

Лекція

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.

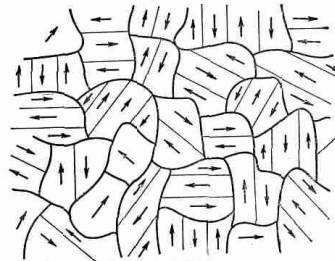


Рис.1. Взаємна орієнтація магнітних доменів.

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

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

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.

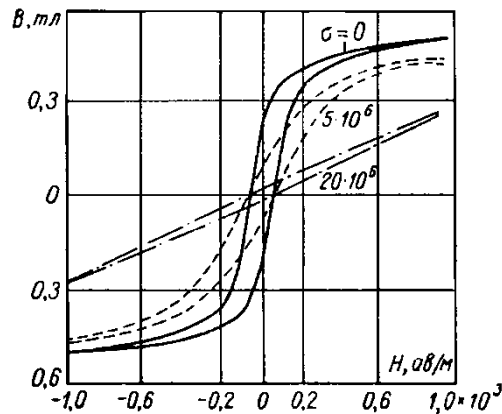


Рис.2. Гістерезисні криві нікелю.

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 $\Delta l/l$.

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

де μ_{II} - 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).

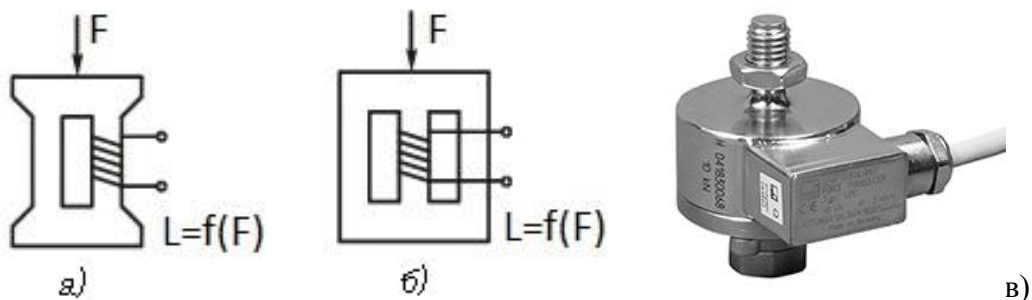


Рис.3 а,б,в).

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

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

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

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

де Ψ - магнітне потокозчеплення витків котушки; w - кількість витків котушки; I - 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:

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

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

$$\begin{aligned} \Delta L \approx dL &= \frac{\partial L}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial L}{\partial S} dS + \frac{\partial L}{\partial l} dl = \\ &= \frac{w^2 S}{l} d\mu + \frac{w^2 \mu}{l} dS - \frac{w^2 \mu S}{l^2} dl = \\ &= L \frac{d\mu}{\mu} + L \frac{dS}{S} - L \frac{dl}{l} = L \left(\frac{d\mu}{\mu} + \frac{dS}{S} - \frac{dl}{l} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Скористаємось визначеннями коефіцієнтів магнітопружної чутливості k_μ та Пуасона k_Π .

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

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

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

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:

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

де E – модуль Юнга матеріалу.

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

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

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

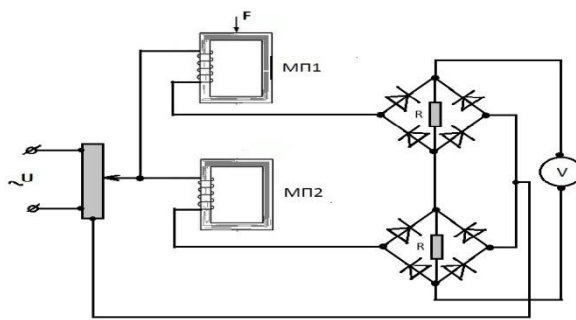


Рис.5. Схема ввімкнення магнітопружного перетворювача у вимірювальне мостове коло.

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).

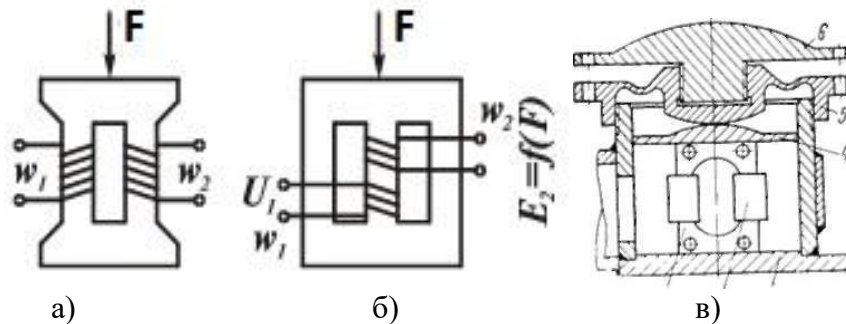


Рис.6 а-в) . Трансформаторні магнітопружні перетворювачі.

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

$$F \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_M \rightarrow M \rightarrow \varepsilon \quad (12)$$

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:

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

Оскільки коефіцієнт взаємоіндукції котушок

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

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

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

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

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

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

Відносна зміна вхідного сигналу

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

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

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

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

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

то кінцевий варіант функції перетворення матиме наступний вид:

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

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.

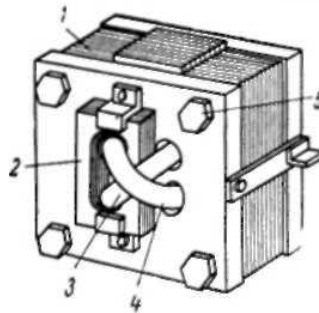


Рис. 7. Зовнішній вигляд магнітоанізотропного перетворювача.

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.

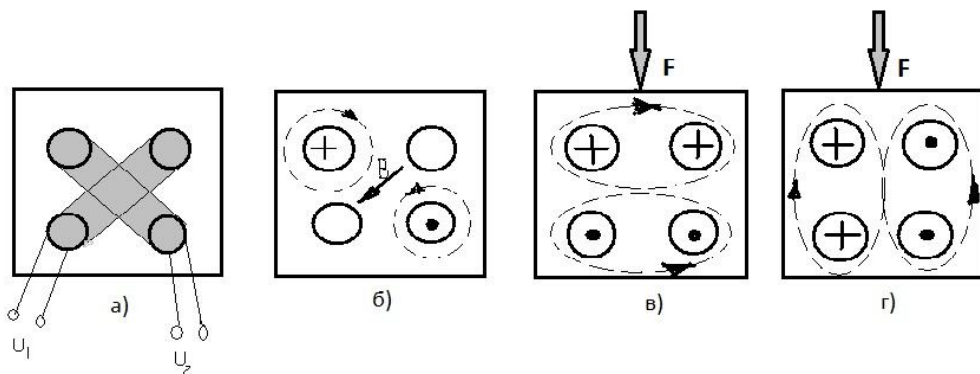


Рис.8. До пояснення роботи перетворювача. а) – розміщення витків намагнічуючої та вимірювальної обмоток; б) – при відсутності сили F лінії магнітного поля не зчеплені з вимірювальною обмоткою; в,г) – при наявності сили магнітні лінії перетинають вимірювальну обмотку, індукується ерс.

При відсутності вимірюємої сили лінії магнітного потоку намагнічуючої обмотки 4 завдяки ізотропним властивостям феромагнетика (магнітна проникність однакова по всім

напряжкам) 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.
