ЛЕКЦІЯ №1

ЄМНІСНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

План:

1. Принцип роботи ємнісного перетворювача (ЄП). Вхідні та вихідні сигнали.
2. Чутливість ЄП .
3. Застосування ЄП.
4. Електричні схеми увімкнення ЄП у вимірювальне коло.

Ємнісний перетворювач (ЄП) являє собою конденсатор, електрична ємність якого змінюється залежно від змін вхідного сигналу.

Ємність конденсатора змінюється залежно від відстані δ між пластинами конденсатора, площі S взаємного перекриття пластин або діелектричної постійної ε середовища між пластинами, рис.1 а,б,в), згідно виразу:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{\delta} \quad , \qquad (1)$$

де ε_0 = 8.85*10^{-12}Ф/м - діелектрична постійна вакууму; ε - відносна діелектрична постійна середовища між електродами; S - площа перекриття електродів; δ - відстань між електродами.

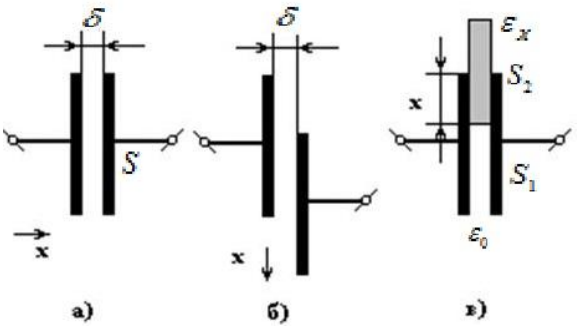


Рис.1 а,б,в). Схеми плоско паралельного ємнісного перетворювача.

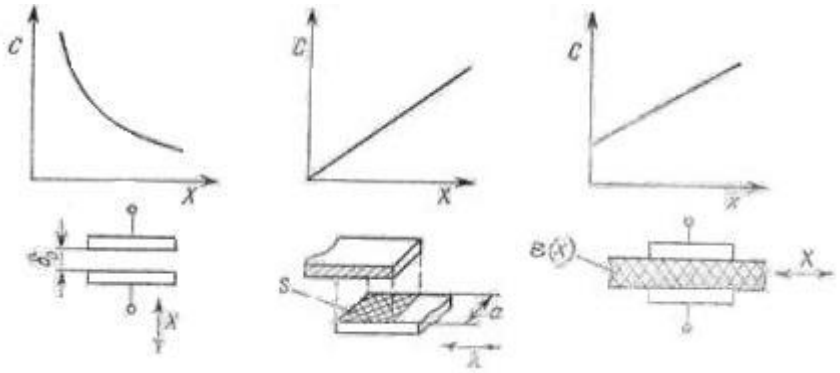
Формула (1) стосується перетворювачів, у яких вхідним сигналом є переміщення – а) або зміна площі взаємного перекриття електродів – б) , а вихідним сигналом – зміна ємності - С. Даний вираз являється функцією перетворення перетворювача.

Коли ж вхідною величиною є рівень перекриття електродів досліджуваною речовиною з відносною діелектричною постійною ε_X , рис.1 в) , то функція перетворення наступна :

$$C = \varepsilon_0(\varepsilon S_1 + \varepsilon_X S_2)\cdot\frac{1}{\delta} \quad , \qquad (2)$$

де S_1 , S_2 - площа взаємного перекриття частин електродів в зоні повітря між електродами та зони з досліджуваним середовищем.

Відповідні функціям перетворення графіки (у загальному вигляді) зображено на рис.2 а,б,в).



а) б) в)

Рис.2 а,б,в).

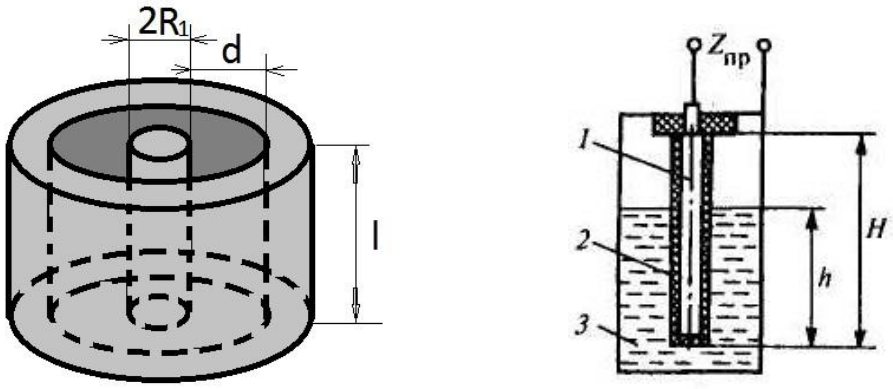
Очевидно, що функція перетворення конденсатора, при зміні відстані між обкладинками, є нелінійною , а у решті випадків - лінійною.

Користуючись виразом (1) нескладно підрахувати, що при величині площі кожної пластини 10 см ^{2} і відстані між пластинами 1 мм величина ємності конденсатора буде всього 8.85 пФ. А якщо відстань між пластинами збільшити до 10 мм , то ємність стане меншою за 1 пФ. Такі малі ємності

сумірні з ємністю проводів та з ємністю між пластинами і близько розташованими частинами деталями. Все це знижуватиме точність вимірювання ємності такого конденсатора, а значить і точність визначення переміщень.

Для коаксіальних ємнісних перетворювачів, рис.3 , величина ємності визначається згідно виразу:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln(1+\frac{d}{R_1})} \qquad (3)$$



а) б)

Рис.3 а,б). а) - схема коаксіального конденсатора : $2R_1$ –діаметр внутрішнього електрода ;

d – відстань між внутрішнім та зовнішнім електродами: l – висота електродів.

б) – схема ємнісного перетворювача для вимірювання рівня рідини – h.

Вхідним сигналом у випадку б) можуть бути рівень рідини або зміна її діелектричної постійної, а вихідним сигналом – зміна ємності перетворювача.

Такий конденсатор може мати достатню ємність при значній його довжині та за суттєво більшої, ніж у повітря, діелектричної проникності.

Найчастіше такий перетворювач використовують у у ємнісних рівнемірах, наприклад, для вимірювання рівню бензину у високих баках.

Зовнішній вигляд деяких приладів із застосуванням ЄП наведено на рис.4 а,б,в).

а) б)

в)

Рис. 2 а,б,в). Прилади з використанням ємнісних перетворювачів.для контролю тиску

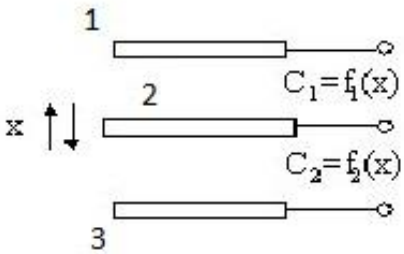
– а,б) та рівня рідини – в).

ЄП застосовують як складову частину ємнісних манометрів, динамометрів, акселерометрів, віброметрів, перетворювачів переміщень, рівнів рідини, вологості,і т.д.

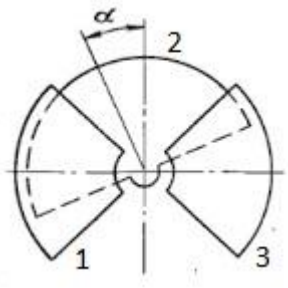
Для одинарних ємнісних перетворювачів з нелінійною функцією перетворення відносна зміна відповідного параметра (ε, δ, S) не повинна перевищувати 10 – 15 %. В такому випадку функцією перетворення вважають практично лінійною.

Для більших величин відносних змін параметрів (до 40%) необхідно використовувати диференційні ємнісні перетворювачі.

Диференційний ємнісний перетворювач, рис. 5 а) , складається із двох нерухомих



а)



б)

Рис.5 а,б) . Схеми диференційних ємнісних перетворювачів для лінійних - а) та кутових

– б) переміщень.

електродів 1, 3 та одного рухомого електрода 2, закріпленого на пружинах. При переміщенні рухомого електрода 2 ємність між однією парою електродів зростає, а між іншою зменшується. При ввімкненні такого перетворювача у вимірювальне коло зростає його чутливість та зменшується нелінійність функції перетворення, також зменшується залежність її від зовнішніх факторів (вологість повітря).

Визначимо чутливість перетворювача у залежності від виду вхідного сигналу (переміщення, зміна площі, зміна діелектричної сталої). Під чутливістю S будемо розуміти відношення відносної зміни ємності до відносної зміни вхідного сигналу. Тобто

$$\bar{S}_\delta = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta \delta / \delta_0}$$ - чутливість ЄП до переміщення; (4)

$$\bar{S}_S = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta S / S_0}$$ - чутливість ЄП до зміни площі перекриття електродів; (5)

$\bar{S}_{\varepsilon} = \dfrac{\Delta C / C_0}{\Delta\varepsilon / \varepsilon_0}$ - чутливість до зміни діелектричної постійної. (6)

Для визначення значень приросту ємності ΔC від δ, S, ε візьмемо повний диференціал від виразу (1)

$$dC = \frac{\partial C}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial C}{\partial S} dS + \frac{\partial C}{\partial \delta} d\delta . \qquad (7)$$

Оскільки $dC \approx \Delta C$, то можливо перейти до кінцевих приростів

$$\Delta C = \frac{S_0}{\varepsilon_0}\Delta\varepsilon + \frac{\varepsilon_0}{\delta_0}\Delta S - \frac{\varepsilon_0 S_0}{(\delta_0 + \Delta\delta)^2}\Delta\delta \qquad (8)$$

Враховуючи, що

$$(\delta_0 + \Delta\delta)^2 = (1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0})^2 \delta_0^2 , \qquad (9)$$

відносна зміна ємності

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} + \frac{\Delta S}{S_0} - \frac{\varepsilon_0 S_0 \Delta\delta \cdot \delta_0}{(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0})^2 \delta_0 \varepsilon_0 S_0} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} + \frac{\Delta S}{S_0} - \frac{1}{(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0})^2}\frac{\Delta\delta}{\delta_0} . \qquad (10)$$

Підставляючи (10) в (4,5,6), отримаємо :

$$\bar{S}_{\delta} = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta\delta / \delta_0} = -\frac{1}{(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta_0})^2} . \qquad (11)$$

Тобто, чутливість ЄП є нелінійною функцією від зміни відстані між електродами .

$$\bar{S}_S = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta S / S_0} = 1 , \qquad (12)$$

$$\bar{S}_{\varepsilon} = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta\varepsilon / \varepsilon_0} = 1 . \qquad (13)$$

В той же час чутливість ЄП являється лінійною функцією від зміни активної площі електродів та діелектричної постійної, вирази (12, 13).

