

Лекція.

Індуктивні перетворювачі

План

1. Визначення та області використання індуктивних перетворювачів.
2. Термінологія по даній темі (магнітне коло, закон Гопкінсона і т.п.).
3. Одинарні індуктивні перетворювачі.
4. Диференційні індуктивні перетворювачі.

Принцип дії індуктивних перетворювачів базується на зміні їх індуктивного чи активного електричного опору при змінах вхідного сигналу.

Індуктивні перетворювачі (датчики) застосовують у пристроях автоматики для вимірювання невеликих кутових чи лінійних переміщень, контролю за тиском газу, температури, сили, швидкості і т.д

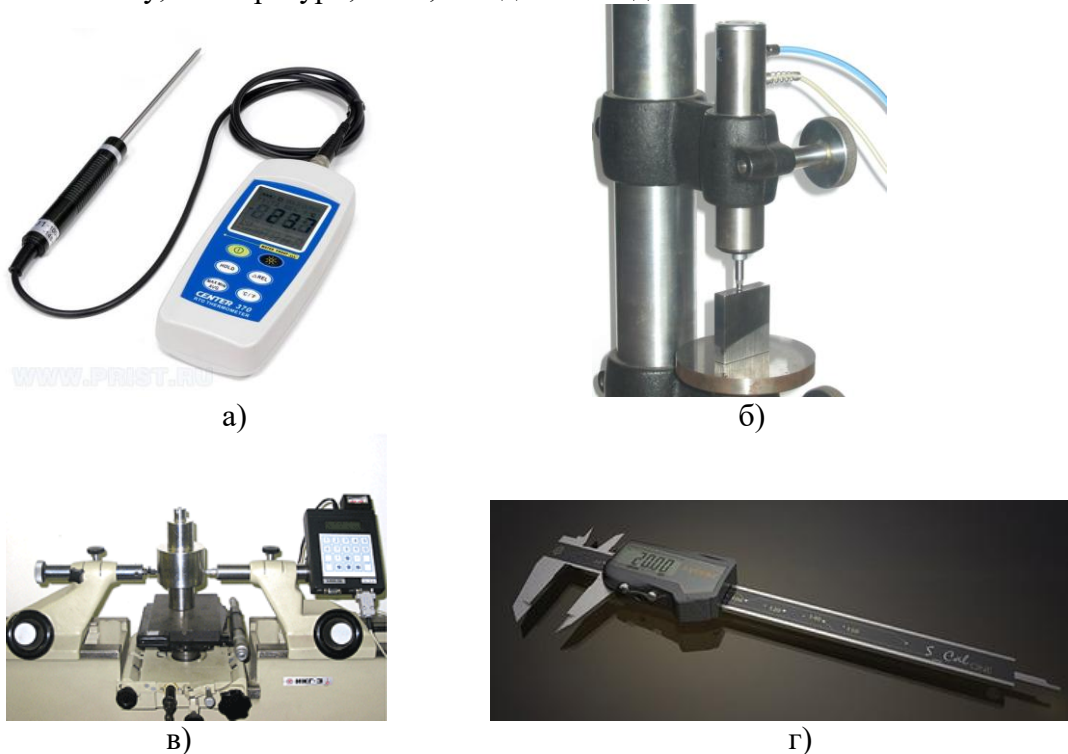


Рис.1 Зовнішній вигляд- а) та застосування індуктивних перетворювачів – б-г).

1. Одинарні індуктивні перетворювачі

Індуктивний перетворювач представляє собою котушку індуктивності (дросель), повний опір якої змінюється при переміщенні елементів магнітного кола відносно одне одного.

