

УДК 620.179.1

**МОДЕЛЮВАННЯ ВИХОРОСТРУМОВОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА З П-ПОДІБНИМ МАГНІТОПРОВОДОМ,
РОЗТАШОВАНОГО НАД ФЕРОМАГНІТНИМ ЗРАЗКОМ
ІЗ ТРІЩИНОЮ**

В. Гамалій, Д. Трушаков

*Кіровоградський національний технічний університет
пр. Університетський, 8, Кіровоград 25006, Україна
relintern@kdtu.kr.ua, miek@kdtu.kr.ua*

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень взаємодії накладного вихорострумowego перетворювача (ВСП) з П-подібним магнітопроводом та феромагнітного матеріалу з дефектом типу “наскрізна тріщина”. Враховано вплив головної завади – щілини між ВСП і контрольованою поверхнею. Розроблено графоаналітичну спрощену модель та отримано формули для інженерного розрахунку внесеної індуктивності такого ВСП залежно від розкриття тріщини та розміру щілини. Отримано вирази для оцінки чутливості ВСП до тріщини та щілини.

Ключові слова: вихорострумовой перетворювач, внесена індуктивність, розкриття тріщини, завада.

У сучасній дефектоскопії феромагнітних деталей та вузлів для вирішення завдань технічної діагностики широко використовують електромагнітні методи неруйнівного контролю, зокрема, метод вихорових струмів. Однак, теоретичний опис фізичних процесів, що виникають у разі контролювання неоднорідних середовищ перетворювачами з неоднорідним полем, складний. Класичний підхід до розв’язування цієї задачі ґрунтується на розв’язуванні рівнянь Максвелла та Гельмгольца в диференціальному вигляді [5] і є складним та громіздким. Тому для створення інженерних методик використовують спрощення – припущення, методи еквівалентування тощо [3].

Ми мали на меті створити спрощену математичну модель, що дає змогу описати взаємодію накладного ВСП з П-подібним магнітопроводом та феромагнітного матеріалу з дефектом типу “наскрізна тріщина” в разі зміни головної завади – щілини δ між полюсами ВСП і контрольованою поверхнею.

Зазначимо, що П-подібний накладний параметричний ВСП – це котушка індуктивності з феромагнітним осердям П-подібної форми, на яке намотана високочастотна обмотка з кількістю витків W . На рис.1 показано принцип дії ВСП з П-подібним осердям, що розташований над контрольованим феромагнітним зразком з тріщиною. Магнітний потік Φ від ВСП індукує в контрольованому

зразку вихорові струми i_B , інтенсивність яких визначена питомою електропровідністю зразка та параметрами тріщини.

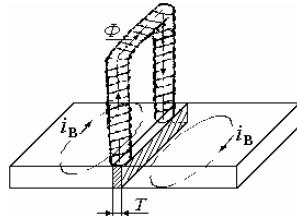


Рис. 1. ВСП з П-подібним осердям, розташований над контрольованою феромагнітною поверхнею з тріщиною.

У разі зміни розкриття тріщини T або щілини δ змінюється потокозчеплення магнітного поля та магнітний опір кола ВСП–зразок. Визначимо залежність сили струму I в обмотці ВСП від щілини δ та розкриття тріщини T :

$$I = \frac{U}{Z_0 + Z_{\text{вн}}} = \frac{U}{Z}, \quad (1)$$

де U – напруга струму живлення ВСП; Z_0 – опір обмотки ВСП у повітрі; $Z_{\text{вн}}$ – додатковий опір, що створює зразок у ВСП ($Z_{\text{вн}} = f(T, \delta)$); Z – повний опір обмотки.

За жорстких умов технологічного процесу виготовлення деталей магнітна проникність μ та електропровідність σ матеріалу практично незмінні для всіх зразків. Тому впливу μ та σ на $Z_{\text{вн}}$ не розглядатимемо.

Імпеданс обмотки ВСП складається з активного R та індуктивного X_L опорів:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}. \quad (2)$$

Тут f – частота струму; L – індуктивність обмотки ВСП,

$$L = L_0 + L_{\text{вн}} = \frac{W \cdot \Phi}{I}, \quad (3)$$

де L_0 – індуктивність обмотки ВСП у повітрі; $L_{\text{вн}}$ – додаткова індуктивність, яку створює зразок у ВСП ($L_{\text{вн}} = f(T, \delta)$).