У якості вихідного сигналу ємнісного перетворювача використовують також зміну його реактивного опору X_C :

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \qquad (14)$$

Отримаємо вирази для чутливості перетворювача у разі реактивного опору як вихідного сигналу. Для отримання значень приростів реактивного опору при змінах переміщень електродів , площі їх перекриття та зміни діелектричної постійної візьмемо повний диференціал від виразу (14).

$$dX_C = \frac{\partial X_C}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial X_C}{\partial S} dS + \frac{\partial X_C}{\partial \delta} d\delta \qquad (15)$$

Перейшовши до кінцевих приростів зможемо отримати вирази для відносних чутливостей:

$$S_\delta^* = \frac{\Delta X_C / X_{C_0}}{\Delta \delta / \delta_0} = 1, \qquad (16)$$

$$S_\varepsilon^* = \frac{\Delta X_C / X_{C_0}}{\Delta \varepsilon / \varepsilon_0} = -\frac{1}{\left[1 + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0}\right]^2}, \qquad (17)$$

$$S_S^* = \frac{\Delta X_C / X_{C_0}}{\Delta S / S_0} = -\frac{1}{\left[1 + \frac{\Delta S}{S_0}\right]^2}. \qquad (18)$$

Із виразів (16 – 18) видно, що у даному разі чутливість перетворювача є лінійною до зміни відстані між електродами та нелінійною функцією відносно змін активної площі та діелектричної постійної.

Застосування ємнісних перетворювачів

Ємнісні перетворювачі тиску

Чутливими елементами ЄП тиску є мембрани та діаграми, які перетворюють вимірює мий тиск у переміщення. Одночасно вони є рухомими електродами ЄП, рис. 6.

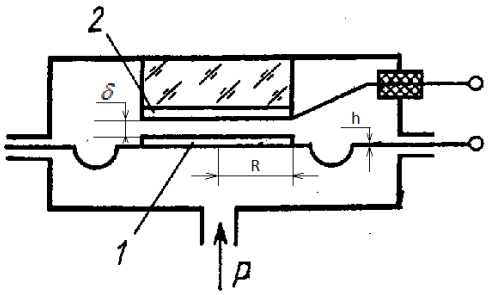


Рис.6 . Схема ємнісного перетворювача тиску.

Вимірюємий тиск P сприймається металевою діафрагмою , яка являється рухомим електродом 1 ЄП. Нерухомий електрод 2 ізолюється від корпусу ЄП кварцевим ізолятором.

Співвідношення між відносною зміною ємності та вимірюємим тиском P має наступний вид :

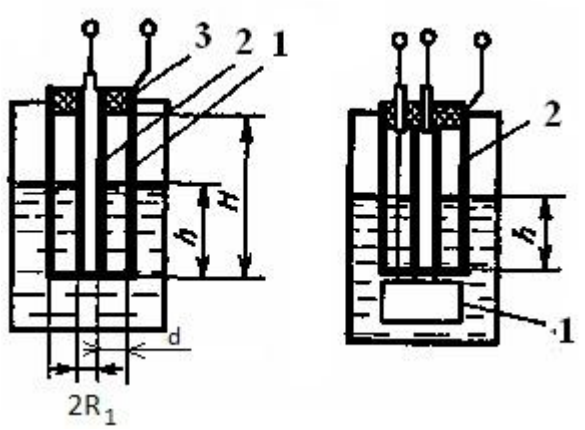
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{1}{16} \cdot \frac{(1-\mu^2)R^4}{E\delta h^3} \cdot P, \qquad (19)$$

R – радіус мембрани ; h – товщина мембрани; μ - коефіцієнт Пуасона; δ відстань між мембранами при відсутності тиску. Із (1) слідує, що відносна зміна ємності ЄП пропорційна вимірюємому тиску і значною мірою залежить від параметрів мембрани.

Такого типу ЄП застосовують для вимірювань тиску до 120 Мпа. Чутливіть ЄП складає 0.5 – 1 пФ/Па при початковіц ємності 10 – 20 пФ. Похибки вимірювань складають 1 – - 2 %.

Ємнісні перетворювачі рівнів

У рівнемірах даного типу використовують залежність електричної ємності перетворювача від рівня рідини або сипучих продуктів (зерно). Конструктивно їх виконують у виді коаксіально розміщених циліндричних або паралельно розміщених плоских електродів, рис.6 а,б).



а) б)

Рис.6 а,б). Рівнеміри без компенсації змін температури рідини – а) та з компенсацією змін температури – б).

Чутливий елемент ЄП складається із двох коаксіально розміщених електродів 1, 2 , які частково занурені у рідину. Електроди створюють циліндричний конденсатор, між електродний простір якого заповнений контрольованою рідиною до висоти h , а простір H-h – сумішшю випарів рідини та повітря. Для фіксування електродів передбачено ізолятор 3.

Для такого ємнісного перетворювача повна ємність $C_П$ визначається виразом:

$$C_П = C_0 + C_1 + C_2 \qquad (20)$$

де C_0 - ємність в зоні ізолятора 3 ; C_1 – ємність міжелектродного простору, заповненого випарами рідини та повітря ; C_2 – ємність міжектродного простору, заповненого рідиною. З врахуванням виразу (3) , що визначає ємність такого перетворювача, отримуємо :

$$C_{П} = \frac{2\pi\varepsilon_{із}\varepsilon_0 l_0}{\ln(1+\frac{d}{R_1})} + \frac{2\pi\varepsilon_1\varepsilon_0(H-h)}{\ln(1+\frac{d}{R_1})} + \frac{2\pi\varepsilon_2\varepsilon_0 h}{\ln(1+\frac{d}{R_1})} = C_0 + \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(1+\frac{d}{R_1})}\left[\varepsilon_1 H - h(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\right] \quad (21)$$

Наведене рівняння являє собою функцію перетворення ємнісного перетворювача для неелектропровідних середовищ. Величини ε_1 , ε_2 являються функціями температури, тому для виключення їх впливу на результат вимірювань застосовують компенсаційний конденсатор 1 , рис.6 б). Такий конденсатор розміщують нижче ємнісного чутливого елемента і повністю занурюють в рідину.

Мінімальний діапазон вимірювань ємнісних рівнемірів складає 0 – 0.4 метри, а максимальний 0 – 20 метрів ; тиск робочого середовища 2.5 – 10 Мпа. Діапазон температур контрольованого середовища -60 - +250℃ .

Ємнісний перетворювач для вимірювання товщини плівки

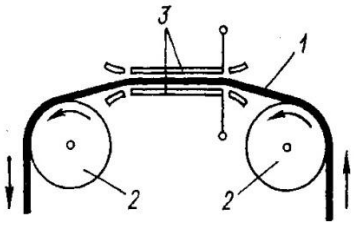


Рис.7.

Для вимірювання товщини x плівки 1 із діелектрика ε_X її протягують між електродами 3, відстань між якими δ . Ємність перетворювача задовольняє виразу:

$$C = \frac{S}{\frac{\delta - x}{\varepsilon_0} + \frac{x}{\varepsilon_X}}. \qquad (22)$$

Електричні вимірювальні кола ємнісних перетворювачів

Ємнісні перетворювачі вмикають в електричні вимірювальні кола, у яких зміна ємності перетворюється у зміну напруги, струму або частоти струму.

Одна із найпростіших схем зображена на рис. 8.

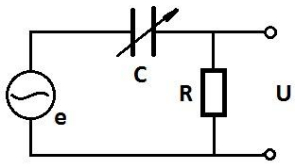


Рис.8. e – джерело живлення; C – ємнісний перетворювач; R – опір навантаження; U – вихідна напруга.

При зміні ємності C перетворювача відповідно змінюється величина струму в електричному колі, а значить і величина падіння напруги на опорі навантаження R. Недолік такої схеми вимірювання полягає у залежності вихідної напруги U від стабільності напруги джерела живлення. При зміні напруги або частоти джерела живлення відбуваються зміни вихідної напруги та частоти на опорі навантаження, що приводить до похибок вимірювання.

На рис.9 показана схема вимірювального кола, побудованого за принципом дільника напруги.

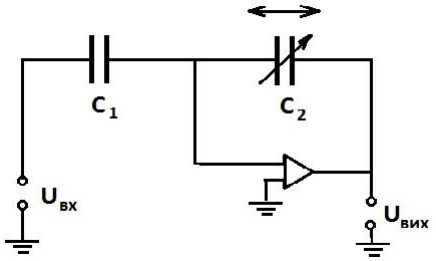


Рис.9

Такі вимірювальні кола застосовують у перетворювачах лінійних переміщень, що викликають зміну проміжку δ між обкладками змінного конденсатора C_2 . У даному разі вихідна напруга є лінійною функцією величини проміжку:

$$U_{ВИХ} = U_{ВХ} C_1 \frac{\delta_2}{\varepsilon_2 S_2} \qquad (23)$$

Оскільки ємності більшості перетворювачів дуже малі (десятки пікофарад) то для забезпечення необхідної потужності вихідного сигналу схему живлять від генератора високої частоти та застосовують високочутливий підсилювач.

Для одинарних ємнісних перетворювачів можливе застосування резонансного електричного кола, рис.10.

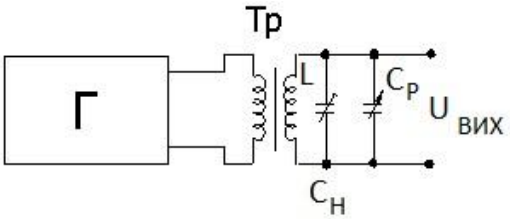


Рис.10. Резонансне вимірювальне коло.

Через роздільний трансформатор Тр генератор Г живить резонансний LC контур. Ємність контура складається із змінної ємності самого перетворювача C_P та ємності допоміжного настроєчного конденсатора C_H.

У разі зміни ємності перетворювача напруга у контурі змінюється по резонансній кривій, рис.11.

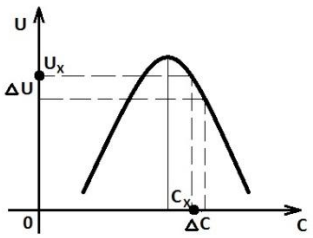


Рис.11 . Резонансна крива.

Так при зміні ємності на деяку величину ΔC напруга у контурі зміниться на ΔU

(вихідний сигнал).

Диференційні ємнісні перетворювачі вмикають звичайно у мостові вимірювальні кола, рис.12 .

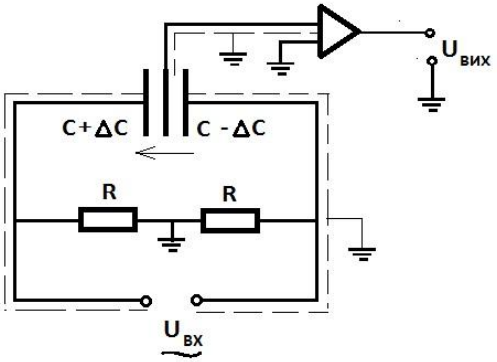


Рис.12.

