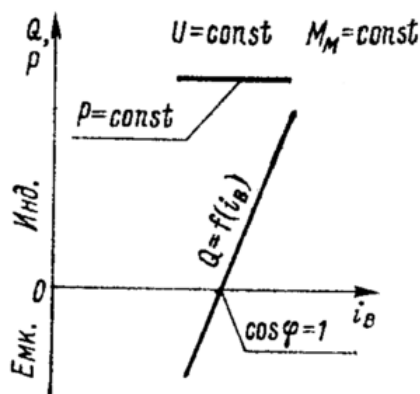


Рисунок 16.24 – Залежність реактивної й активної складових потужності синхронного генератора при зміні його струму збудження в режимі паралельної роботи

Включення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею або іншим генератором, називане **синхронізацією**, повинне вироблятися так, щоб при цьому не виникали значні поштовхи струму, електромагнітного моменту, зміни напруги.

Для забезпечення ідеальної синхронізації, коли відсутні перераховані порушення, необхідно, щоб амплітуди, частоти й фази мережі й генератора в момент включення були рівні.

При цьому дотримується постійна в часі рівність миттєвих значень напруг, тобто рівність нулю струму між обома джерелами. Порушення цих умов може призвести до небезпечних наслідків: механічним ушкодженням генератора й комутаційного апарата, обгорання контактів апарата, перервам у живленні споживачів електроенергії. На рисунку 16.25, а показані сплески струму й електромагнітного моменту генератора при синхронізації з мережею нескінченної потужності (крива 1) і генератором рівної потужності (крива 2).

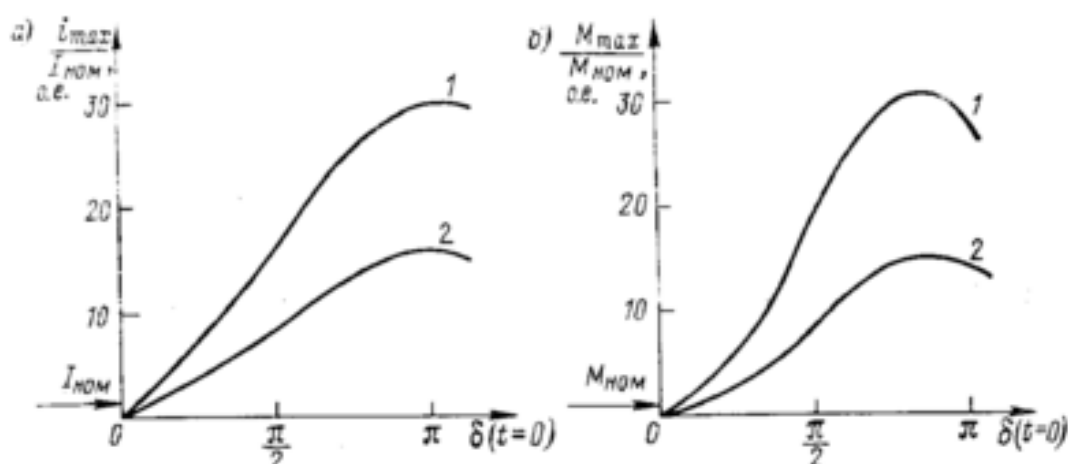


Рисунок 16.25 – Вплив початкової неузгодженості фаз на максимальні значення струмів (а) і електромагнітних моментів (б)

На судах у момент включення генератора на паралельну роботу різниця фаз не повинна перевищувати 10° . Включення синхронних генераторів на паралельну роботу при відсутності різниці фаз, але при наявності невідповідності частот, викликає процес, називаний **втягуванням у синхронізм**.

У процесі синхронізації відбувається зміна кінетичної енергії роторів: зменшення частоти в більше швидкого й збільшення частоти в більше повільного. Процес вирівнювання частот суднових генераторів відбувається коливально, із загасанням, обумовленим втратами в генераторах і лінії їхнього зв'язку. Якщо початкове ковзання вище 3-5%, то в генератора втягування в синхронізм не відбувається.

Для підвищення точності й швидкості здійснення процедури включення на паралельну роботу на судах використовують автоматичні пристрої, називані **синхронізаторами**.

16.3 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

16.3.1 Загальні відомості

Машинами постійного струму називаються обертові перетворювачі механічної енергії в електричну (у генераторному режимі) або електричної енергії в механічну (у руховому) при постійному за знаком напрузі. Електричні машини постійного струму (рисунок 16.26) оборотні: вони можуть працювати як у генераторному, так і в руховому режимі.

