Лекція 12

# Розділ 7. ІНДУКТИВНІ ТА ТРАНСФОРМАТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

## 7.1. Застосування індуктивних і трансформаторних перетворювачів

Основний розробник серійних пристроїв на базі трансформаторних (ТрП) та індуктивних (ІП) перетворювачів – Бюро взаємозамінюваності в металообробній промисловості [59, 60, 68]. ТрП та ІП розробляються рядом підприємств і організацій різних міністерств [12, 13, 25, 35, 59, 60].

Основна область застосування ІП і ТрП – вимірювання лінійних і кутових переміщень, а також вироблення сигналів непогодження в слідкуючих пристроях.

## 7.2. Переваги ІП і ТрП

Індуктивні й трансформаторні перетворювачі мають високу точність вимірювань, дають змогу отримати уніфікований електричний сигнал, пропорційний до результатів вимірювань в аналоговій або цифровій формі; здатні автоматично керувати виконавчими об'єктами за результатами контролю, у тому числі безпосередньо в процесі виконання технологічної операції.

За рубежем трансформаторні та індуктивні вимірювальні перетворювачі посідають провідне місце у виробничих програмах інструментальних фірм як за номенклатурою, так і за обсягом [77].

Основні розробники і виробники зарубіжних трансформаторних та індуктивних пристроїв: Perthen, Mann, Feinpruf, Hahn & Kolb, Hofler, Schwanog (ФРГ); Сагу, Теsа (Швейцарія); Тауlor Ноbson, Herbert Меtrology (Англія); АВСЕ (Швеція); Міtutoyo (Японія); Snheffield, Starret, Bendix, Herbert Controlls & Instruments (США) і т.ін.

Індуктивні і трансформаторні перетворювачі зарубіжних фірм, що випускаються в багатьох варіантах, використовуються для розв'язування різноманітних вимірювальних задач, наприклад, пристосовані для візуального відліку, з різною кількістю керуючих команд, для контролю похибки форми, з обчисленням статичних характеристик з результатів вимірювань тощо.

До складу ІП або ТрП входить окремий самозаписувач. За допомогою цих приладів можна виконувати обробку інформації в автоматизованих системах. Значна увага приділяється приладам керуючого контролю в процесі обробки, які випускають у кількох модифікаціях.

Системний підхід до розробки індуктивних і трансформаторних перетворювачів полягає в застосуванні модульного компонування приладів. Набір стандартних функціональних модулів дає змогу в разі об'єднання в стандартному корпусі розв'язувати найрізноманітніші вимірювальні задачі.

## 7.3. Недоліки й проблеми в галузі ІП і ТрП

Незважаючи на значне поширення ІП і ТрП у техніці виробничих вимірювань, в їх розробці переважає експериментальний підхід, за якого вибір конструктивних і схемних рішень ІП і ТрП здебільшого базується на досвіді розробника і даних експериментальних досліджень. В результаті конструктивні та схемні рішення пристроїв різних розробників (а іноді і одного розробника) істотно відрізняються один від одного навіть у разі близьких технічних і експлуатаційних характеристик пристроїв.

З огляду на це постають дві найбільш актуальні і такі, що підлягають першочерговому вирішенню в галузі ТрП та ІП, проблеми:

– *перша* – здійснювати системний підхід до проектування ІП та ТрП, щоб забезпечити задані метрологічні характеристики останніх. Особливу увагу при цьому слід приділити теорії та розрахунку ТрП переміщень, оскільки досі це найменш вивчене питання;

– *друга* – вирішувати питання оптимізації конструкції ІП та ТрП під час їх розробки. Висновки електромагнітної теорії мереж в даному випадку не враховують метрологічної суті ІП та ТрП і не встановлюють в очевидній формі їх конструктивних та метрологічних характеристик. Для ТрП це дає змогу лише наближено розраховувати градуювальні характеристики, якщо відома його конструкція.

Область застосування ІП та ТрП: електричні манометри, дифманометри, рівнеміри, електричні ваги; пристрої для вимірювання розмірів оброблюваних деталей.

## 7.4. Індуктивні перетворювачі

### 7.4.1. Загальна характеристика ІП

Для вимірювання невеликих лінійних і кутових переміщень широко використовують ІП, що являє собою котушку самоіндукції із залізним осердям та якорем, відокремленим від осердя повітряним зазором. Індуктивність котушки змінюють, змінюючи повітряний зазор у магнітному колі або переміщуючи осердя відносно котушки. Коли амплітуда і частота напруги живлення, що подається на котушку, незмінні, то між силою струму в котушці та переміщенням рухомої частини елемента існує взаємно однозначна залежність, у зв'язку з чим за силою струму можна судити про величину переміщення.

Індуктивні перетворювачі досить прості в експлуатації й надійні, оскільки не містять електричних контактів, що піддаються корозії, ерозії та стиранню.