У даному разі зростає чутливість ємнісного перетворювача, зменшується нелінійність функції перетворення та залежність від зовнішніх факторів (наприклад, зміна вологості повітря).

До недоліків слід віднести необхідність роботи на високій частоті джерела напруги

(біля 400 Гц) та необхідність екранувати провідники від зовнішнього електромагнітного поля. Окрім того зміна температури навколишнього середовища приводить до зміни відстані між електродами, що приводить до температурної похибки.

Переваги застосування ємнісних перетворювачів.

1. Конструкція ЄПП досить проста, має малу масу та розміри;
2. ЄПП можливо виконати з заданою лінійністю або не лінійністю функції перетворення. Для цього достатньо змінити форму електродів;

Мала сила притягання електродів.

Недоліки ЄПП.

Мала ємність перетворювачів;

Результати вимірювань залежать від зміни параметрів кабеля.

Похибки ЄПП.

Зміни навколишньої температури приводять до зміни відстані між електродами , що приводить до температурних похибок;

Оскільки повна ємність ЄПП міняється у присутності по сторонніх металевих предметів, то сам перетворювач,, а також електричні кабелі слід екранувати. Ємність може також змінюватись під впливом зміни вологості повітря , вібрації.

ЛЕКЦІЯ №2

ІНДУКЦІЙНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

План:

1. Принцип роботи індукційних перетворювачів.
2. Перетворювачі лінійної та кутової швидкостей.
3. Застосування індукційних перетворювачів. Тахометри.
4. Похибки індукційних перетворювачів.

Індукційні перетворювачі використовують для перетворення лінійної чи кутової швидкості тіла в електрорушійну силу. В основі їх роботи лежить закон електромагнітної індукції.

Різновидностями індукційних перетворювачів є перетворювачі швидкості лінійних переміщень, вібрацій, частоти обертання , витрат рідини та інше.

Основним елементом такого перетворювача є індукційна котушка , що знаходиться в постійному магнітному полі, рис.1 .

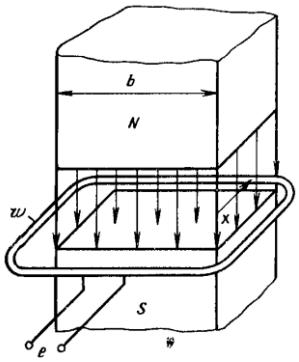


Рис.1 . Одновиткова котушка в постійному магнітному полі.

Переміщення котушки в магнітному полі приводить до зміни магнітного потокозчеплення Ψ її витків.

Індукована в котушці електрорушійна сила

$$\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt} \quad , \qquad (1)$$

Потокозчеплення

$$\Psi = w\Phi = wBQ \quad , \qquad (2)$$

де w- число витків котушки ; Φ - магнітний потік , що проходить через котушку ;

Q - площа через яку проходить цей потік ; B - індукція магнітного поля .

Із виразів (1, 2) слідує, що ЕРС в котушці може створюватись за рахунок зміни в часі любої із величин : числа витків у магнітному полі - w, магнітної індукції - B, поперечного січення Q магнітного потоку, що пронизує витки котушки .

Перетворення лінійної швидкості в ЕРС

Для прикладу візьмемо перетворювач , який являє собою систему із постійного магніту NS , між полюсами якого, перпендикулярно силових ліній , переміщується одновиткова котушка , рис.2.

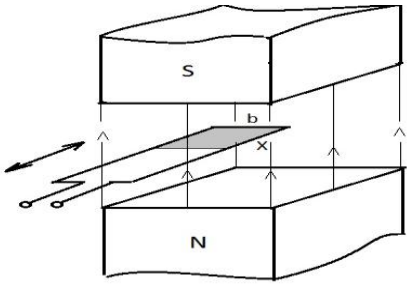


Рис.2.

У даному разі із зміною величини переміщення x змінюється площа котушки Q , що знаходиться в магнітному полі ,

$$Q = bx, \qquad (3)$$

де b – поперечні розміри котушки в магнітному полі. Величина потокозчеплення котушки з магнітним полем

$$\Psi = wBbx. \qquad (4)$$

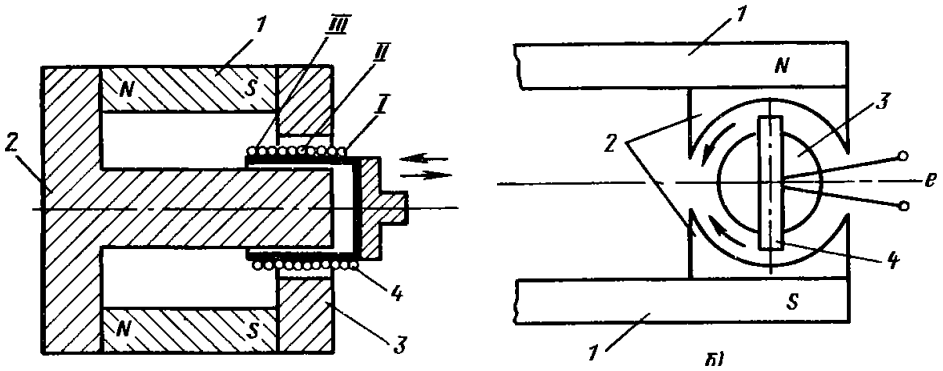
Відповідно, індукована ЕРС

$$\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt} = -wBb\left(\frac{dx}{dt}\right). \qquad (5)$$

Таким чином, знаючи величину ЕРС та деякі параметри перетворювача можна визначити швидкість переміщення котушки - $\frac{dx}{dt}$.

Схеми перетворювачів лінійної та кутової швидкості вібрації в ЕРС

Перетворювач лінійної швидкості вібрації має кільцевий магніт 1 , вставлений в стальне ярмо 2, рис.3 а) .



а) б)

Рис.3 а,б). Індукційні перетворювачі лінійної швидкості вібрацій – а) та кутової швидкості вібрацій – б).

Магнітний потік від постійного магніту 1 проходить по центральному циліндричному сердечнику 2 через повітряний проміжок і кільцевий полюсний наконечник 3 . В циліндричному повітряному проміжку знаходиться намотана на каркас котушка 4 . Під дією вхідного сигналу вона може переміщуватись в повітряному зазорі поздовж осі перетворювача .

Котушку умовно ділять на три частини I –III : I - знаходиться зовні магнітопровода , і магнітний потік в неї не заходить , II – знаходиться в повітряному зазорі , утвореному полюсними наконечниками і циліндричним сердечником . Магнітний потік , що проходить через витки цієї частини котушки , не змінюється в часі , число витків також залишається постійним . В цій частині котушки ЕРС не наводиться . Частина III котушки знаходиться поза повітряним зазором , але всередині магнітної системи . Магнітний потік , що проходить через витки цієї котушки , також постійний , але при вібрації котушки змінюється число витків . Зміна числа витків приводить до зміни потокозчеплення і наводить ЕРС . Витки котушки намотують рівномірно . При цьому ЕРС перетворювача пропорційна швидкості вібрації .

Індуктивні перетворювачі можуть застосовуватись також для вимірювання кутової вібраційної швидкості . Схема такого перетворювача показана на рис.3 б). Він складається із постійного магніту 1 , полюсних наконечників 2 , циліндричного стального сердечника 3 і котушки 4 .

При повороті котушки навколо осі на деякий кут α , площа котушки , через яку проходить магнітне поле змінюється згідно виразу - $Q \cdot \mathrm{Cos}(\alpha)$. Величина індукованої ЕРС

$$\varepsilon = \frac{d\Psi}{dt} = wBQ\frac{d}{dt}(\mathrm{Cos}(\alpha)). \qquad (6)$$

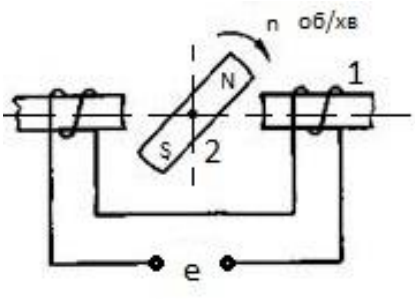
Кут $\propto$ – це кут між лініями індукції та нормаллю до поперечного січення котушки.

Індукційні перетворювачі мають високу чутливість, що дозволяє вимірювати малі переміщення, швидкості, прискорення які міняються з

частотою до 30 кГц. Похибка вимірювання може бути зведена до 0.15 – 0.2 %.

Тахометричні перетворювачі .

Перетворювачі цього типу являють собою електромашинні генератори і призначені для вимірювання частоти обертів роторів, валів, дисків у різних машинах та механізмах . Як приклад розглянемо синхронний перетворювач з обертовим постійним магнітом рис.4.



а)

б)

Рис.4 а,б). Схема індукційного тахометра –а) та його зовнішній вигляд – б).

Він складається із статора 1, на якому розміщена обмотка і ротора 2, з закріпленим постійним магнітом . При обертанні ротора з магнітом, змінюється величина магнітного потоку , що проходить через обмотку статора. Як наслідок, у статорі індукується перемінна ЕРС . Функція перетворення даного тахометра

$$\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(wBQ)}{dt} = -wQ\frac{dB}{dt}, \qquad (7)$$

а, частота ЕРС f_ε пропорційна частоті обертання ротора :

$$f_{\varepsilon} = \frac{nP}{60}, \qquad (8)$$

де n – частота обертання , оберт/хвилину; P - число пар полюсів магніту .

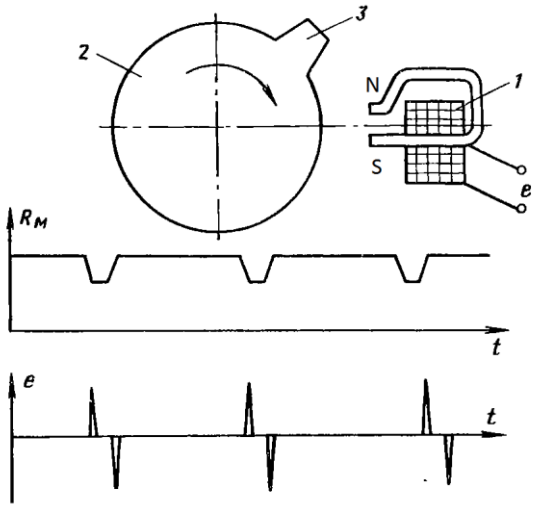
Із виразу (8) легко визначити частоту обертання ротора.