За достатньо малих значень T і δ та значних магнітних проникностей магнітопроводу ВСП і контрольованого зразка потоками розсіяння можна знехтувати і вважати, що через зразок замикається весь магнітний потік:

$$\Phi = \frac{I \cdot W}{R_m}, \quad (4)$$

де R_m – магнітний опір кола ВСП–зразок, $R_m = R_{\text{ст}} + R_3$ ($R_{\text{ст}}$ – магнітний опір осердя і феромагнітної сталі, з якої виготовлена деталь; R_3 – магнітний опір повітряної щілини).

Магнітний опір повітряної щілини

$$R_3 = \frac{2\delta}{\mu_0 S_m}, \quad (5)$$

де $\mu_0=4\cdot\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; S_m – площа поперечного перерізу осердя в зоні повітряної щілини.

З врахуванням цього магнітний потік

$$\Phi = \frac{I \cdot W}{R_{ct} + 2\delta / (\mu_0 S_m)}. \quad (6)$$

Тоді, згідно з виразами (3) і (6), індуктивний опір обмотки ВСП

$$X_L = \omega L = \frac{\omega \cdot W^2}{R_{ct} + 2\delta / (\mu_0 S_m)}. \quad (7)$$

Повний опір обмотки ВСП

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot \left[\frac{W^2}{R_{ct} + 2\delta / (\mu_0 S_m)} \right]^2}. \quad (8)$$

Аналіз виразу (8) засвідчує, що зі збільшенням повітряної щілини імпеданс Z зменшується.

Знехтуємо величиною R_{ct} в (8), оскільки магнітний опір повітряної щілини значно перевищує магнітний опір осердя, та одержимо спрощені вирази для визначення індуктивного опору та індуктивності:

$$X_L = \frac{\omega \cdot W^2}{2\delta / (4\pi \cdot 10^{-7} S_m)} = \frac{2\pi\omega W^2 S_m}{\delta} \cdot 10^{-7}; \quad (9)$$

$$L = f(\delta) = \frac{W^2 \mu_0 S_m}{2\delta} = \frac{K}{\delta}, \quad (10)$$

де K – функція конструктивних параметрів ВСП.

Зазначимо, що в разі значних щілин частина магнітного потоку замикається не через деталь, а через повітря. Це необхідно враховувати під час розробки вихорострумових дефектоскопів.

Оцінимо чутливість ВСП у разі включення його в плече мостової вимірювальної схеми як змінного опору. Міст живиться напругою змінного струму частоти f . Під чутливістю ВСП до зміни повітряної щілини K_δ будемо розуміти відносну зміну опору, нормовану до приросту повітряної щілини [2]:

$$K_\delta = \frac{\Delta Z / Z}{\Delta \delta}, \quad (11)$$

де $\Delta \delta$ – приріст повітряної щілини, що спричинює небажану зміну повного опору обмотки ВСП Z на ΔZ .

При $R \ll X_L$ одержимо $Z = \omega L$. Похідна повного опору за зміною повітряної щілини при $\omega = \text{const}$ і з врахуванням виразу (9)

$$\frac{dZ}{d\delta} = \frac{\omega \cdot dL}{d\delta} = -\frac{\omega W^2 \mu_0 S_m}{2\delta^2}, \quad (12)$$

або в кінцевих приростах –

$$\frac{\Delta Z}{\Delta \delta} = -\frac{\omega W^2 \mu_0 S_m}{2\delta^2}. \quad (13)$$

З (10), (11) і (13) одержимо вираз для визначення чутливості ВСП до зміни повітряної щілини:

$$K_{\delta} = \frac{\Delta Z / \Delta \delta}{Z} = \frac{\omega W^2 \mu_0 S_m}{2\delta^2 \omega L} = \frac{W^2 \mu_0 S_m 2\delta}{2\delta^2 W^2 \mu_0 S_m} = \frac{1}{\delta}. \quad (14)$$

Отже, зі збільшенням щілини чутливість ВСП зменшується гіперболічно. У разі малих робочих щілин чутливість K_{δ} дуже велика. Наприклад, при $\delta=0,1$ мм і $\Delta\delta=0,01$ мм чутливість $K_{\delta}=1/10^{-4}=10000$ 1/м, а відносна зміна опору $\Delta Z/Z=K_{\delta}\cdot\Delta\delta=10000\cdot10^{-5}=0,1$. Тобто в разі зміни щілини на 0,01 мм опір ВСП змінюється на 10%, що сумірно з корисним сигналом від тріщини.