На рис. 7.1 зображено схеми ІП. Його основні частини: котушка самоіндукції 1, з'єднана послідовно з навантаженням (наприклад, вимірювальним приладом та джерелом змінної напруги живлення); осердя 2 та якір 3, їх набирають у пакет з тонких пластин феромагнітного матеріалу (трансформаторної сталі 34А, пермалою та ін.). Схеми ІП з прямолінійним переміщенням якоря (рис. 7,1, а, б) застосовують для вимірювання малих переміщень – від часток мікрона до кількох міліметрів. Для вимірювання великих переміщень (до 30 мм) застосовують ІП з рухомим осердям (рис. 7.1, в). З введенням осердя всередину котушки індуктивність її змінюється приблизно пропорційно до маси металу, введеного всередину котушки. Чутливий елемент, зображений на рис. 7.1, г, з осердям конічної форми призначений для вимірювання переміщень порядку кількох сантиметрів.

Індуктивність *L*, Гн, котушки з числом витків *w* найпростішого ІП (рис. 7.1, а)



де Ф – магнітний потік, мкс [Вб]; *I* – струм у котушці, А.

В системі ІС

 (7.1)

Магнітний потік, Вб,

 (7.2)

де *R*M *–* магнітний опір, що складається із опору *R*ж магнітопроводу (осердя та якоря) і опору *R*п двох повітряних зазорів;

 (7.3)

δ *–* довжина повітряного зазору, м; *μ*0 *–* магнітна стала (магнітна проникність вільного простору), що характеризує магнітне поле у вакуумі і дорівнює 2*π⋅*10-7 Гн/м; *S*п – площа поперечного перерізу повітряного зазору, м.



Рис. 7.1. Схеми індуктивних перетворювачів:   
а – з П-подібним осердям; б – з Ш-подібним осердям;   
в – соленоїдного типу; г – з осердям конічної форми

Абсолютна магнітна проникність, що характеризує середовище (матеріал), в яке проникає магнітне поле, Гн/м:

 (7.4)

де *μ* – відносна магнітна проникність (величина безрозмірна), яка показує, у скільки разів магнітна проникність у даному середовищі більша за магнітну проникність у вакуумі. Магнітний опір осердя та якоря

, (7.5)

де *l*1 – довжина шляху магнітного потоку в осерді, м; *μ*а1 – абсолютна магнітна проникність для матеріалу осердя, якщо магнітна індукція в осерді *B*м1; *S*1 – площа поперечного перерізу осердя, м2; *l*2 – довжина шляху магнітного потоку в якорі, м; *μ*а2 – магнітна проникність для матеріалу якоря, коли магнітна індукція в якорі *B*м2; *S*2 *–* площа поперечного перерізу якоря, м2.

Значення *μ*а1 і *μ*а2 знаходять за допомогою графіка або таблиць *В* = *f(Н)* за формулою

 (7.6)

де *В –* індукція, Тл; *Н –* напруженість, А/м.

Графік кривих .індукції електротехнічної сталі показано на рис. 7.2, де 1 – Э41, 2 – Э44, товщина 0,2 мм; 3 –Э310, товщина 0,35 мм; 4 – Э310, товщина 0,08 мм.

Підставляючи Ф та *R*п в формулу (7.1), дістанемо



і струм у котушці

 (7.7)

тобто при незмінних значеннях активного опору *R* обмотки, частоти *ω* і напруги *U* джерела живлення струм у котушці залежатиме від довжини повітряного зазору, а при незмінній довжині зазору – від площі його перерізу.

Звичайно індуктивний перетворювач проектують з ненасиченим магнітопроводом, причому повітряний зазор вибирають у межах 0,1...0,5 мм. За цих умов *R*ж<<2*δ*/(*μ*0*S*п); активний опір *R* також значно менший за індуктивний *R*<<*ωL.*



Рис. 7.2. Графіки кривих індукції електротехнічної сталі

Знехтувавши значеннями *R* і *R*ж, отримуємо

 (7.8)

На рис. 7.3, а зображено залежність індуктивності від довжини повітряного зазору, а, отже, і від переміщення якоря. Щоб забезпечити лінійність характеристики, робочий хід якоря беруть невеликим порівняно з початковим зазором: *δ*0 (Δ*δ*<<*δ*0)*.* Тоді робоча ділянка гіперболічної характеристики ІП буде близькою до прямолінійної. Силу струму в котушці при *R*ж<<*R*п і *R*<<*ωL* можна визначити за наближеною формулою

 (7.9)





Рис. 7.3. Залежність індуктивності від довжини зазору (а) і   
струму від довжини зазору (б) для ІП

Отже, можна вважати, що характеристика ІП, тобто залежність струму в котушці від повітряного зазору переміщення якоря лінійна. На графіку (рис. 7.3, б) цю характеристику зображено пунктиром. Реальна характеристика відрізняється від лінійної наявністю нелінійності за рахунок початкового струму при нульовому повітряному зазорі, а також наближенням струму до усталеного значення *I*у=*U*/*R*, якщо зазори великі і активний опір стає порівнянним з індуктивним. Істотний недолік даного ІП полягає в тому, що на якір діють великі магнітні сили, які намагаються притягнути якір до осердя магнітопроводу. Ці сили збільшуються із зменшенням зазору: вони пропорційні до квадрата ампер-витків котушки. Тому, щоб втримати якір у відтягнутому стані, потрібно прикласти значні зусилля, які перешкоджатимуть переміщенню якоря під час дії зовнішніх сил, а коли ці сили малі, якір взагалі не переміщуватиметься. До недоліків даного ІП слід також віднести нелінійність його характеристики, оскільки насправді *R*ж≠0 і *R*≠0*.*