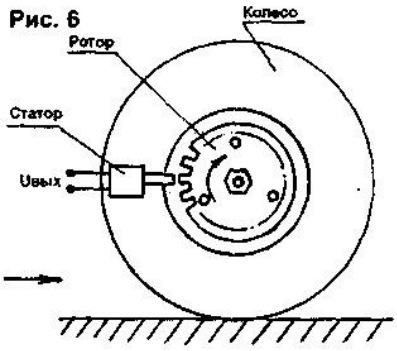
$$n = \frac{60 \cdot f_{\varepsilon}}{P} \qquad (9)$$

Для визначення значення частоти ЕРС використовують частотоміри.

Даного типу перетворювачі застосовують, зокрема, у крильчатих лічильниках для вимірювання об’єму використаної води.

Наступною різновидністю індукційних тахометричних перетворювачів являються імпульсні перетворювачі, рис. 5 а,б). Перетворювач цього типу являє собою котушку 1 з розімкнутим феромагнітним сердечником , встановленим біля вала 2 , частота обертання якого вимірюється . На валу монтується один або декілька феромагнітних зубців 3 .





а) б)

Рис.5 а,б) .

Сердечник котушки 1 попередньо намагнічується . При обертанні вала зуб 3 проходить біля котушки і зменшує магнітний опір сердечника , як показано на верхньому графіку . У відповідності з цим змінюється магнітний потік , що проходить через котушку 1 . В результаті індукується змінна ЕРС . З електричних клем котушки знімається послідовність двополярних імпульсів , частота яких рівна частоті проходження зубців поблизу котушки , тобто пропорційна частоті обертів вала, нижній графік на рисунку .

На рис.5 б) зображено схему використання імпульсного тахометра для визначення відстані , пройденою автомобілем. Перетворювач встановлюється біля колеса автомобіля.

Вторинним перетворювачем імпульсного індукційного перетворювача являється частотомір , проградуйований в одиницях частоти обертання .

Похибки індукційних перетворювачів

ЕРС індукційних перетворювачів пропорційна швидкості переміщення котушки лише при умові , що індукція В постійна на протязі всього шляху її переміщення . Непостійність величини індукції викликає появу похибок .

Похибки індукційних перетворювачів в значній мірі залежать від струму , який споживає вторинний перетворювач (частотомір) . Проходячи по вимірювальній обмотці індукційного перетворювача , цей струм створює магнітне поле , яке згідно правила Ленца направлено назустріч напрямку основного поля і проводить розмагнічуючі дії . Внаслідок цього сумарна індукція зменшується , зменшується також і ЕРС перетворювача . Це явище , що має місце в електричних машинах і , зокрема , в тахометричних перетворювачах називається реакцією якоря . Унаслідок реакції якоря зменшується чутливість тахометричного перетворювача і його функція перетворення стає нелінійною , що приводить до похибок . Для зменшення похибок слід зменшити струм перетворювача . Можливі також конструктивні методи зменшення цієї похибки .

Описаний вид похибки властивий тахометричним перетворювачам , оскільки їх вторинними приладами служать електромеханічні прилади з великим споживанням потужності .

Таким чином, похибки індукційних перетворювачів в значній мірі залежать від

режиму , в якому вони працюють . Найбільша похибка виникає в режимі , при якому через навантаження проходить значний струм .

Лекція. №3

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

а)

б)

в)

г)

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.

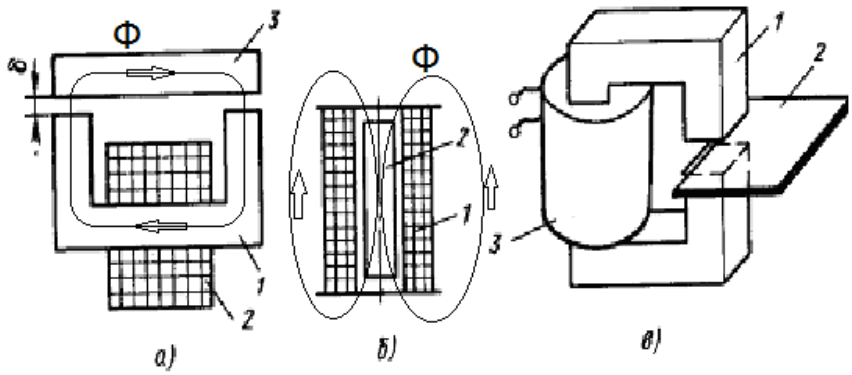


Рис.2 Схематичне зображення перетворювачів із змінною індуктивністю - а,б) та змінним активним опором - в).

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

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

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

При цьому $$F_m = IW , \qquad (2)$$

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

де I - сила електричного струму ; l_1 , l_2 - довжина першої і другої частини магнітного кола ; S - площа перерізу магнітного кола ; $\mu_0 \mu_1$, μ_2 - магнітні сталі , W – число витків котушки.

Індуктивність котушки L – це коефіцієнт пропорційності між електрорушійною силою самоіндукції 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.

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{dI}{dt}. \qquad (4)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Тоді величина індуктивності перетворювача

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

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

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

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

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

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

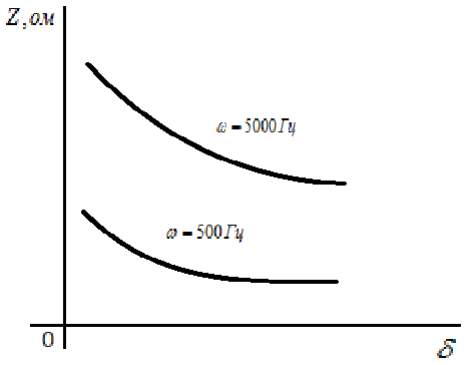


Рис.3 .

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 $\Delta\delta/\delta$. В реальних конструкціях таких перетворювачів при $\Delta\delta/\delta$ = 0.1 …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.

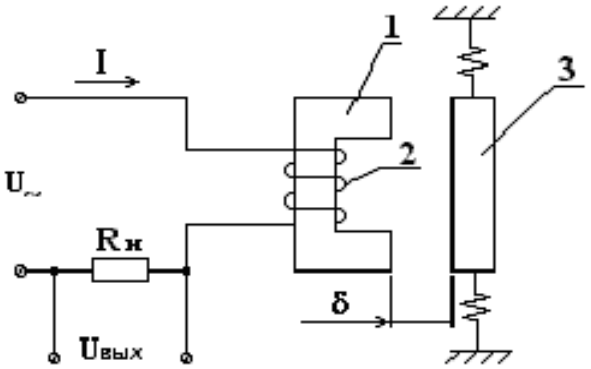


Рис.4 . Електрична схема ввімкнення індуктивного перетворювача у вимірювальне коло.

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

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

де $r_Д$ - 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 $R_Н$. Величина

$$U_{ВИХ} = IR_Н \qquad (13)$$

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

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

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

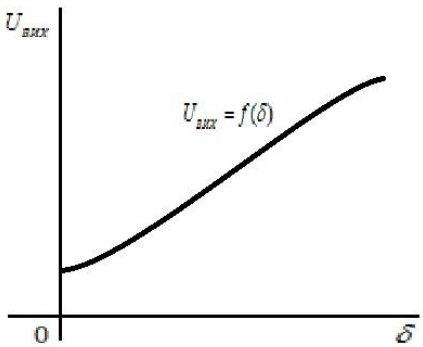


Рис.5 .

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):

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

Величину ΔZ визначимо із виразу (11).

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

Тоді чутливість перетворення

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

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 $U_{ВИХ.}$

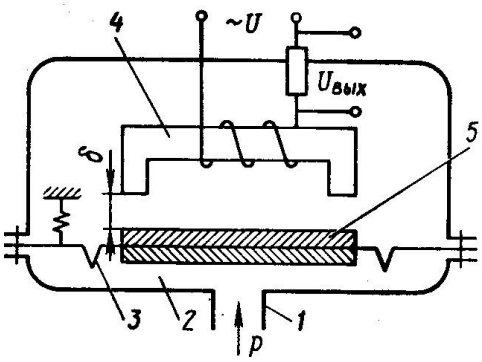
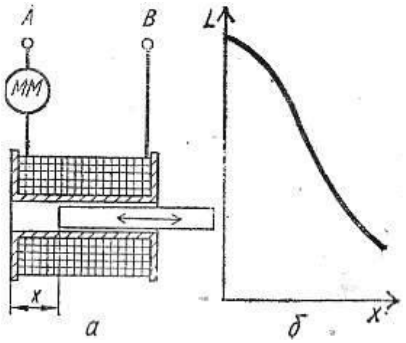


Рис.6 . Схема датчика тиску.

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 нерухомої котушки 1 і рухомого феромагнітного стержня 2. Індуктивність котушки являється функцією занурення плунжера в середину котушки. На рис.7 б) зображено залежність індуктивність L катушки від глибини занурення X плунжера.



в

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 .

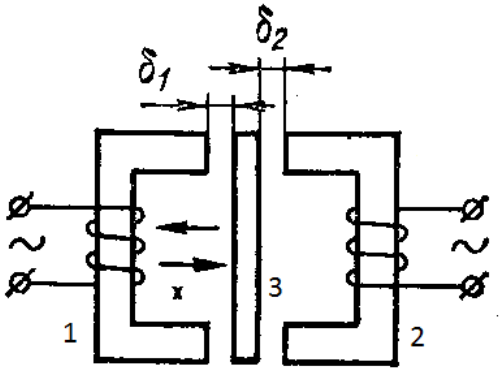


Рис.8. Схема диференційного індуктивного перетворювача.

Вони складаються із двох однакових одинарних перетворювачів 1, 2 , що мають одне спільне рухоме ярмо 3. При переміщенні ярма 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 .

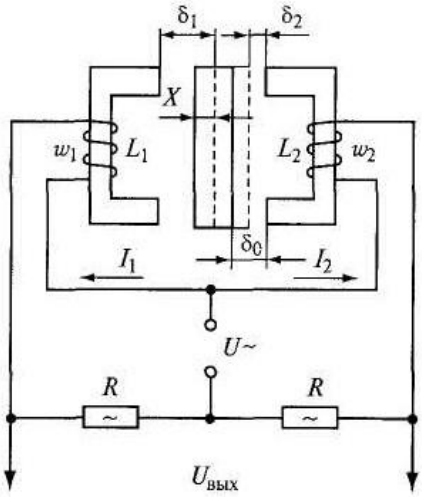


Рис.9 . Схема ввімкнення диференційного індуктивного перетворювача у мостове вимірювальне коло.

При середньому положенні ярма (повітряні проміжки рівні між собою), індуктивні опори Z_1, Z_2 обох одинарних перетворювачів одинакові , тобто

$Z_1 = Z_2 = Z_0$, (Z_0 – початкове значення опорів), а два інші плеча моста – одинакові активні опори – R. Вихідна напруга моста $U_{ВИХ} = 0$.