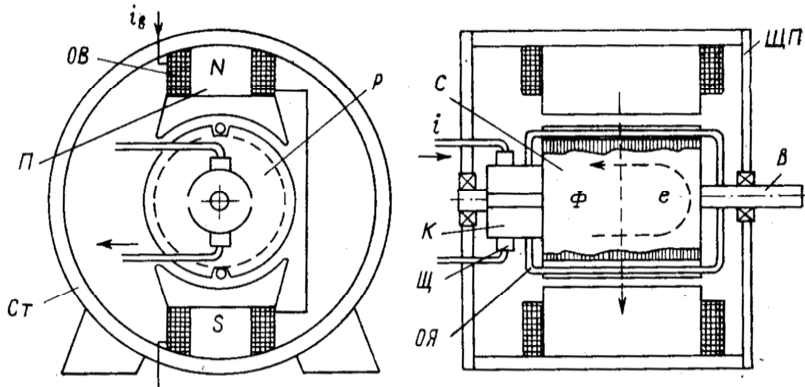


Рисунок 16.26 - Схема будови машини постійного струму

Основними нерухливими елементами конструкції машин постійного струму є статор Ст, що має полюси з обмотками, підшипникові щити й щітковий апарат. Статор має форму товстостінного сталевго циліндра і є частиною магнітопроводу для основного магнітного потоку машини. За допомогою статора здійснюється кріплення машини на фундаменті й кріплення полюсів П з обмотками збудження ОЗ і підшипникових щитів ЩП.

Серійні суднові машини загального призначення мають 2-3 пари полюсів. Магнітопровід полюсів набирається з тонких пластин електротехнічної сталі. У машин малої потужності «залізо» полюсів суцільне.

Поверхні «заліза» полюсів, звернені до статора й ротора, мають циліндричну форму. На магнітопровід полюсів накладається обмотка, протікання по якій струму збудження створює основне магнітне поле.

У підшипникових щитах, що встановлені на торцевих сторонах статора, перебувають підшипники, у яких обертається ротор Р, називаний також якорем. На валу В ротора машини жорстко укріплені пакети листів електротехнічної сталі С, які утворюють магнітопровід якоря, і колектор К.

У пакетах стали передбачені аксіальні пази, що служать для укладання обмотки якорі ОЯ, у якій створюється основна ЕРС машини. Вал сприймає момент електромагнітних сил взаємодії поля полюсів і струму якоря, а також зовнішній механічний момент двигуна або механізму навантаження, приєднаних до машини. Колектор (рисунок 16.27), що складається з ізольованих друг від друга мідних пластин, призначений для контактного приєднання обертової обмотки якоря ОЯ до нерухливих вугільних щіток.

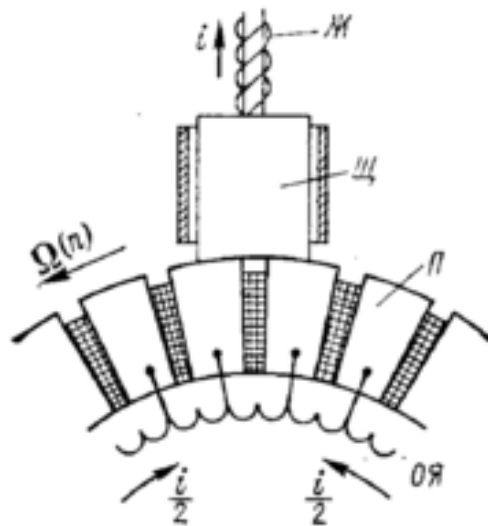


Рисунок 16.27 – Ескіз контактної сполуки якоря й щітки

Щітки своїми торцевими поверхнями ковзають по поверхні пластин П. Струмopовідні джгути щіток Ж с допомогою внутрішньої проводки машини приєднуються до зовнішніх клем, через які машина підключається до зовнішньої мережі або до навантаження відповідно в генераторному або руховому режимах.

Взаємодія основних складових частин машини в генераторному режимі показане на рисунку 16.28.