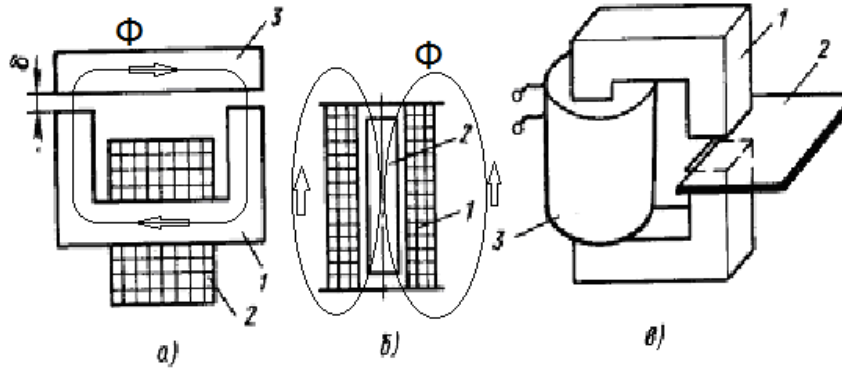


Рис.2 Схематичне зображення перетворювачів із змінною індуктивністю - а,б) та змінним активним опором - в).

Під магнітним колом розуміють сукупність областей простору , де локалізоване магнітне поле . Для магнітного кола справедлива формула Гопкінсона ,

$$\Phi_m = \frac{F_m}{R_m} \quad (1)$$

де , Φ_m - магнітний потік ; F_m - магніторушійна сила ; R_m - повний магнітний опір кола .

При цьому

$$F_m = IW , \quad (2)$$

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_0 \mu_1 S} + \frac{l_2}{\mu_0 \mu_2 S} , \quad (3)$$

де I - сила електричного струму ; l_1, l_2 - довжина першої і другої частини магнітного кола ; S - площа перерізу магнітного кола ; $\mu_0 \mu_1, \mu_2$ - магнітні сталі , W - число витків котушки.

Індуктивність котушки L - це коефіцієнт пропорційності між електрорушійною силою самоіндукції \mathcal{E}_i в контурі, яка виникає при зміні струму I . Вимірюється індуктивність в одиницях Генрі. Якщо в контурі сила струму змінюється на 1 Ампер за 1 секунду, а ЕРС самоіндукції при цьому рівна 1 Вольт , то контур має індуктивність в 1 Генрі.

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} . \quad (4)$$

Існує дві групи індуктивних перетворювачів : із змінною індуктивністю , а також із змінним активним опором . Перетворювач із змінною індуктивністю - а) складається із П - подібного магнітопроводу 1 , на якому розміщена електрична катушка 2 , та рухомого ярма 3 . Під впливом вимірювального вхідного сигналу змінюється відстань між магнітопроводом та ярмом, що

приводить до зміни магнітного опору і, відповідно, до зміни індуктивності перетворювача.

Інший тип індуктивного перетворювача (плунжерний) зображено на рисунку б). Перетворювач представляє собою котушку 1, всередині якої знаходиться феромагнітний стержень 2 (плунжер), який переміщується під дією вимірювального вхідного сигналу. При цьому змінюється індуктивність перетворювача. Найбільша індуктивність має місце при середньому положенні стержня відносно котушки.

Феромагнетики – це речовини, у яких внутрішнє магнітне поле може у сотні і тисячі разів перевищувати напруженість зовнішнього магнітного поля, яке його утворює. До таких речовин належать, наприклад, залізо, кобальт і т.д. Для них величина $\mu_0 \gg 1$.

Схема індуктивного перетворювача із змінним активним опором, приведена на рисунку в). У проміжок магнітного кола 1, під дією вхідного сигналу, вводиться пластинка 2 з високою електропровідністю. В результаті, під впливом магнітного поля, у пластинці наводяться вихрові струми, що приводить до втрат активної потужності в електричному колі котушки 3. Такий результат еквівалентний збільшенню активного опору котушки.

Визначимо залежність індуктивного опору Z котушки від величини переміщення δ ярма перетворювача. Таку залежність

$$Z = i\omega L, \quad (5)$$

де ω - частота струму, приймаємо за її функцію перетворення. Значення активного опору котушки вважаємо малим, порівняно з індуктивним і його не враховуємо.