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 $U_{ВИХ}$ у вимірювальній діагоналі моста змінюється пропорційно до ΔZ / Z і дорівнює :

$$. \quad U_{ВИХ} = \frac{2URZ_0R_H}{(R+Z_0)\left[2Z_0R + R_H(R+Z_0)\right]} \cdot \frac{\Delta Z}{Z_0} \qquad (18)$$

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.

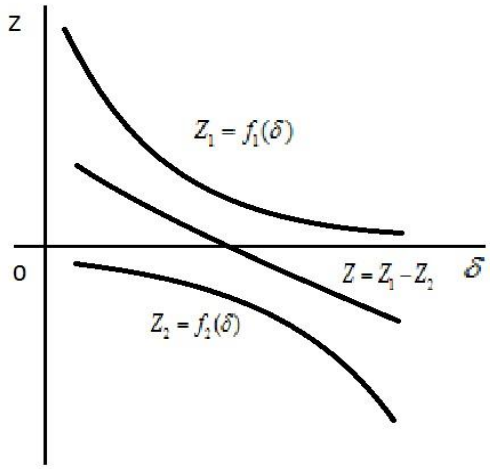


Рис. 10 .

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.

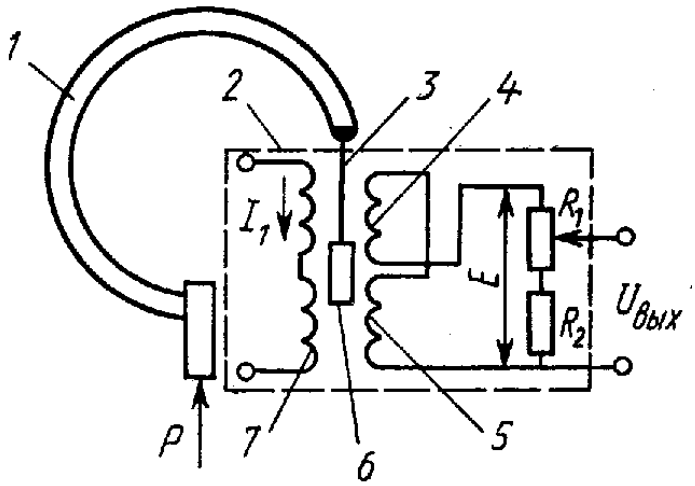


Рис.11 . Схема датчика тиску.

Заключення :

За допомогою індуктивних датчиків можливо:

- проведення контролю механічних переміщень, сили, температури;

- контроль діаметру стального 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.

ЛЕКЦІЯ №4

ВЗАЄМОІНДУКТИВНІ (ТРАНСФОРМАТОРНІ) ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Взаємоіндуктивний перетворювач являє собою трансформатор, у якого під дією вхідного сигналу міняється взаємна індуктивність котушок, що приводить до зміни вторинної вихідної напруги.

1. Одинарний взаємоіндуктивний перетворювач

Перетворювач складається із П – подібного магнітопроводу, рухомого ярма та двох котушок w_1 , w_2 , рис. 1.

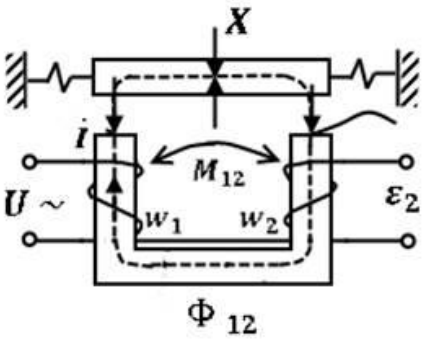


Рис.1 .Схема взаємоіндуктивного перетворювача.

При проходженні змінного струму I по виткам першої котушки w_1 виникає магнітний потік Φ_{12}, який по магнітопроводу пронизує витки котушки w_2 . В результаті , у другій котушці, виникає ЕРС взаємоіндукції ε_2 величина якої пропорційна частоті струму ω , величині струму I та коефіцієнту взаємоіндукції M . Величина

$$\varepsilon_2 = \omega I M_{12} \qquad (1)$$

M_{12} (коефіцієнт взаємоіндукції) – це коефіцієнт пропорційності між струмом I у першій котушці і магнітним потокозчепленням $\Psi = w_2 \Phi_{12}$ у другій котушці , тобто

$$IM_{12} = w_2 \Phi_{12} \qquad (2)$$

Визначимо функцію перетворення пристрою, тобто залежність величини ЕРС ε_2 у другій котушці від величини переміщення $\Delta\delta$ ярма.

Для цього скористаємось формулою (1) . Вираз для М можна записати таким чином:

$$M = \frac{w_2 \Phi}{I} = \frac{w_2}{I}\frac{F}{R_m} = \frac{w_2}{I}\frac{w_1 I}{R_m} = \frac{w_1 w_2}{R_m} \quad . \qquad (3)$$

Визначимо вираз для магнітного опору R_m.

$$R_m = \frac{l_1}{\mu_0 \mu_{ст} S} + \frac{2(\delta_0 \pm \Delta\delta)}{\mu_0 \mu_{пов} S} = \frac{1}{\mu_0 S}\left[\frac{l_1}{\mu_{ст}} + \frac{2(\delta_0 \pm \Delta\delta)}{\mu_{пов}}\right] \square \frac{2(\delta_0 \pm \Delta\delta)}{\mu_0 S} \quad , \qquad (4)$$

де S - площа поперечного січення магнітопроводу; l_1 - довжина центральної магнітної силової лінії металевої частини магнітопроводу; δ_0 - повітряний проміжок; $\Delta\delta$ - зміна проміжку під впливом вхідного сигналу; μ_0 - абсолютна магнітна стала вакууму; $\mu_{ст}$ - відносна магнітна стала для сталі; $\mu_{пов}$ - відносна магнітна стала для повітря.

Підкладаючи (4) у вираз (3), отримуємо, що

$$M = \frac{w_1 w_2 \mu_0 S}{2(\delta_0 \pm \Delta\delta)} \quad . \qquad (5)$$

Із врахуванням (5) вираз (1) для ЕРС індукції у другій котушці буде таким :

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega I w_1 w_2 \mu_0 S}{2(\delta_0 \pm \Delta\delta)} \quad . \qquad (6)$$

Із виразу (6) слідує, що величина наведеної ЕРС індукції ε_2 є нелінійною функцією повітряного проміжку $2(\delta_0 \pm \Delta\delta)$ між осердям та ярмом

перетворювача. Окрім цього, завжди існує певне значення ЕРС, навіть при відсутності переміщення $\Delta\delta$ ярма.

2 Диференційний взаємоіндуктивний перетворювач

Для того, щоби мати нульовий вихідний сигнал, при відсутності вхідного, а також збільшити чутливість та покращити лінійність функції перетворення використовують взаємоіндуктивні диференційні перетворювачі , рис. 2.

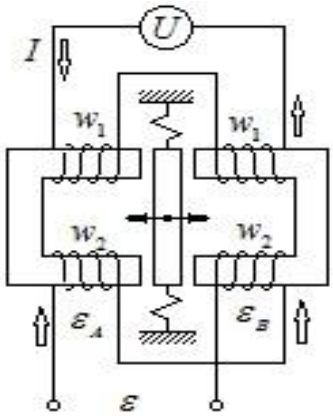


Рис.2. Схема диференційного взаємоіндуктивного перетворювача.

Робота перетворювача полягає у наступному. Джерело змінного струму створює за допомогою двох послідовно ввімкнених однакових котушок w_1 відповідні магнітні потоки. Дані потоки створюють у двох однакових котушках w_2 ЕРС індукції ε_A та ε_B. Оскільки витки обох котушок намотані назустріч одні до одних, то результуюча ЕРС, при середньому положенні ярма,

$$\varepsilon = \varepsilon_A - \varepsilon_B = 0 \qquad (7)$$

У разі зміщення ярма від середнього положення на деяку величину $\Delta\delta$, величина сумарної вихідної ЕРС :

$$\varepsilon = \varepsilon_A - \varepsilon_B == \frac{\omega I w_1 w_2 \mu_0 S}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} - \frac{\omega I w_1 w_2 \mu_0 S}{2(\delta_0 + \Delta\delta)} = ... = \omega I w_1 w_2 \mu_0 S \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \qquad (8)$$

Із виразу (8) слідує, що величина вихідного сигналу , ЕРС , являється відтепер лінійною по відношенню до вхідного сигналу, переміщення ярма $\Delta\delta$.

Для перетворень великих лінійних переміщень (1 метр і більше) застосовують взаємоіндуктивні перетворювачі з розподіленими магнітними параметрами, рис.3 .

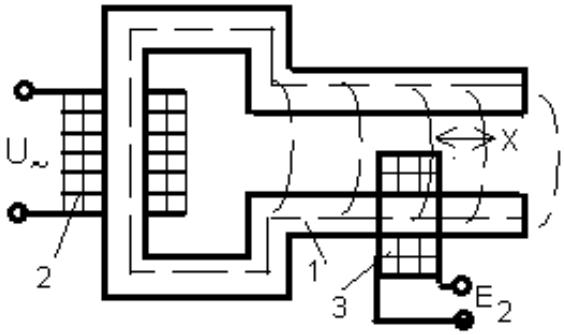


Рис.3 .Схема взаємоіндуктивного перетворювача з розподіленими магнітними параметрами.

Він складається із магнітопровода 1 з робочою частиною у виді двох взаємопаралельних металевих полос, намагнічуючої котушки 2 та рухомої вимірювальної котушки 3. Під впливом вхідного сигналу X котушка 3 переміщується поздовж полос магнітопровода 1 . У разі переміщення зліва направо, ЕРС E_2 котушки 3 зменшується практично по лінійному закону. Для цього магнітний опір магнітопроводу має бути малим порівняно з магнітним опором повітряного проміжку. Деяка не лінійність функції

перетворення може бути зкомпенсована шляхом зміни профілю магнітопроводу.

3. Електричні вимірювальні кола

Вторинна напруга може бути визначена любим вольтметром змінного струму з відповідною межею вимірювань, рис.4 .

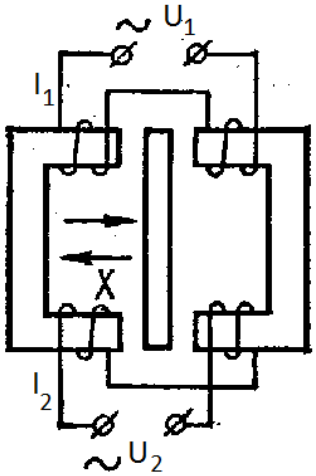


Рис. 4 .

Дана схема достатньо проста, проте застосовується рідко, оскільки вихідна напруга U_2 залежить від напруги U_1 джерела. Зі зміною температури навколишнього середовища частоти живлючої напруги вихідний опір може змінюватись, що приводить до похибок вимірювань.