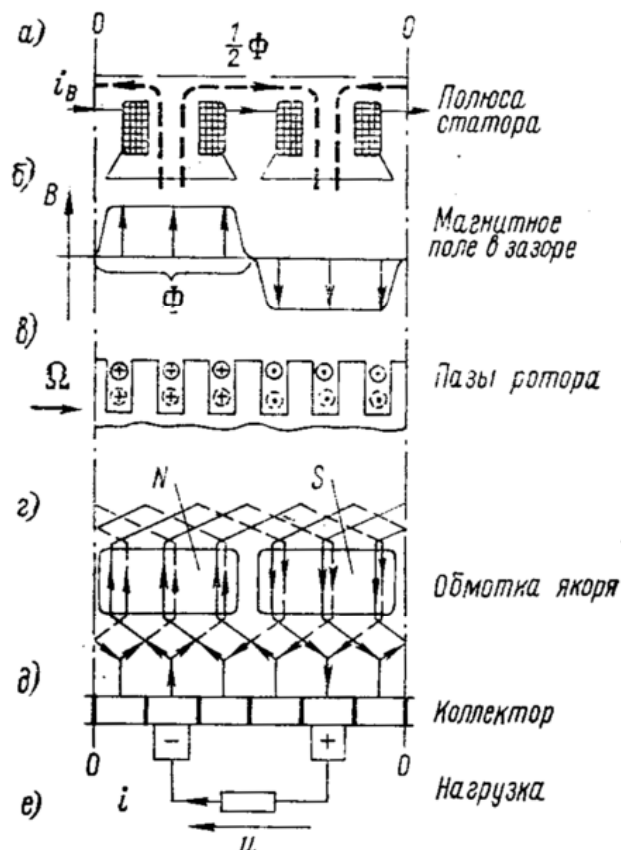


Рисунок 16.28 – Взаємодія основних елементів генератора постійного струму

Струм порушення, протікаючи по обмотках полюсів статора (рисунок 16.28, а), створює магнітне поле, описуване загальним магнітним потоком Φ або епюром

магнітної індукції в повітряному зазорі по окружності якоря (див. рисунок 16.28, б). Обмотка, покладена тут у два шари в пази якоря (рисунок 16.28, в), перебуває в магнітному полі полюсів. У генераторному режимі ротор обертається приєднаним двигуном з кутовою швидкістю Ω . На ділянках обмотки якоря, що перебувають у пазах, при його обертанні в магнітному полі наводиться ЕРС. Ці «активні» ділянки обмотки з'єднуються один з одним за допомогою лобових ділянок обмотки, що перебувають поза зоною дії полюсів (зони N і S на рисунку 16.28, г). Схема сполюки активних ділянок забезпечує підсумовування ЕРС. До лобових частин обмотки з однієї сторони якоря приєднуються пластини колектору (див. рисунок 16.28, д). Щітки на колекторі встановлюються в поздовжній площині симетрії полюсів, де напруга між пластинами має найбільше значення. Обмотка включена між щітками двома паралельними гілками, струми в які однакові (рисунок 16.28, е). У машинах постійного струму використовуються й інші типи обмоток (із числом гілок більше двох). При числі пар полюсів більше одиниці щітки можуть з'єднуватися паралельно (для збільшення струму) або послідовно (для збільшення напруги).

16.3.2 Електрорушійна сила й електромагнітний момент якоря

Магнітне поле машини, створене обмоткою збудження, концентрується головним чином у межах магнітопроводу - полюсів і якоря (рисунок 16.29).

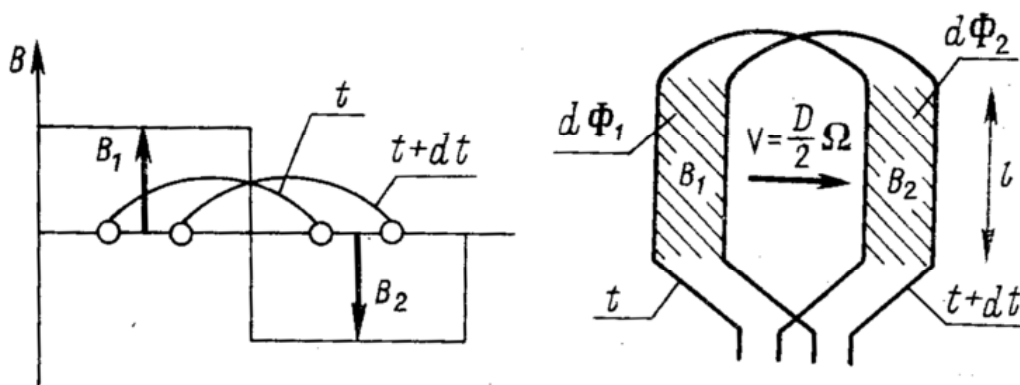


Рисунок 16.29 – Зміна магнітного потоку через виток обмотки якоря, що обертається в магнітному полі з індукцією B

При обертанні якоря з кутовою швидкістю Ω активні частини l кожної петлі обмотки переміщаються паралельно самим собі по дугах, довжини яких dx приблизно дорівнюють лінійному переміщенню точок окружності якоря с діаметром D за час dt : $dx = \Omega(D/2)dt$.

Зміна потоку Φ , що пронизує кожен виток обмотки, при припущенні сталості магнітної індукції B у межах полюсного розподілу $d\Phi = -BWl dt$.