Відомо, що індуктивність котушки

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{w \cdot \Phi_m}{I} \quad (6)$$

, де Ψ - потокозчеплення витків котушки з магнітним полем; w - число витків котушки, I - струм. Враховуючи вирази (1,2) отримуємо, що

$$L = \frac{w^2}{R_m}. \quad (7)$$

В даному виразі магнітний опір кола R_m складається із магнітного опору R_{CT} металевої частини та опору повітряного зазору R_{Π} . Загальний опір магнітного кола

$$R_m = R_{CT} + R_{\Pi} = \frac{l_{CT}}{\mu_0 \mu_{CT} S} + \frac{2\delta}{\mu_0 \mu_{\Pi} S} = \frac{1}{\mu_0 S} \left(\frac{l_{CT}}{\mu_{CT}} + \frac{2\delta}{\mu_{\Pi}} \right) \quad (8)$$

де μ_{CT} - магнітна постійна сталі; μ_{Π} - магнітна постійна повітря; l_{CT} - довжина середньої силової лінії магнітного поля в металевій частині магнітопроводу; 2δ - повітряний проміжок.

Тоді величина індуктивності перетворювача

$$L = \frac{w^2 \mu_0 S}{2\delta + \frac{l_{CT}}{\mu_{CT}}} \quad (9)$$

Оскільки $2\delta \gg \frac{l_{CT}}{\mu_{CT}}$, (μ_{CT} має дуже велике значення : для сталі -200 , для заліза – 5000 , а для сплаву пермалой – 50000), то

$$L = \frac{w^2 \mu_0 S}{2\delta} \quad (10)$$

Підставляючи вираз (10) у (5), отримаємо, що індуктивний опір

$$Z \approx \frac{i\omega w^2 \mu_0 S}{2\delta} \quad (11)$$

Відповідний до (11) графік функції перетворення показано на рис.3.

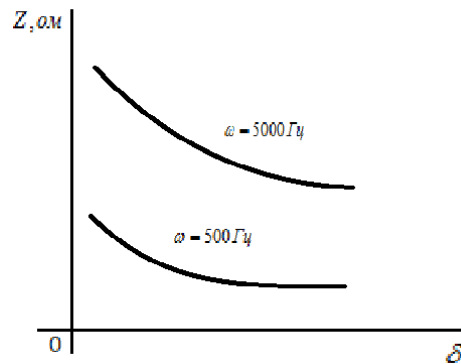


Рис.3 .

Таким чином, функція перетворення є нелінійною відносно величини переміщення ярма перетворювача. Характер зміни опору залежить від частоти струму. За низьких частот, коли індуктивний опір стає близьким чи навіть меншим активного опору витків котушки, зміна повного електричного опору сильно зменшується. Тому через котушку пропускають струм високої частоти (1000 – 5000 Гц), що дозволяє отримати більші значення вихідного сигналу.

Індуктивні перетворювачі із змінною довжиною повітряного проміжку можна вважати практично лінійними лише при малих відносних змінах довжини цього проміжку $\frac{\Delta\delta}{\delta}$. В реальних конструкціях таких перетворювачів при $\frac{\Delta\delta}{\delta} = 0.1 \dots 0.15$ відносна зміна індуктивності не перевищує 0,05...0,1 при нелінійності функції перетворення 1...3 %. Тому, такі перетворювачі застосовують для перетворень малих переміщень (0,01...10мм).

Для наступного перетворення зміни індуктивності у зміну напруги може застосовуватись електрична схема, що на рис.4.

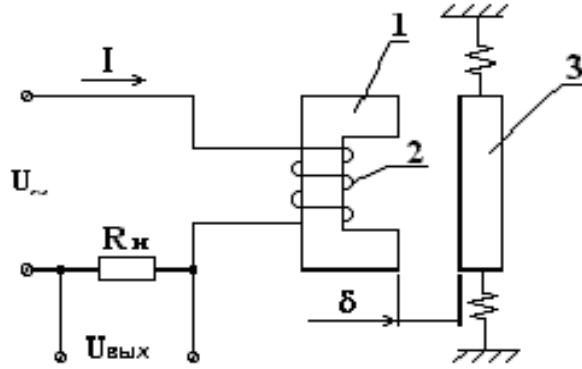


Рис.4 . Електрична схема ввімкнення індуктивного перетворювача у вимірювальне коло.