Для визначення залежності внесеної індуктивності ВСП $L_{\text{вн}}$ від розкриття тріщини зобразимо тріщину, що розташована під полюсами осердя ВСП, у вигляді прямокутника та двох прилеглих до нього сегментів (рис. 2).

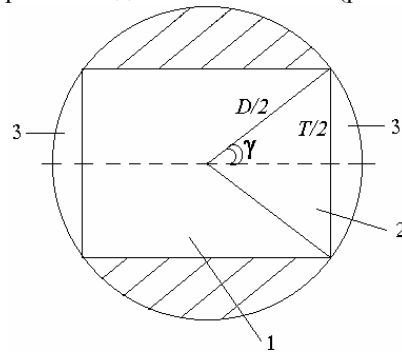


Рис. 2. Тріщина, що розташована під полюсом осердя ВСП, поділена на такі елементи: 1 – прямокутник; 2 – трикутник; 3 – сегменти.

Позначимо відношення ширини розкриття тріщини T до діаметра осердя D через α : $T/D=\alpha$. Як видно з рис. 2, $\sin \gamma = \frac{T/2}{D/2} = \frac{T}{D}$. Для малих значень кута γ

$\sin \gamma \approx \gamma$, отже, $\gamma \approx \alpha$.

Площа тріщини $S_{\text{щ}}$ дорівнює сумі площин прямокутника $S_{\text{пр}}$ та двох сегментів $S_{\text{сег}}$: $S_{\text{щ}}=S_{\text{пр}}+2S_{\text{сег}}$.

За малих α ($\alpha \leq 0,3$) площа прямокутника

$$\begin{aligned} S_{\text{пр}} &= \frac{D}{2} \cos \gamma \cdot 2 \cdot T = D \cdot T \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \gamma} \cong D \cdot T \cdot \sqrt{1 - \gamma^2} = D \cdot T \cdot \sqrt{1 - \alpha^2} \cong D \cdot T \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \alpha^2\right) = \\ &= D^2 \alpha \left(1 - \frac{1}{2} \alpha^2\right). \end{aligned}$$

$$\text{Площа сегмента } S_{\text{сег}} = \frac{\pi R^2}{360} \cdot 2\gamma - S_{\text{пр}} = \frac{\pi (D/2)^2}{360} \cdot 2 \cdot \frac{360}{2\pi} \cdot \alpha - S_{\text{пр}}.$$

$$\text{Площа трикутника } S_{\text{тр}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{2} \cdot \cos \gamma \cdot T = \frac{D^2}{4} \cdot \alpha \cdot \sqrt{1 - \alpha^2} = \frac{D^2}{4} \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \alpha^2\right).$$

Отже, площа сегмента $S_{\text{сег}} = \frac{D^2}{4} \cdot \alpha - \frac{D^2}{4} \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \alpha^2\right) = \frac{D^2}{8} \cdot \alpha^3$.

Загальна площа тріщини під полюсом ВСП

$$S_{\text{щ}} = D^2 \alpha + 2 \frac{D^2}{8} \alpha^3 - \frac{1}{2} D^2 \alpha^3 = D^2 \left[\alpha - \frac{1}{4} \alpha^3 \right] = D^2 \left[\frac{T}{D} - \frac{1}{4} \left(\frac{T}{D} \right)^3 \right]. \quad (15)$$

Знайдемо кут γ для максимального розкриття тріщини $T/D = \alpha = 0,3$, тобто $\sin \gamma = 0,3$; $\gamma = 17^\circ \approx 0,3$ рад. Отже, загальна площа тріщини при $\alpha = 0,3$

$$S_{\text{щ}} = D^2 \left(0,3 - \frac{1}{4} \cdot 0,027 \right) = 0,293 \cdot D^2.$$

Аналіз цього співвідношення засвідчує таке: з похибкою 2% можна вважати, що в межах $0 \leq \alpha \leq 0,3$ площа тріщини $S_{\text{щ}}$ змінюється лінійно залежно від параметра α : $S_{\text{щ}} \cong \alpha D^2$.