Число таких послідовно з'єднаних витків W в одній паралельній гілці обмотки, що має N активних стрижнів на якорі й $2a$ паралельних гілок, дорівнює $N/(2a)$. Магнітний потік одного полюса Φ при зроблених допущеннях дорівнює добутку середнього значення індукції B на площу поверхні якоря під одним полюсом S_1 , що при числі пар полюсів p дорівнює $0,5\pi D l / p$. За час dt повна зміна потокозчеплення

$d\psi$ контуру кожної паралельної обмотки якоря при його обертанні в полі полюсів дорівнює $d\Psi = -\frac{Np}{2\pi a}\Phi\Omega dt$.

Тоді основне рівняння ЕРС обертання, що індукується у якорі машини постійного струму

$$e = c\Phi\Omega, \quad (16.3)$$

де $c = Np/(2\pi a)$ залежить від конструктивних і схемних параметрів і для даної машини - величина постійна.

Магнітний потік ненавантаженої машини Φ залежить від магніторушійної сили полюсів (що залежить від числа витків обмотки збудження й токи через неї) і від магнітного опору магнітопроводу. При ненасиченому магнітопроводі цей потік прямо пропорційний току порушення.

Залежність ЕРС від струму порушення при сталості кутової швидкості (рисунок 16.30, а) називається *характеристикою холостого ходу*.

Нелінійність цієї характеристики при більших струмах збудження пояснюється насиченням магнітопроводу, а ненульове значення при нульовому струмі – залишковою намагніченістю. На рисунку 16.30, б показана залежність ЕРС від частоти обертання при постійному струмі порушення. Ця лінійна залежність дозволяє використовувати машини постійного струму як датчики кутової швидкості – *тахогенераторів*.

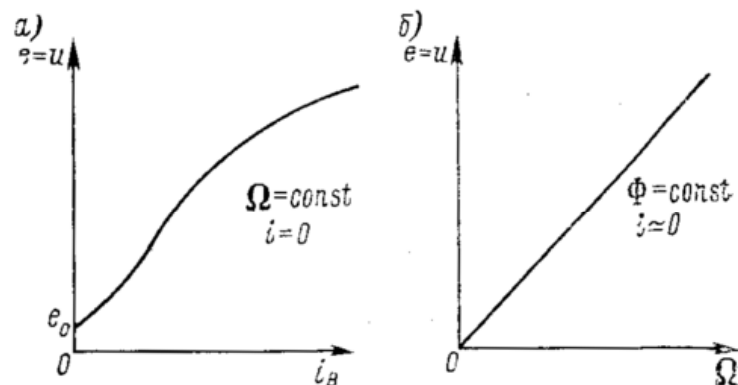


Рисунок 16.30 – Характеристика холостого ходу генератора постійного струму при постійній кутовій швидкості (а) і постійному потоці збудження (б)

Електромагнітна потужність машини постійного струму з точністю в кілька відсотків дорівнює механічній потужності на валу. Тоді рівняння електромагнітного моменту

$$M = c\Phi i. \quad (16.4)$$

Це рівняння справедливо як для генераторного, так і рухового режиму роботи машини. У генераторному режимі напрямки дії електромагнітного моменту й кутової швидкості протилежні, а в руховому - збігаються. Напрямки ЕРС і струму в генераторному режимі збігаються, а в руховому - протилежні.

При обертанні якоря колектори машини по черзі входять у контакт із щітками через малий опір перехідного контакту пластина-щітка. Переходячи із пластини на пластину, щітки замикають накоротко секції, що комутують обмотки. У секціях

виникають ЕРС самоіндукції, взаємоіндукції (із сусідніми секціями) і обертання в магнітному полі, перекрученому реакцією якоря. Перехід щітки із пластини на пластину супроводжується іскрінням, що викликає обгорання поверхонь щіток і пластин. Додаткові полюси машини сприяють усуненню (ослабленню) цього ефекту. Протікання по обмотці якоря струму викликає виникнення ефекту, називаного **реакцією якоря, що** проявляється в перекручуванні магнітного поля, створюваного полюсами. При більших струмах якоря такі перекручування є істотними (рисунок 16.31) і зменшують ЕРС якоря. Крім того, з'являється іскріння в місцях контакту щіток з колектором.

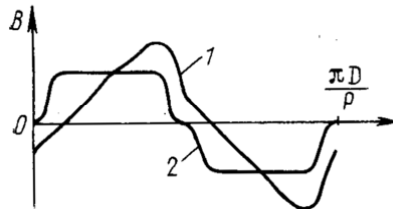


Рисунок 16.31 – Розподіл індукції в повітряному зазорі в режимі холостого ходу (1) і при наявності навантаження (2)

Для ослаблення дії реакції якоря в генераторах потужністю більше 1 кВт передбачаються додаткові полюси ДП, що мають обмотки ОДП, які обтикаються струмом якоря (рисунок 16.32) та коректують корисне магнітне поле тим сильніше, чим більше перекручування.