На витки котушки 2 через опір навантаження R_H подається напруга живлення U змінного струму I . Струм у колі визначається виразом :

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_H + r_D)^2 + (\omega L)^2}}, \quad (12)$$

де r_D - активний опір витків котушки. Оскільки активна складова кола постійна, то зміна струму I може відбуватись лише за рахунок індуктивної складової, яка, у свою чергу, залежить від величини повітряного проміжку δ .

Кожному значенню δ відповідає певне значення струму I , який створює падіння напруги $U_{ВИХ}$ на опорі R_H . Величина

$$U_{ВИХ} = IR_H \quad (13)$$

являє собою вихідний сигнал перетворювача. Підставляючи у (13) вирази (12), (10) отримуємо :

$$U_{ВИХ} = \frac{2IR_H\delta}{\omega w^2 \mu_0 S}. \quad (14)$$

Залежність $U_{ВИХ} = f(\delta)$ має в першому наближенні лінійний характер. Реальна характеристика має вид :

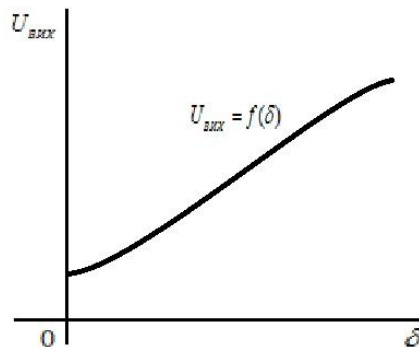


Рис.5 .

Деякі відхилення від лінійності функції перетворення (14), на початку і в кінці графіка, зумовлено зробленими, при отриманні виразу (14), допущеннями.

Визначимо чутливість Q індуктивного перетворювача. Згідно визначення чутливість перетворення це відношення зміни вихідного сигналу (наприклад, опору) до зміни вхідного сигналу (переміщення ярма):

$$Q = \frac{\Delta Z}{\Delta \delta} \quad (15)$$

Величину ΔZ визначимо із виразу (11).

$$\Delta Z \approx dZ = \frac{\partial Z}{\partial \delta} d\delta = -i \frac{\omega w^2 \mu_0 S}{2\delta^2} d\delta. \quad (16)$$

Тоді чутливість перетворення

$$Q = -i \frac{\omega w^2 \mu_0 S}{2\delta^2}. \quad (17)$$

Із виразу слідує, що зі збільшенням зазору δ різко (по квадратичному закону) падає чутливість і тому датчик може застосовуватись лише при малих переміщеннях ярма (0.1 – 5 мм).

На рис.6 зображено схему використання індуктивного перетворювача в датчику тиску. Вимірюємий тиск P газу переміщує мембрану 3 (первинний перетворювач) на якій закріплено ярмо індуктивного перетворювача (вторинний перетворювач). Переміщення ярма приводить до зміни індуктивного опору котушки і відповідно до зміни величини напруги вихідного сигналу $U_{\text{вих}}$.

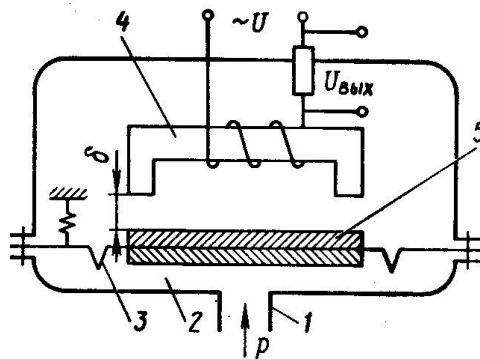


Рис.6 . Схема датчика тиску.

Індуктивні перетворювачі плунжерного типу застосовують для перетворення переміщень від 10 до 100 мм. В основі їх роботи лежить зміна магнітного опору частин розсіяного магнітного потоку при переміщенні плунжера.

Плунжерний перетворювач, рис. 7 а) складається із нерухої котушки 1 і рухомого феромагнітного стержня 2. Індуктивність котушки являється функцією занурення плунжера в середину котушки. На рис.7 б) зображено залежність індуктивності L катушки від глибини занурення X плунжера.