Отже, при $\alpha \leq 0,3$ активна площа поперечного перерізу полюса над тріщиною $S_{\text{м}}^a$ (не заштрихована на рис. 3) пов'язана з розкриттям тріщини T лінійно:

$$S_{\text{м}}^a = S_0 - S_{\text{щ}} = \frac{\pi D^2}{4} - \alpha D^2 = \frac{\pi D^2}{4} \left[1 - \frac{4}{\pi} \alpha \right],$$

де S_0 – повна площа полюса ВСП.

Потік розсіювання пропорційний до площі тріщини $S_{\text{щ}} \approx \alpha D^2$, тому зі збільшенням розкриття тріщини T він буде лінійно зростати. Індуктивність ВСП

$$L = \frac{2\pi W^2 S_{\text{м}}}{\delta} \cdot 10^{-7} = K_1 \cdot S_{\text{м}} = K_1 \cdot S_0 \left(1 - \frac{4}{\pi} \alpha \right) \quad (16)$$

буде зменшуватися лінійно зі зростанням T (і, відповідно, α).

Як бачимо, залежність внесеної індуктивності ВСП від зміни розкриття тріщини T описує лінійна функція за умови, що $T/D \leq 0,3$:

$$L_{\text{щ}} = f(T) \approx \left[1 - \frac{4}{\pi} \cdot \frac{T}{D} \right]. \quad (17)$$

Визначимо чутливість ВСП $K_{\text{щ}}$ до розкриття тріщини. Чутливість – це відносна зміна опору, поділена на приріст площі розкриття тріщини:

$$K_{\text{щ}} = \frac{\Delta Z_{\text{щ}} / Z_{\text{щ}}}{\Delta T} = \frac{\Delta Z_{\text{щ}} / Z_{\text{щ}}}{D \cdot \Delta \alpha}. \quad (18)$$

Індуктивність $L_{\text{щ}}$ обмотки ВСП, полюси якого розташовані вздовж тріщини, обчислюють за спрощеним виразом

$$L_{\text{щ}} = \frac{W^2}{2\delta / (\mu_0 S_{\text{м}})} = \frac{W^2 S_{\text{м}} \mu_0}{2\delta} = \frac{W^2 \mu_0}{2\delta} S_0 \left(1 - \frac{4}{\pi} \alpha \right). \quad (19)$$

Повний опір

$$Z_{\text{щ}} = \sqrt{R^2 + \omega^2 \left[\frac{W^2}{2\delta / (\mu_0 S_m)} \right]^2}. \quad (20)$$

При $R \ll X_L$ одержимо $Z_{\text{щ}} = \omega L_{\text{щ}}$. Похідна повного опору за зміною ширини тріщини

$$\frac{dZ_{\text{щ}}}{d\alpha} = \omega \frac{dL_{\text{щ}}}{d\alpha}; \quad (21)$$

$$\frac{dZ_{\text{щ}}}{d\alpha} = \frac{2\pi\omega W^2}{\delta} S_0 \frac{d(1 - \frac{4}{\pi}\alpha)}{d\alpha} = -\frac{8\omega W^2 S_0}{\delta}. \quad (22)$$

Поділимо вираз (22) на $Z_{\text{щ}} = \omega L_{\text{щ}} = \frac{2\pi\omega W^2 S_0}{\delta}$, отримаємо

$$K_{\text{щ}} = \frac{\Delta Z}{Z \Delta \alpha} = \left| \frac{\frac{2\pi\omega W^2 S_0}{\delta}}{\frac{\omega W^2 \mu_0 S_0 (1 - \alpha)}{2\delta}} \right| = \frac{1}{D(1 - \alpha)} = D(1 - \alpha)^{-1} \approx D(1 + \alpha). \quad (23)$$

Тому в разі розкриття тріщини $\alpha \leq 0,3$ чутливість ВСП змінюється приблизно лінійно зі збільшенням α .