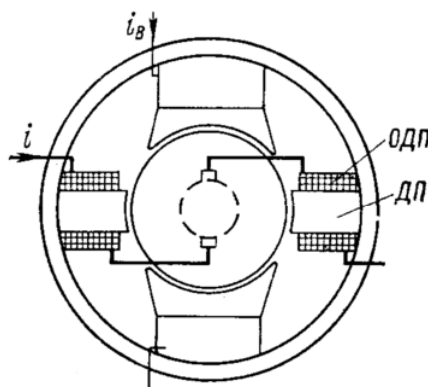


Рисунок 16.32 – Схематичний розріз машини постійного струму з додатковими полюсами

У суднових умовах машини постійного струму використовуються в основному як двигуни. У процесі їхньої експлуатації потрібна систематичне чищення колектору від окислів і нагару, а також періодична заміна щіток, що зносилися, що є істотним недоліком.

16.3.3 Генераторний режим машини постійного струму

Основною характеристикою генератора постійного струму як джерела живлення електроенергією є залежність його напруги від струму навантаження, називана **зовнішньою характеристикою**. Коло якоря генератора описується рівнянням джерела напруги $\mathcal{E}$ із внутрішньої ЕРС e і внутрішнім опором r_Σ , що дорівнює сумі опорів всіх послідовно включених елементів кола якоря (наприклад, обмотки якоря, додаткових полюсів).

$$u = e - r_{\Sigma} i. \quad (16.5)$$

Зовнішня характеристика визначається схемою живлення обмоток головних полюсів. У машин постійного струму використовуються чотири основних варіанти включення обмоток збудження (рисунок 16.33):

- 1) на незалежне джерело збудження (машини незалежного збудження);
- 2) паралельно колу якоря (машини паралельного збудження, або шунтові);
- 3) послідовно в коло якоря (машини послідовного збудження, або серієсні);
- 4) однієї обмотки паралельно колу якоря, іншої обмотки послідовно в коло якоря (машини змішаної сполуки, або компаундні).

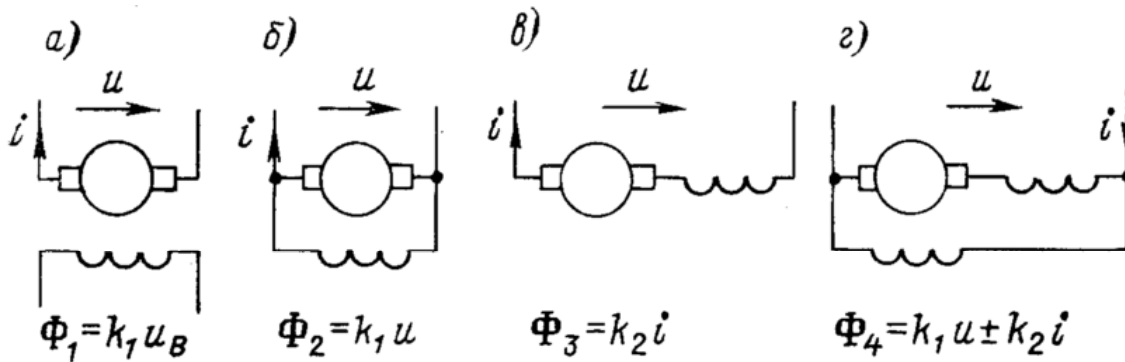


Рисунок 16.33 – Схеми машин з незалежним (а), паралельним (б), послідовним (в) і змішаним (г) збудженням

У звичайних машин постійного струму опір обмотки паралельного збудження значно більше, а опір обмотки послідовного збудження значно менше номінального опору навантаження. Опір обмотки якоря й додаткових полюсів не перевищують декількох відсотків від номінального опору навантаження.

Зовнішні характеристики для різних варіантів включення обмоток наведені на рисунку 16.34.

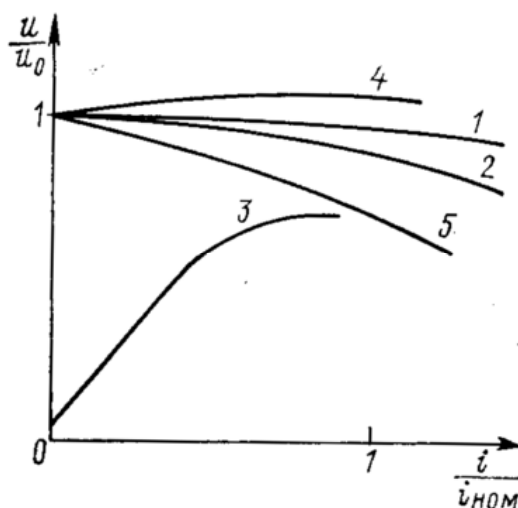


Рисунок 16.34 – Зовнішні характеристики генераторів постійного струму з незалежним збудженням (1) і самозбудженням при паралельному (2), послідовному (3) і змішаному включенні обмоток: згідному (4) і противмиканні (5)