Найпоширенішим вимірювальним колом диференційних взємоіндуктивних перетворювачів є кола, що містять відповідні вторинні трансформаторні компенсуючі перетворювачі, рис.5 .

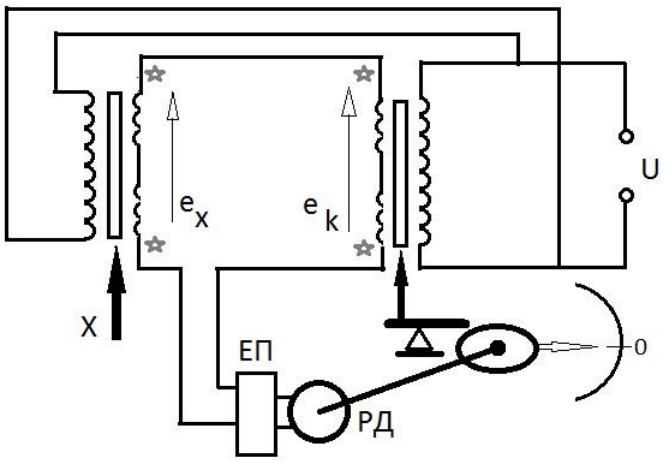


Рис.5 .

Під впливом вимірюваного переміщення X рухомий елемент первинного диференційного взаємоіндуктивного перетворювача переміщується, змінюючи значення вихідної ЕРС e_X . Друга частина кола має аналогічний компенсувальний диференційний взаємоіндуктивний перетворювач, положення рухомого елемента якого регулюються ексцентриком, з'єднаного з ротором реверсивного двигуна РД . Якщо вимірювана ЕРС e_x та компенсувальна ЕРС e_k не рівні між собою , тобто існує розбаланс, то, підсилена за допомогою електронного підсилювача ЕП напруга подається на реверсивний двигун, ротор якого буде обертатись, доки не вирівняються між собою e_X та e_k . Після врівноваження електрорушійних сил за допомогою шкали приладу встановлюють значення вимірюваної величин

Лекція №5

Магнітопружні вимірювальні перетворювачі

План:

1. Магнітопружний ефект.
2. Індуктивні магнітопружні перетворювачі.
3. Трансформаторні магнітопружні перетворювачі.
4. **Анізотропні магнітопружні перетворювачі.**

Принцип роботи магнітопружного перетворювача базується на магнітопружному ефекті, відкритого італійцем Еміліо Віларі у 1865 році.

Магнітопружним ефектом називають зміну індукції або магнітної проникності у феромагнітних тілах при дії на них зовнішньої сили.

Феромагнетиками називають речовини, у яких внутрішнє (власне магнітне поле може в сотні і тисячі разів перевищувати зовнішнє магнітне поле, яке його утворило. До цих речовин належать залізо, кобальт, нікель, пермалой та інші.

Причини виникнення такого ефекту у наступному. Феромагнітні речовини мають зони намагнічення, домени, що довільним чином орієнтуються у матеріалі. Магнітні моменти окремих доменів взаємно компенсуються із-за чого напруженість загального магнітного поля рівна нулю, рис.1.

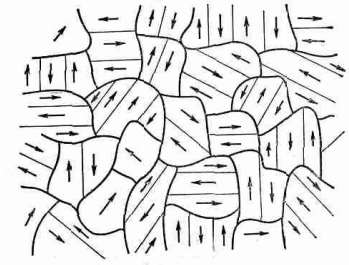


Рис.1. Взаємна орієнтація магнітних доменів.

При розміщенні феромагнетика у зовнішнє магнітне поле домени орієнтуються поздовж його силових ліній. В слабкому полі орієнтація доменів часткова, а в сильному, при магнітному насиченні матеріалу, орієнтуються всі домени, що приводить до збільшення магнітної індукції.

Якщо на таке намагнічене феромагнітне тіло діяти зовнішньою механічною силою, то тіло деформується, змінюється взаємна орієнтація доменів, і як наслідок, міняється величина магнітної індукції тіла. Явище має пружний характер, тобто, при знятті механічної сили індукція приймає початкове значення.

При заданій напруженості магнітного поля H зміна індукції B еквівалентна зміні магнітної проникності феромагнетика, оскільки

$$B = \mu_0 \mu_B H \qquad (1)$$

μ_0, μ_B - магнітна постійна вакууму та відносна магнітна постійна матеріалу, відповідно.

Для прикладу наведені гістерезисні криві нікелю для різних механічних напружень розтягу , рис.2.

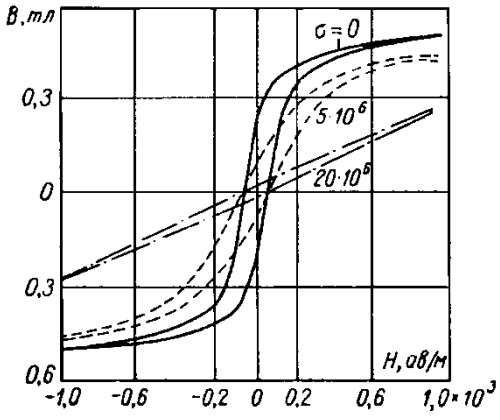


Рис.2. Гістерезисні криві нікелю.

Із графіків видно, що при збільшенні механічного напруження нахил петлі гістерезису зростає. Тобто , при однаковій величині напруженості зовнішнього

поля H збільшення механічного навантаження приводить до зменшення магнітної індукції B , а відповідно і магнітної проникності феромагнетика.

Слід зауважити, що для пермалою (сплав заліза, нікелю та молібдену) магнітна проникність, навпаки, сильно зростає.

Основною характеристикою матеріалу з точки зору його магнітопружних властивостей є коефіцієнт магнітопружної чутливості k_μ, який визначається як відношення відносної зміни магнітної проникності $\Delta\mu / \mu$ до відносної зміни деформації $\Delta l / l$.

$$k_\mu = \frac{(\mu_П - \mu_\sigma) / \mu_П}{\Delta l / l}, \qquad (2)$$

де $\mu_П$ - магнітна проникність до навантаження ; μ_σ - магнітна проникність при навантаженні.

Індуктивні магнітопружні перетворювачі

Магнітопружні перетворювачі бувають індуктивними або взаємоіндуктивними (трансформаторними).

На рис.3 а,б) зображено варіанти схеми індуктивного перетворювача з одною обмоткою на робочих стержнях магнітопровода. Зовнішній вигляд перетворювача зображено на
рис.3 в).

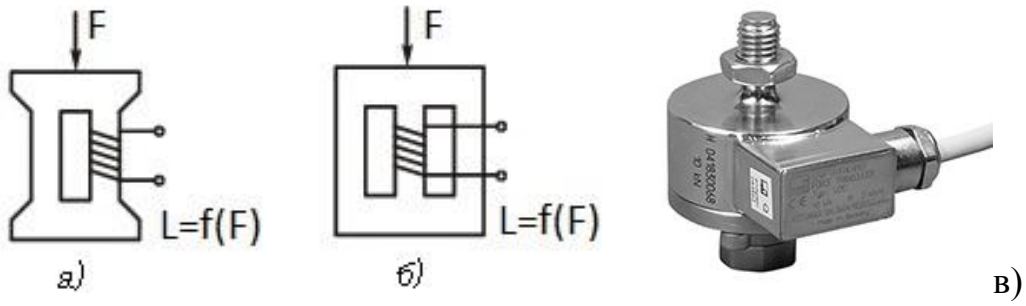


Рис.3 а,б,в).

У даному разі послідовність перетворень вхідного сигналу (сили F) наступна:

$$F \to \sigma = \frac{F}{S} \to \mu \to R_M \to \Delta L \to \Delta Z \quad , \qquad (3)$$

тобто сила F перетворюється у напруження в магнітопроводі, яке послідовно приводить до зміни його магнітної проникності, магнітного опору , індуктивності котушки та індуктивного опору.

Визначимо аналітичну залежність зміни індуктивності ΔL від величини прикладеної сили F.

Індуктивність котушки

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{w\Phi}{I} = \frac{w}{I} \cdot \frac{F_M}{R_M} = \frac{wwI}{IR_M} = \frac{w^2}{R_M}, \qquad (4)$$

де Ψ - магнітне потокозчеплення витків котушки ; w - кількість витків котушки; - струм; Φ -магнітний потік ; R_M - магнітний опір магнітопроводу; F_M - магніторушійна сила.

Враховуючи, що магнітний опір $R_M = \frac{l}{\mu S}$, де l - шлях силової магнітної лінії по центру магнітопроводу, μ - магнітна проникність матеріалу магнітопроводу, S – площа
перерізу магнітопроводу, отримуємо
:

$$L = \frac{w^2 \mu S}{l} \qquad (5)$$

Визначимо зміну індуктивності ΔL, викликаною дією на магнітне коло розтягуючи ми або стискуючими зусиллями.

$$\Delta L \approx dL = \frac{\partial L}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial L}{\partial S} dS + \frac{\partial L}{\partial l} dl =$$
$$= \frac{w^2 S}{l} d\mu + \frac{w^2 \mu}{l} dS - \frac{w^2 \mu S}{l^2} dl =$$
$$= L\frac{d\mu}{\mu} + L\frac{dS}{S} - L\frac{dl}{l} = L(\frac{d\mu}{\mu} + \frac{dS}{S} - \frac{dl}{l})$$

. (6)

Скористаємось визначеннями коефіцієнтів магнітопружної чутливості k_μ та Пуасона $k_П$.

$$k_\mu = \frac{\Delta\mu / \mu}{\Delta l / l} \quad (7) \quad . \quad k_П = -\frac{\Delta S / S}{\Delta l / l} \quad .(8)$$

Розділивши (6) зліва та справа на $\frac{\Delta l}{l}$ та підставляючи вирази (7,8) у (6) отримуємо :

$$\Delta L = L\frac{\Delta l}{l}(k_\mu - k_П - 1) \quad (9)$$

Щоби отримати більш повну функцію перетворення ($\Delta L = f(F)$), необхідно розрахувати згідно законів і правил механіки механічні напруження σ магнітопроводу та їх залежність від вимірюємої сили F. Якщо ж механічні напруження σ матеріалу під дією сили F можна вирахувати як для суцільного циліндра , то:

$$\sigma = E\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{S} \quad , \quad (10)$$

де E – модуль Юнга матеріалу.

Тоді, з врахуванням (10), отримуємо остаточний вираз функції перетворення індуктивного магнітопружного перетворювача.

$$\Delta Z = \omega \Delta L = \omega L \frac{F}{SE}(k_{\mu} - k_{П} - 1) \qquad (11)$$

Як правило магнітопружні перетворювачі виготовляють диференціальними і вмикають у мостові вимірювальні кола, рис.4.