Порівняння виразу (14) для визначення чутливості ВСП до коливань щілини δ ($K_{\delta} = 1/\delta$) з виразом (23) для визначення чутливості ВСП до зміни розкриття тріщини T показує, що коливання щілини між ВСП та контрольованою поверхнею є серйозною завадою. З огляду на це ми розробили резонансний спосіб, що є нечутливий до цієї завади [1].

Експериментальні дослідження, виконані на частотах 1 та 10 кГц цифровим вимірювачем імпедансу Е7-14, з точністю до 85% підтвердили правильність виразів (10), (17) [4].

Результати досліджень використані під час розробки приладу для дефектоскопії високонавантажених деталей гідропомпи об'ємного гідроприводу ГСТ-90.

Отже, створено графоаналітичну спрощену модель ВСП з П-подібним магнітопроводом, розташованим над феромагнітним зразком із тріщиною. Аналіз моделі засвідчив таке:

1) залежність внесеної індуктивності від співвідношення розкриття тріщини T до діаметра осердя D описує лінійна функція $L_{\text{вн}} \approx \left[1 - \frac{4}{\pi} \cdot \frac{T}{D} \right]$;

2) залежність внесеної індуктивності ВСП від зміни повітряної щілини δ між полюсом перетворювача та контрольованою поверхнею (що є головною завадою) описує гіперболічний закон $L_{\text{вн}} \approx \frac{K}{\delta}$;

3) для оцінки чутливості ВСП отримано такі вирази:

- у діапазоні $T/D \leq 0,3$ чутливість залежить від T лінійно $K_{\text{щ}} \approx D(1 + \frac{T}{D})$,
- чутливість обернено пропорційна до зміни повітряної щілини $K_{\delta} \approx \frac{1}{\delta}$;

4) порівняння виразів для чутливостей ВСП до зміни щілини δ та до зміни розкриття тріщини T засвідчило необхідність стабілізації щілини або компенсації впливу коливань ВСП на корисний сигнал від тріщини. Для підвищення точності контролю ми розробили резонансний спосіб, менш чутливий до зміни щілини.

1. *Деклараційний патент 34933А Україна, МКИ G01N27/86*. Спосіб повного відстроювання від впливу проміжку у вихорострумовій дефектоскопії ферромагнітних виробів: Деклараційний патент 34933А Україна, МКИ G01N27/86/ Б.І. Ващенко, Д.В. Трушаков; Кіровоградський державний технічний університет. №99074185; Заявл. 20.07.1999; Опубл. 15.03.2001.
2. *Келим Ю.М.* Електромеханические и магнитные элементы систем автоматики. М.: Высш. школа, 1991.
3. *Серебренніков С., Смірнов Б., Трушаков Д.В.* Математичне моделювання взаємодії електромагнітного поля прямокутної котушки з вертикальношаровим провідним середовищем // Теор. електротехніка. 2000. Вип. 55. С. 85–89.
4. *Серебренніков С.В., Трушаков Д.В.* Дослідження вихорострумових перетворювачів з П-подібним та стержневим осерддям // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. 2005. Вип. 10. С. 126–130.
5. *Соболев В.С., Шкарлет Ю.М.* Накладные и экранные датчики. Новосибирск: Наука, 1967.

SIMULATION OF A U-TYPE CORE EDDY-CURRENT TRANSFORMER LOCATED ON FERROMAGNETIC MATERIAL WITH “CRACK TYPE” DEFECTS

V. Gamaliy, D. Trushakov

*Kirovograd National Technical University,
University Str., 8, Kirovograd 25006, Ukraine
relintern@kdtu.kr.ua, miek@kdtu.kr.ua*

The work contains the results of theoretical and experimental research of interaction between a laying-in U-type core eddy-current transformer (ECT) and tested ferromagnetic material with defects of through-the-thickness crack type at variation of the main disturbing factor – variable air-gap fluctuation between the sensor and tested surface. There has been developed a graphic-analytical simplified model and received equations for engineering calculation of introduced inductances of such eddy-current transformer depending on crack width and air-gap fluctuation size. The have been received equations for estimation sensitivities of eddy-current transformer to depends on crack width growth and to change of air-gap.

Key words: eddy-current transformer, introduced inductance, opening of crack, hindrance factor.

Стаття надійшла до редколегії 20.06.2005