Генератори з незалежним збудженням зберігають сталість потоку доти, поки не наступає насичення магнітопроводу. Режим короткого замикання найнебезпечніший у випадку незалежного збудження. Виникають значні ЕРС, що приводять до ушкоджень елементів конструкції, виникає іскріння по всьому колектору (коловий вогонь), що приводить до обгорання поверхні колектору й щіток. Генератори із самозбудженням і обмоткою паралельного порушення мають більш «м'яку» зовнішню характеристику.

Сталий струм короткого замикання в цьому випадку не перевищує номінального значення струму навантаження.

При необхідності підтримки сталості вихідної напруги генератора використовують регулювання його струму збудження.

Значення струму збудження, що забезпечує сталість напруги на виході генератора описуються регульовальною характеристикою (рисунок 16.35, а).

Принципові схеми регулювання струму порушення представлені на рисунку 16.35, б, в. Генератори послідовного збудження використовуються рідко, тому що є значна взаємозалежність вихідної напруги й струму навантаження.

Порушення лінійності зовнішньої характеристики при більших струмах навантаження відбувається через насичення магнітного кола в результаті посилення дії реакції якоря. Генератори зі змішаним збудженням при зустрічному включенні наближаються до ідеального джерела струму, а при згоднім включенні - до ідеального джерела напруги.

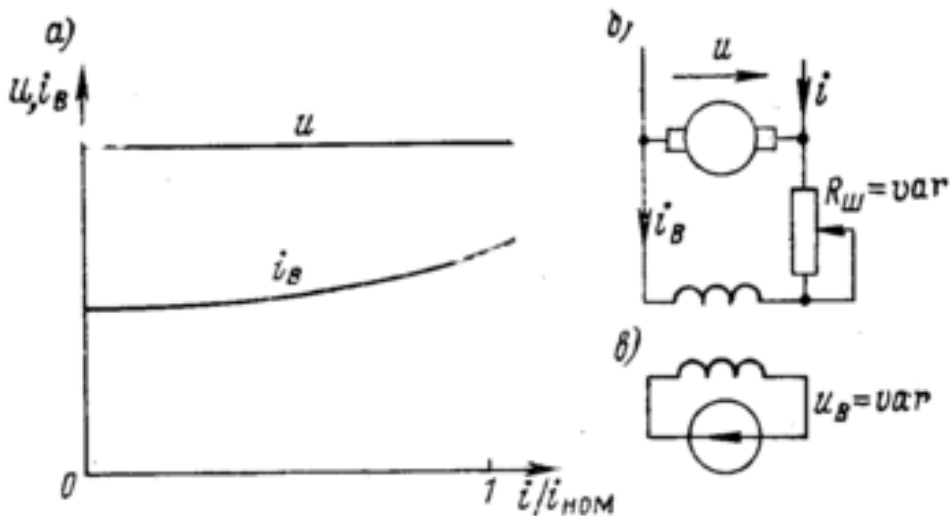


Рисунок 16.35 – Регульовальна характеристика генератора постійного струму (а) і схеми керування порушенням при самозбудженні (б) і незалежному збудженні (в)

Автономні генератори постійного струму повинні мати властивість самозбудження без використання додаткових джерел живлення. Фізично цей процес реалізуємо, якщо при нульовому струмі збудження є залишкове магнітне поле. Якщо опір збудливого контуру великий, то самозбудження припиняється при малих значеннях ЕРС (рисунок 16.36).

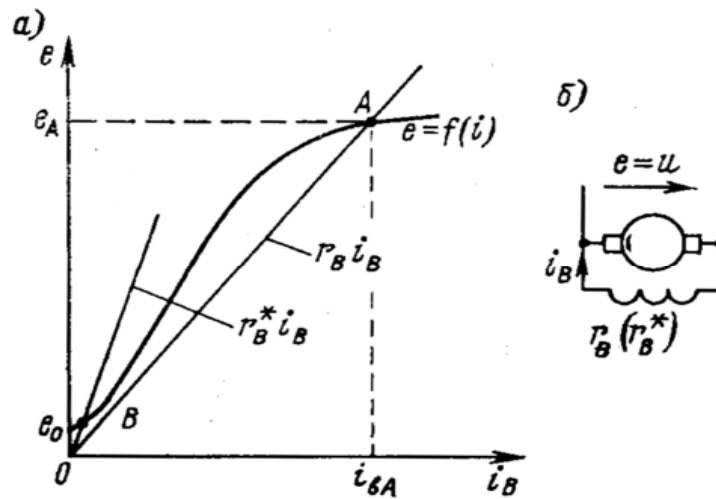


Рисунок 16.36 – Характеристика холостого ходу (а) і схема збудження генератора (б)