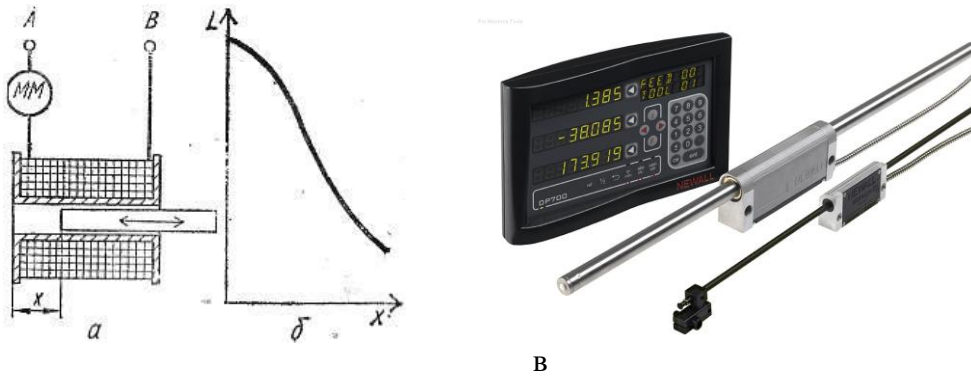


Рис.7 а,б). Схема плунжерного індуктивного перетворювача – а) , графік його функції перетворення – б) та зовнішній вигляд – в).

Оскільки магнітний потік замикається в основному через повітря , то такий перетворювач має меншу чутливість ніж перетворювач із змінним проміжком. По тій же причині для отримання необхідної індуктивності потрібна більша кількість витків котушки, що веде до збільшення її габаритів та ємності. Такі перетворювачі чутливі до впливу зовнішнього магнітного поля і тому потребують екранування.

Для вимірювання вихідного сигналу перетворювача може застосовують просте послідовне коло, рис.4.

2. Диференційні індуктивні перетворювачі.

Значного покращення лінійності з одночасним збільшенням чутливості можливо досягнути за допомогою диференційних індуктивних перетворювачів .

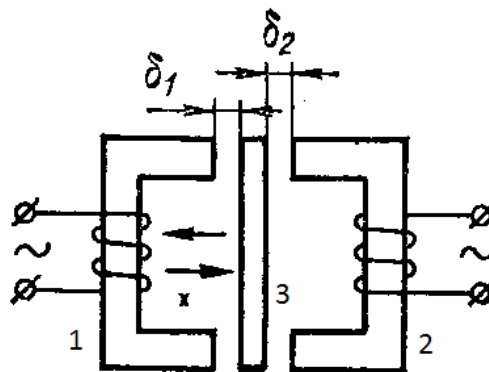


Рис.8. Схема диференційного індуктивного перетворювача.

Вони складаються із двох однакових одинарних перетворювачів 1, 2 , що мають одне спільне рухоме ядро 3. При переміщенні ядра 3 на деяку величину X , наприклад, вправо, індуктивність перетворювача 1 буде зменшуватись, а індуктивність перетворювача 2 - збільшуватись. Зазвичай диференційні перетворювачі вмикають у мостове вимірювальне коло, рис.7 .

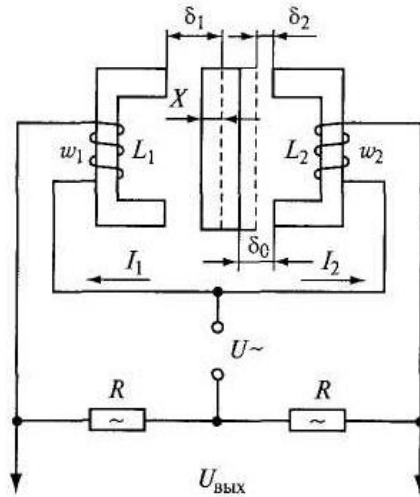


Рис.9 . Схема ввімкнення диференційного індуктивного перетворювача у мостове вимірювальне коло.

При середньому положенні ярма (повітряні проміжки рівні між собою), індуктивні опори Z_1, Z_2 обох одинарних перетворювачів однакові, тобто $Z_1 = Z_2 = Z_0$, (Z_0 – початкове значення опорів), а два інші плеча моста – однакові активні опори – R . Вихідна напруга моста $U_{\text{вих}} = 0$.