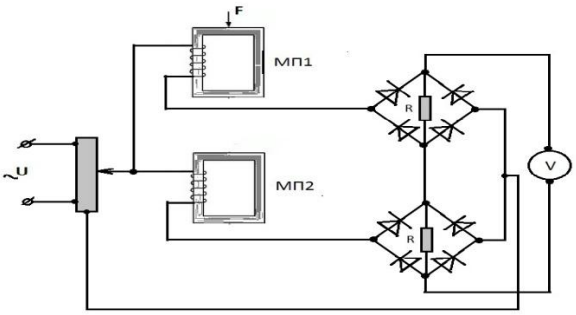
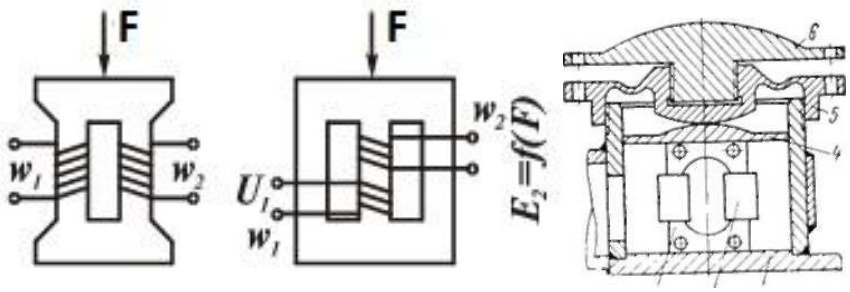


Рис.5. Схема ввімкнення магнітопружного перетворювача у вимірювальне мостове коло.

Магнітопружний елемент МП1 являється робочим перетворювачем зусилля F , а ідентичний йому елемент МП2 , що не піддається дії будь яких зусиль, служить для компенсації початкової індуктивності, а також для компенсації зовнішніх факторів, зокрема температури, частоти джерела живлення.

Трансформаторні магнітопружні перетворювачі

Магнітопружні перетворювачі можуть мати дві обмотки. Такі перетворювачі називають трансформаторними, рис.6 а,б).



а) б) в)

Рис.6 а-в) . Трансформаторні магнітопружні перетворювачі.

При дії сили F змінюється магнітна проникність магнітопроводу μ, що приводить до зміни коефіцієнта взаємної індуктивності M обох котушок. Послідовність перетворень вхідного сигналу наступна:

$$F \to \sigma \to \mu \to R_M \to M \to \varepsilon \qquad (12)$$

Отримаємо функцію перетворення для даного типу перетворювача. Змінний струм I_1 першої котушки створює перемінне магнітне поле Φ_M, що перетинає витки другої котушки. Індуковану ЕРС у другій котушці визначають згідно виразу:

$$\varepsilon = \omega I_1 M_{12} \qquad (13)$$

Оскільки коефіцієнт взаємоіндукції котушок

$$M_{12} = \frac{\Psi}{I_1} = \frac{w_2 \Phi_{12}}{I_1} = \frac{w_2}{I_1} \cdot \frac{F_M}{R_M} = \frac{w_2}{I_1} \cdot \frac{w_1 I_1}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{w_1 w_2 \mu S}{l} \quad , \qquad (14)$$

то, з врахуванням формул (13, 14) отримуємо:

$$\varepsilon = \omega w_1 w_2 I_1 \mu S \frac{1}{l} \quad . \qquad (15)$$

Дана електрорушійна сила утворюється у відсутності вимірюємої сили (F=0).

Обрахуємо приріст електрорушійної сили за наявності сили. Для цього визначимо диференціал функції.

$$\Delta\varepsilon \approx d\varepsilon = \frac{\partial\varepsilon}{\partial\mu} d\mu + \frac{\partial\varepsilon}{\partial S} dS + \frac{\partial\varepsilon}{\partial l} dl = \varepsilon\left(\frac{d\mu}{\mu} + \frac{\Delta S}{S} - \frac{dl}{l}\right) \qquad (16)$$

Відносна зміна вихідного сигналу

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{d\mu}{\mu} + \frac{\Delta S}{S} - \frac{dl}{l} \qquad (17)$$

Розділимо вираз (17) зліва і справа на величину $\frac{\Delta l}{l}$. Враховуючи вирази для коефіцієнта магнітопужної чутливості та коефіцієнта Пуасона отримуємо :

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon \frac{\Delta l}{l}(k_\mu - k_П - 1) \qquad (18)$$

У даному виразі невідомо яким чином відносна деформація $\frac{\Delta l}{l}$ залежить від прикладеної сили F. Якщо допустити, що ця залежність така сама як і для суцільного циліндра, тобто

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{SE} \quad , \qquad (19)$$

то кінцевий варіант функції перетворення матиме наступний вид:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon \frac{F}{SE}(k_\mu - k_П - 1) \qquad (20)$$

.

Магнітоанізотропний перетворювач

Такий перетворювач являє собою пакет пластин із трансформаторної сталі, по діагоналі якого симетрично розміщено чотири отвори. Зовнішній вигляд перетворювача зображено на рис. 7.

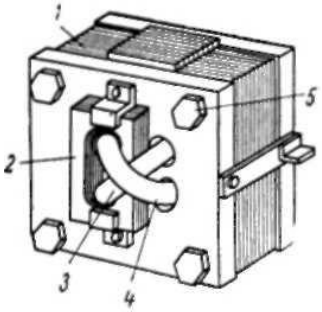


Рис. 7. Зовнішній вигляд магнітоанізотропного перетворювача.

Через відповідні пари отворів проходять дві обмотки 3 і 4 під кутом 90° одна до одної та утворюючи кут в 45° до напрямку перетворюємої сили F. Принцип роботи у наступному.

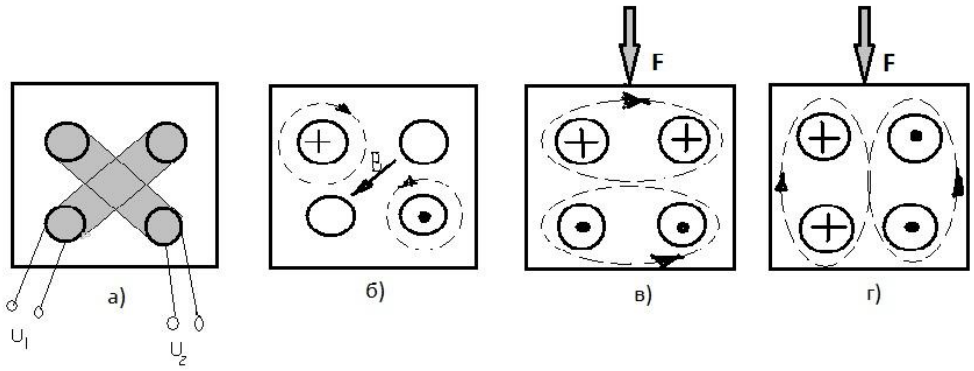


Рис.8. До пояснення роботи перетворювача. а) – розміщення витків намагнічуючої та вимірювальної обмоток; б) – при відсутності сили F лінії магнітного поля не зчеплені з вимірювальною обмоткою; в,г) – при наявності сили магнітні лінії перетинають вимірювальну обмотку, індукується ерс.

При відсутності вимірюємої сили лінії магнітного потоку намагнічуючої обмотки 4 завдяки ізотропним властивостям феромагнетика (магнітна проникність однакова по всім напрямкам) розміщуються симетрично і не зчіплюються з вимірювальною обмоткою 3. Як наслідок величина електрорушійної сили у даній обмотці рівна нулю.

Після прикладення певного зусилля F магнітна проникність матеріалу стає різною. Магнітні лінії витягуються у напрямку більшої магнітної проникності

і стискаються у напрямку меншої проникності. В результаті магнітні лінії зчіплюються з вимірювальною обмоткою, що створює в ній електрорушійну силу.

Природа похибок вимірювань магнітопружним перетворювачем.

- Одна із головних похибок обумовлена магнітопружним гістерезисом матеріалу і складає 1-3 %.
- Коливання величини намагнічуючого струму створює похибку 0.3 – 0.4%.
- Зміна повітряного зазору між пластинами магнітопроводу.
- Старіння матеріалу магнітопроводу приводить до змін його магнітної проникності.

Сумарна похибка перетворювача складає 3 – 4 %. Не дивлячись на порівняно низьку точність магнітопружні перетворювачі широко застосовують для перетворення великих сил – 100 - 1000 кН і тисків в складних умовах експлуатації. Зокрема, їх використовують для вимірювання крутних моментів в бурових установках.

ЛЕКЦІЯ №6

ОПТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПЕРЕМІЩЕНЬ

План:

1. Метод растра.
2. Метод муара.
3. Інтерференційний метод.

Перетворювачі переміщень застосовують при вимірюваннях сили, моменту сил або тиску. Їх розділяють на перетворювачі малих переміщень (2-3 мм для лінійних та 2° - 3° для кутових переміщень) та перетворювачі великих переміщень (до кількох метрів для лінійних і 25 – 40 обертів для кутових переміщень).

В попередніх лекціях для вимірювання переміщень були розглянуті реостатні, тензочутливі, індуктивні та ємнісні перетворювачі. Високу точність вимірювань переміщення досягають також безконтактні оптоелектричні методи, основані на використанні методів растру та муара.

В методі растра використовують дві плоскі прозорі скляні пластини з нанесеними паралельними непрозорими штрихами, рис.1 а,б). Відстань «а» «b» між штрихами на кожній пластині постійна, але для двох пластин дещо відрізняється. Величина відстані лежить в межах десятих долей міліметра.

При накладанні пластин одна на одну та їх просвічуванні спостерігаються зони згущення та розрідження штрихів , як на рис.2.

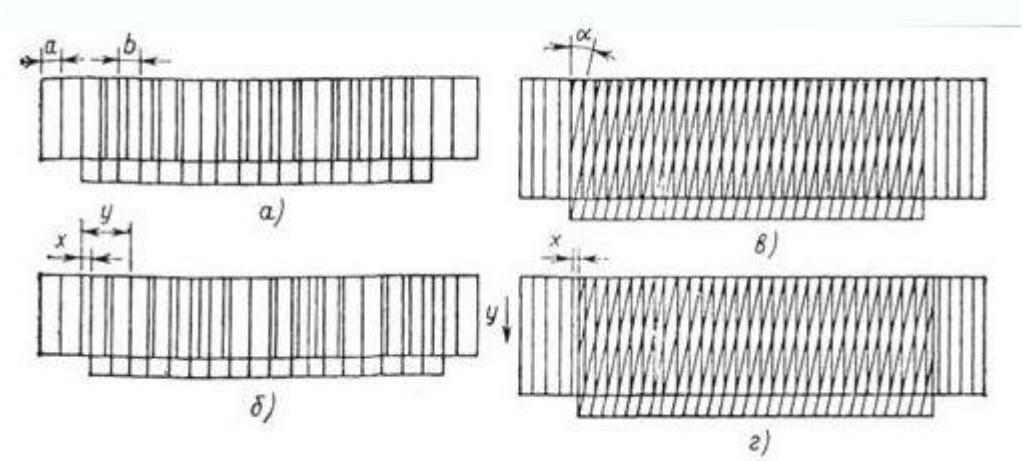


Рис.1 . Растровий – а,б) та муаровий – в,г) перетворювачі переміщень .