16.3.4 Руховий режим машин постійного струму

Машина постійного струму в руховому режимі перетворить електричну енергію джерела постійної напруги в механічну. Формальною ознакою рухового режиму є збіг по фазі напрямку дії моменту електромагнітних сил і обертання якоря, а також різні напрямки ЕРС і струму, що протікає по ньому.

$$u = e + r_{\Sigma} i. \quad (16.6)$$

Механічна характеристика електродвигуна постійного струму описує основну для даного типу електричних машин залежність кутової швидкості якоря двигуна від моменту електромагнітних сил у сталих режимах.

$$\Omega = \frac{u}{c\Phi} - \frac{r_{\Sigma}}{c^2\Phi^2} M. \quad (16.7)$$

Робота двигуна характеризується також залежностями потужності, що підводиться до двигуна, ККД, струму якоря, обертового моменту, частоти обертання та ін. від механічної потужності на валу. На рисунку 16.37 показані ці характеристики для двигуна з паралельним збудженням.

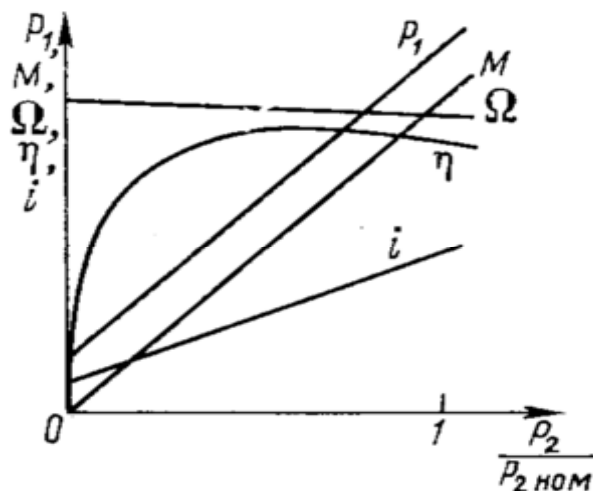


Рисунок 16.37 – Робочі характеристики двигуна з паралельним збудженням

Максимальні значення ККД суднових двигунів постійного струму перебувають у межах 0,7-0,9. Менші значення ККД ставляться до двигунів з малою потужністю.

Для пуску двигунів постійного струму та керування їхньою кутовою швидкістю використовуються додаткові опори в колах якоря й обмотки збудження. Із цією ж метою може використовуватися живлення якоря й обмотки від незалежних джерел регульованої напруги (рисунок 16.38)

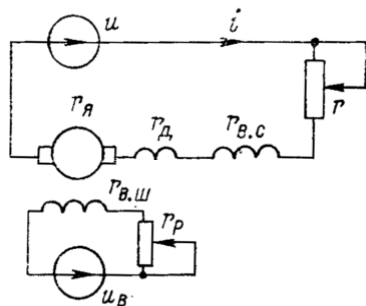


Рисунок 16.38 – Схема двигуна змішаного збудження з пусковим і регулюючим опорами й незалежним джерелом живлення обмотки паралельного збудження

Двигун зі схемою паралельного збудження має механічну характеристику, описану лінійним рівнянням.

Природна механічна характеристика двигуна під час відсутності додаткових регульовальних опорів жорстка (рисунок 16.39, лінія 1)

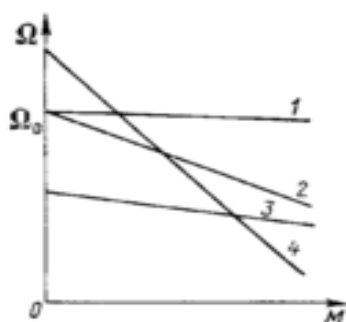


Рисунок 16.39 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження

Малий нахил характеристики пояснюється малим значенням опору кола якоря. Введення додаткового опору в коло якоря дозволяє зменшити кутову швидкість приєднаного механізму (рис. 16.39, лінія 2). Однак при цьому відбувається істотне збільшення втрат енергії.

Енергетично більш вигідним є збільшення опору в обмотці збудження (рисунок 16.39, лінія 4). Однак надмірне збільшення цього опору, а тим більше його обрив, приводять до «розносу» електродвигуна.