При переміщенні ярма, $Z_1 = Z_0 + i\omega L_1$, а $Z_2 = Z_0 + i\omega L_2$, різниця опорів стає відмінною від нуля, $\Delta Z = Z_1 - Z_2 \neq 0$. Якщо зміни опорів диференційного перетворювача невеликі то можна вважати, що напруга $U_{\text{вих}}$ у вимірювальній діагоналі моста змінюється пропорційно до $\Delta Z / Z$ і дорівнює :

$$U_{\text{вих}} = \frac{2URZ_0R_H}{(R + Z_0)[2Z_0R + R_H(R + Z_0)]} \cdot \frac{\Delta Z}{Z_0} \quad (18)$$

На рис.10 зображені графіки залежності комплексних опорів Z_1, Z_2 котушок диференційного перетворювача від переміщення δ . На цьому же рисунку зображена функція, яка характеризує закономірність зміни різниці $Z_1 - Z_2$ від вимірюємої величини δ .

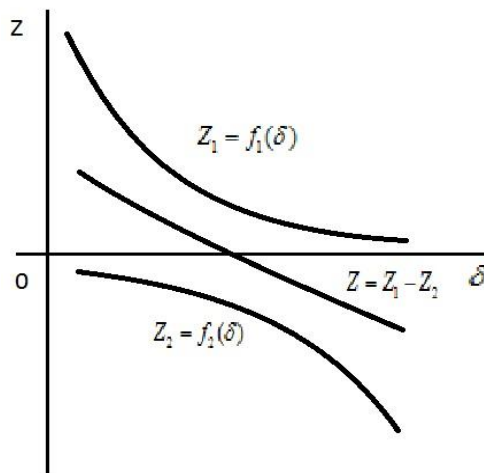


Рис. 10 .

Із наведених графіків слідує, що залежність $Z = Z_1 - Z_2 = f(\delta)$ має більш лінійний характер, чим кожна із функцій $Z_1 = f_1(\delta)$, $Z_2 = f_2(\delta)$.

Порівняно з одинарним індуктивним перетворювачем робочий діапазон диференційного перетворювача збільшується, приблизно в 4 рази (за рахунок кращої лінійності функції перетворення). Окрім цього, в такому перетворювачі суттєво зменшуються похибки, обумовлені впливом зміни температури навколишнього середовища.

На рис.11 зображено схему датчика тиску Р з використанням плунжерного диференційного індуктивного перетворювача 2. У якості первинного перетворювача застосовано трубку Бурдона 1.

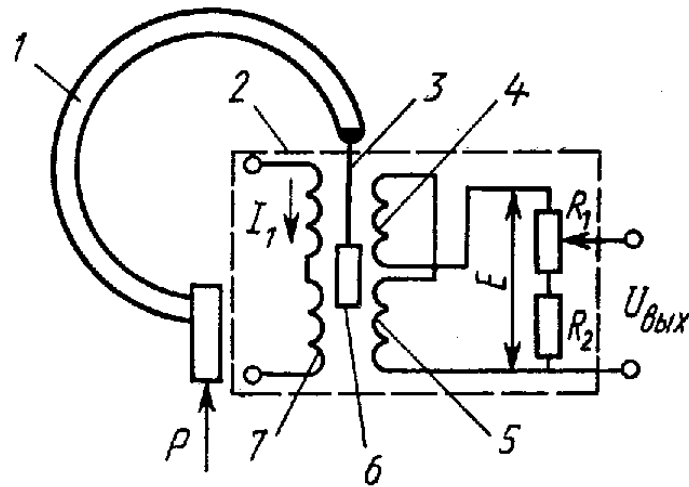


Рис.11 . Схема датчика тиску.

Заключення :

За допомогою індуктивних датчиків можливо:

- проведення контролю механічних переміщень, сили, температури;
- контроль діаметру сталюго дроту, товщини немагнітних покриттів на сталі, рух рідини та газів в резервуарах і т.д.

До їх переваг відносяться :

- простота конструкції і надійність в роботі;
- можливість підключення до джерел промислової частоти;
- відносно велика потужність на виході перетворювача (кілька десятків ват), що дає можливість під'єднувати контрольний прилад безпосередньо до перетворювача;
- висока чутливість.