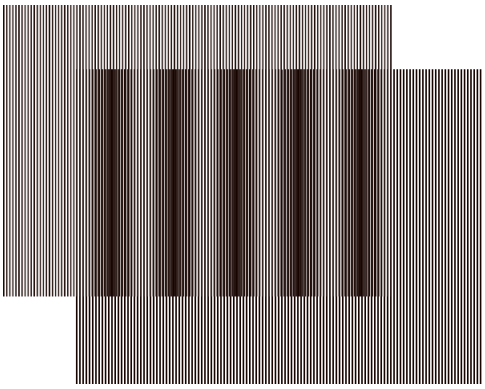


Рис.2. Зони згущення штрихів (темні полоси) в методі растра.

Переміщення «х» одного растра відносно іншого в напрямку, перпендикулярному штрихам, викликає переміщення «у» зон згущення штрихів в тому же напрямку, проте значення цього переміщення виявляється набагато більше, ніж значення вимірюємого, тобто відбувається оптична редукція . Зв'язок між «у» та «х» обраховують по формулі:

$$y = \frac{x}{(1 - b/a)} \quad . \qquad (1)$$

Рівняння 1 являється функцією перетворення даного перетворювача.

Визначимо чутливість перетворення $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$. (2)

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x}\Delta x = \frac{1}{1 - b/a}\Delta x, \qquad (3)$$

$$S = \frac{1}{1 - b/a} \qquad (4)$$

На рис.3 наведено графік залежності чутливості S від співвідношення періодів обох растрів b/a.

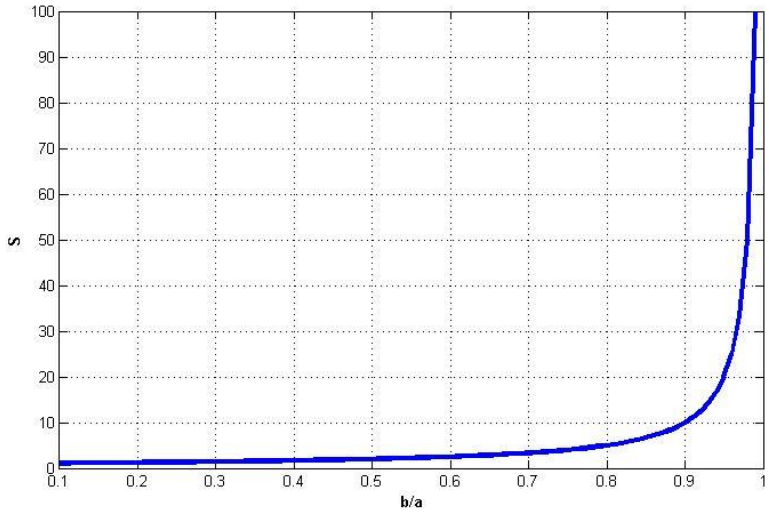


Рис.3. Графік чутливості S функції перетворення залежно від відношення d/a періодів штрихів.

Із графіка слідує, що чим менша відмінність між періодами штрихів обох растрів тим більша чутливість перетворення S. На практиці величина чутливості обмежується точністю визначення періоду картини муара, оскільки його величина безмежно зростає.

Приклад:

Якщо зміщення одного з растрів x = 0.01мм, то при співвідношенні періодів штрихів растрів b = 0.999a отримуємо величину переміщення зони згущення штрихів y = 10 мм.

В методі муара растри на обох пластинах мають одинаків період штрихів, але розміщені під невеликим кутом α один до одного, рис.1 в,г) . При взаємному накладанні растрів та їх просвічування спостерігаються світлі та темні полоси, що йдуть поперек штрихів , які називають комбінаційними або муаровими полосами, рис.4.

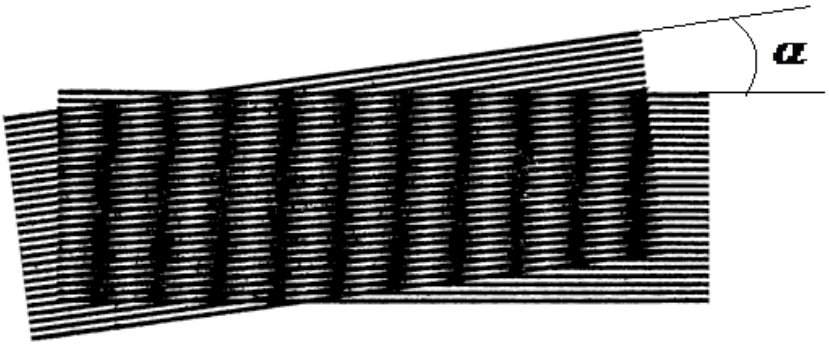


Рис.4 . Зони згущення штрихів в методі муара.

Переміщення «x» одного із растрів викликає значно більше переміщення «y» муарових полос в напрямку, перпендикулярному напрямку руху растра, тобто також відбувається оптична редукція. Значення цих переміщень пов’язані співвідношенням :

$$y = \frac{x}{\sin\alpha} \quad . \qquad (2)$$

Наявність оптичної редукції в методах растра та муара дозволяє досягнути високої чутливості до вимірюємого переміщення. Графік чутливості функції перетворення (2) від кута розвороту обох растрів приведена на рис.5.

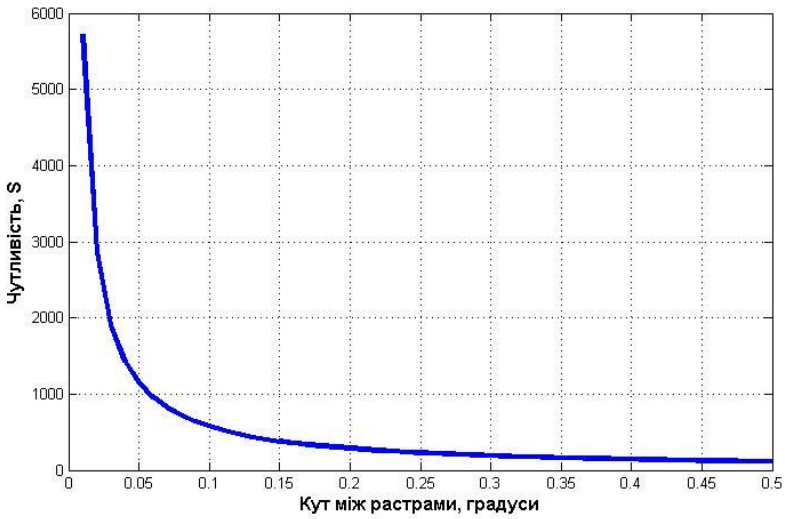


Рис.5. Залежність чутливості перетворення від кута між обома растрами.

Із наведеного графіка слідує, що при зростанні кута між растрами чутливість нелінійно зменшується.

При вимірюванні переміщень від долей мікрона до метра використовують лазерні інтерферометри. У цих приладах відбувається складання двох світлових потоків, один з яких проходить постійних шлях, а другий – шлях, що залежить від вимірюваної відстані.

На рис.6 зображена принципова схема лазерного інтерферометра, зібраного по класичній схемі інтерферометра Майкельсона. Лазер випромінює світловий потік Ф, який пластиною 2 ділиться на два потоки – $Ф_1$, $Ф_2$. Потік $Ф_1$ відбиваючись від пластини 2, а згодом від дзеркала 3 попадає на фотоелемент 1 . Потік $Ф_2$, що пройшов через пластину 2, падає перпендикулярно на дзеркальну поверхню тіла 4, переміщення якого «х» вимірюється.

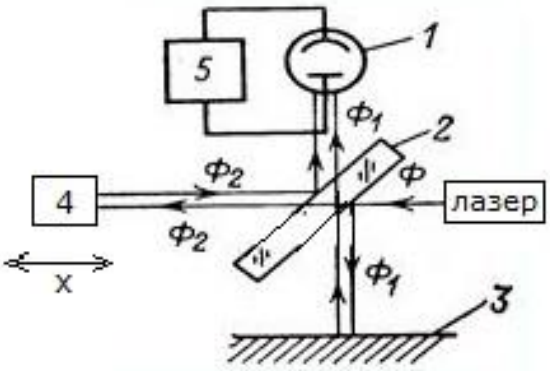
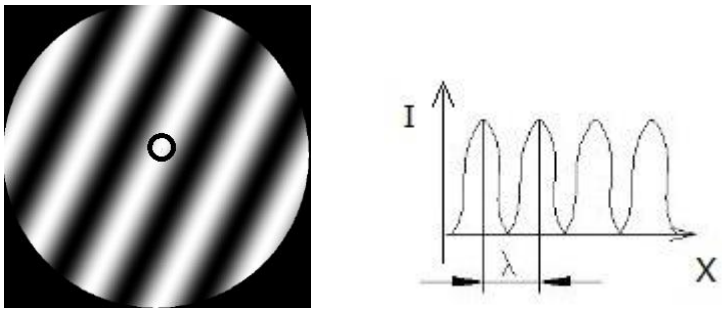


Рис.6. Схема лазерного інтерферометра.

В площині фотоелемента 1 потоки $Ф_1$, $Ф_2$ складуються в результаті чого утворюється інтерференційна картина, вигляд якої зображено на рис.7 а).



а) б)

Рис.7. Інтерференційна картина в площині фотоелемента –а) та зміна фотоструму I залежно від переміщення x – б).

У разі переміщення тіла 4 система інтерференційних полос буде переміщуватись перпендикулярно площині в якій ідуть обидва потоки $Ф_1$, $Ф_2$. Якщо ж перед фотоелементом 1 встановити непрозору діафрагму з невеликим отвором (показано у вигляді кружка на рис.7) то величина фотоструму «I» буде періодично змінюватись залежно від переміщення «x» рис.7 б). Число підрахованих за допомогою лічильника 5 періодів фотоструму «k» пов’язано з величиною переміщення «x» тіла 4 наступним співвідношенням:

$$x = k\lambda / 2 \qquad (3)$$

де λ - довжина хвилі лазера.

При вимірюваннях переміщень до 1метра похибка вимірювань складає 0.1 – 1 мкм.