Економічне й плавне керування роботою двигуна досягається зміною напруг кіл джерел живлення кола якоря (рисунок 16.39, лінія 3) і кола збудження. Ці способи в цей час реалізуються за допомогою напівпровідникових перетворювачів на базі тиристорів і транзисторів.

Керування за допомогою регульованого опору або регульованої напруги необхідно в режимах пуску двигунів. Пряме включення якоря електродвигуна на

номінальну напругу приведе до появи пускових струмів в 20-30 разів більших номінального, що приведе до обгорання колектору та механічному руйнуванню машини. Для обмеження пускового струму якоря необхідно або включати додатковий опір, або робити пуск на малих напругах.

В електродвигуні зі схемою послідовного збудження механічна характеристика показує істотну залежність його кутової швидкості від обертаючого моменту. Робота такого двигуна без навантаження заборонена, тому що приводить до значного росту кутової швидкості (рисунок 16.40, лінія 1).

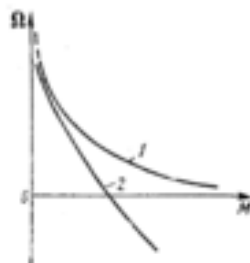


Рисунок 16.40 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження

Введення в коло якоря додаткового опору дозволяє збільшити крутість цієї характеристики й дає можливість роботи в гальмовому режимі. Останній обумовлений переходом машини в режим генератора.

Електродвигуни постійного струму застосовуються в якірне-швартових і вантажопідйомних пристроях, де потрібне плавна зміна кутової швидкості в великих межах. Найбільш зробленим способом керування режимами роботи такого двигуна є живлення якоря від окремого джерела постійного струму (система генератор-двигун) або регульованого напівпровідникового перетворювача. Електродвигуни постійного струму використовуються як двигуни гребних валів на судах із гребними електричними установками. Однієї з наймогутніших є гребна електрична установка криголама-атомохода «Сибір», що має потужність 54 Мвт.

Контрольні питання і завдання до глави 16

1. Що називається асинхронними машинами?
2. Опишіть пристрій і основні характеристики короткозамкнених асинхронних машин і машин з фазним ротором.
3. Опишіть механічні й робочі характеристики асинхронних двигунів
4. Опишіть режими роботи асинхронних двигунів.
5. Перелічіть основні схеми тиристорного керування із вказівкою переваг і недоліків.
6. Що називається синхронними машинами?
7. Опишіть устрій синхронних машин.
8. Опишіть характеристики синхронних генераторів.
9. Опишіть вимоги до генераторів при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності.
10. Що називається машинами постійного струму?
11. Опишіть пристрій машин постійного струму.
12. Опишіть характеристики машин постійного струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного управління. Підручник – К.: Либідь, 2007. – 656с.
2. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного управління. – Київ.: Либідь, 1997. – 542с.
3. Теория автоматического управления в 2 ч.- 2 изд. Теория линейных систем автоматического управления/ под ред. А.А.Воронова.-М.: Высш.шк, 1986 – Ч.1. 367 с.
4. Теория автоматического управления в 2 ч.- 2 изд. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления/ под ред. А.А.Воронова.-М.: Высш.шк, 1986 – Ч.2. 504 с.
5. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного управління та електроприводи.- К.: Либідь, 2005. – 680 с.
6. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления/ Под ред. В.А.Бесекерского.- М.: Наука, 1978.- 512 с.
7. Суевалов Л.Ф. Справочник по расчетам судовых автоматических систем. Л.: Судостроение, 1977. – 376 с.
8. Давачі: Довідник /З.Ю.Готра, Л.Я.Ільницький, Є.С.Поліщук та ін.; За ред. З.Ю.Готри та О.І.Чайковського. - Львів: Каменяр, 1995. – 312 с.6 табл.:рис.
9. Элементы и устройства автоматики/В.С.Подлипенский, Ю.А.Сабинин, Л.Ю.Юрчук; Под ред. Ю.А.Сабинина: Учебник для вузов. – Спб.: Политехника, 1995. – 472 с., ил.
10. Виглеб Г. Датчики: Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с., ил.
11. Элементы автоматики/Колосов С.П., Калмыков И.В. и Нефедова В.И., М., «Машиностроение», 1970, 632 с., ил.
12. Коновалов Л.И., Петелин Д.П. Элементы и системы электроавтоматики: Учеб. пособие для студ. вузов спец. «Автоматизация и компл. механизация хим.-технол.процессов», 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш.шк., 1985. – 216 с., ил.
13. Жадобин Н.Е., Крылов А.П. Элементы судовой автоматики. Учебное пособие (издательский проект «Академия», серия «Библиотека судового механика») – Спб.: «Элмор», 2002. – 128 с.