## 7.4.2. Диференціальні індуктивні перетворювачі

Найбільшого поширення набули диференціальні ІП, в яких якір розміщений в просторі між двома осердями, закріпленими на спільній основі (рис. 7.4). Під час переміщення якоря від нейтрального положення індуктивність *L*1 однієї котушки зменшується на Δ*L*, а індуктивність *L*2 другої котушки збільшується:

 (7.10)

Котушки звичайно вмикають у сусідні плечі мостової схеми. Чутливість диференціального ІП приблизно вдвічі вища за чутливість ІП, розглянутого в підрозділі 7.4.1. На якір диференціального ІП також може діяти сила притягання до осердя, пов'язана з магнітною дією струму, що протікає в котушках ІП. Але, оскільки сили притягання до одного і другого осердя протилежні за напрямом, то результуюча сила, що діє на якір, дорівнює різниці сил притягання і буде дуже малою або дорівнюватиме нулю в разі нейтрального положення якоря. Коли за умовами використання потрібно, щоб ця сила була якомога меншою і нею можна було знехтувати, то слід ІП виконувати малим за розмірами і масою, вибирати малу силу струму живлення і застосовувати фазочутливий підсилювач для підсилення вихідної напруги до рівня, який дає змогу виконувати вимірювання.

Перевагою диференціального ІП є також можливість отримати лінійну характеристику на порівняно великому діапазоні переміщення якоря, оскільки нелінійності характеристик двох котушок взаємно компенсуються.



Рис. 7.4. Диференціальні ІП: а – з П-подібним осердям;   
б– з Ш-подібним осердям; в – соленоїдного типу;   
г –з осердям конічної форми; д -– з поворотним якорем

Компенсація впливу температури, зміна якої спричинює зміну опору з'єднувальних проводів, у диференціальних ІП також спрощується. Фаза напруги в діагоналі мосту, двома плечами якого є котушки диференціального ІП, залежить від напряму переміщення якоря. В ІП типу, зображеного на рис. 7.4, а, б, вибирають повітряний зазор 0,2...1,0 мм. Повітряний зазор на один бік (*δ*0) має бути приблизно вдвічі більший, ніж максимальний хід якоря. Частоту напруги живлення вибирають у діапазоні 100... 1000 Гц. У разі використання струму частотою понад 3000...5000 Гц різко зростають втрати в сталі на перемагнічування і реактивний опір обмотки. На високих частотах доцільно застосовувати феритові осердя.

На рис. 7.4, а, б показано схеми диференціальних ІП з П-подібним і Ш-подібним осердями. На рис. 7.4, в зображено схему ІП соленоїдного типу з рухомим осердям. Дві котушки встановлено на товстостінній трубці, всередині якої вміщують феромагнітне осердя. Переміщення осердя, спричинене зміною вимірюваної величини (наприклад, зміною рівня рідини в резервуарі), збільшує індуктивність однієї і зменшує індуктивність другої котушки. Через це змінюється струм у діагоналі мосту змінного струму, двома плечима якого є котушки ІП.

На рис. 7.4, г показано схему диференціального ІП із осердям 1 конічної форми. Котушки 2 вміщено у феромагнітний кожух 3. Магнітний потік котушки замикається так, як показано на рис. 7.4 пунктиром.

Коли якір зміщується вздовж осі симетрії (напрямні якоря на рис. 7.4 не показані), повітряні зазори між якорем і котушками змінюються, збільшуючись у одній з них і зменшуючись у другій, що спричинює появу сигналу на виході. Якщо, наприклад, на якір такого ІП передається переміщення тяги керування рулем літака, то сигнал на виході ІП залежатиме від переміщення тяги, тобто від кута відхилення руля.

На рис. 7.4, д зображено диференціальний ІП з поворотним якорем, призначений для вимірювання кутових переміщень. Якір 1 рухається перпендикулярно до довжини *δ* повітряного зазору, яка залишається при цьому незмінною, а перекриваєма якорем площадка полюса змінюється. У нейтральному положенні якоря індуктивності обох котушок 3’ і 3” однакові, оскільки площі полюсів 2’ і 2”, що перекриваються якорем, у правій і лівій половинах елементів рівні між собою. При повороті якоря, наприклад за годинниковою стрілкою, перекриваєма якорем площа полюса 2’ зменшиться, що спричинює збільшення магнітного опору потоку обмотки 3’, а площа 2’’, перекриваєма якорем, збільшується, через що магнітний опір потоку обмотки 3’’ зменшується. В результаті індуктивність обмотки 3’ зросте, а обмотки 3’’ – зменшиться, що змінить величину вихідного сигналу (див. формулу (2.7)).