

## ВЛАСНА І ВЗАЄМНА ОПЕРАТОРНІ І ПЕРЕХІДНІ ІНДУКТИВНОСТІ ПРОХІДНОГО ВНУТРІШНЬОГО КІЛЬЦЕВОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА У ПРОВІДНІЙ ТРУБИ

ã Яцун М.А., Яцун А.М., 2014

Отримані вирази для власної і взаємної операторної і перехідної основної і внесеної індуктивностей обмотки збудження прохідного екранованого кільцевого первинного перетворювача прямокутного поперечного перерізу всередині контрольованої провідної труби

*Ключові слова: операторна і перехідна основна і внесена індуктивності обмотки, первинний перетворювач.*

Explored for own and mutual the Laplace transform and transitional basic and brought in inductances of puttee of excitation of the communicating screened circular primary transformer rectangular transversal to the cut into the controlled leading pipe

*Key words: operator and the main transition and introduced inductance winding transformer primary.*

### Постановка проблеми

Питання моніторингу технічного стану трубопроводів для забезпечення надійності та безпеки постачання енергоносіїв (природного газу) магістральними трубопроводами набуває дедалі більшої актуальності через значний ступінь зношеності та старіння устаткування вітчизняного нафтогазового комплексу.

Основною задачею технічного діагностування трубопроводів є встановлення фактичної товщини стінки трубопроводу та виявлення дефектів типу порушення суцільності. Найефективнішим для проведення робіт з технічного діагностування за всією довжиною трубопроводу з мінімальними простоями в роботі трубопроводу є здійснення внутрішньо-трубної діагностики з використанням інтелектуальних поршнів, які рухаються під напором транспортного продукту. Проте внутрішньо-трубна діагностика з використанням магнітних поршнів [1] потребує удосконалення для забезпечення вищої достовірності та точності контролю.

Перевагами вихрострумowego методу контролю є безконтактність, відсутність залишкових магнітних ефектів і можливість виявляти поверхневі тріщини з малим розкриттям та дефекти розшарування металу трубопроводу.

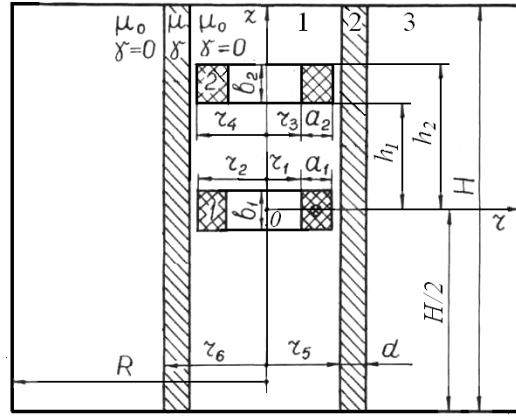
Тому актуальною є задача визначення операторних і перехідних параметрів внутрішніх прохідних вихрострумowych перетворювачів параметричного і трансформаторного типів під час імпульсного живлення для отримання багатопараметрової інформації про об'єкт контролю.

У разі контролю геометричних розмірів, дефектів і фізико-механічних параметрів електропровідних матеріалів, деталей і виробів (труб) імпульсним вихрострумowym методом інформативними параметрами первинного перетворювача є його внесені перехідні власна і взаємна індуктивності обмотки збудження і вимірної обмотки [2] і їх чутливості до параметрів об'єкта контролю з метою виявлення і вибору оптимальних моментів часу і інформативних величин для розв'язки багатопараметрової інформації.

### Аналіз останніх досліджень

У літературі [2] отримані вирази в операторній формі для векторного потенціалу магнітного поля прохідного кільцевого екранованого вихрострумowego первинного перетворювача прямокутного поперечного перерізу параметричного і трансформаторного типів у провідній трубі (об'єкт контролю, рисунок), що уможливорює перехід до визначення параметрів такого перетворювача.

На рисунку і в поданих нижче виразах прийняті такі позначення:  $\mu_0$  – магнітна стала;  $\mu_r$  і  $\gamma$  – відносна магнітна проникність і питома електрична провідність контрольованої труби товщиною  $d$ ;  $\gamma_1$   $\gamma_3$  – питома електрична провідність відповідно всередині і ззовні труби;  $r_1$  і  $r_2$  – внутрішній і зовнішній радіуси обмотки збудження;  $r_3$  і  $r_4$  – внутрішній і зовнішній радіуси вимірної обмотки;  $a_1$  і  $b_1$  – ширина і висота обмотки збудження;  $a_2$  і  $b_2$  – ширина і висота вимірної обмотки;  $r_5$  і  $r_6$  – внутрішній і зовнішній радіуси труби;  $h_1$  і  $h_2$  – нижня і верхня ординати вимірної обмотки;  $R$  і  $H$  – радіус і висота екрана; 1, 2, 3 – області простору, обмеженого екраном;  $r$ ,  $z$  – осі координат.



Об'єкт контролю

### Виклад основного матеріалу

Власна операторна індуктивність обмотки збудження перетворювача визначається виразом

$$L_1(p) = \frac{2pW_1^2}{a_1^2 b_1^2 \tilde{d}_{01}} \int_{-b_1/2}^{b_1/2} dz \int_{r_1}^{r_2} r \tilde{A}_1 dr = L_{10} + L_{1e}(p), \quad (1)$$

де  $W_1$  – кількість витків обмотки збудження;  $\tilde{d}_{01}$  – перетворена за Лапласом густина струму в обмотці збудження;  $\tilde{A}_1$  – векторний потенціал магнітного поля, визначений у [2];  $L_{10}$  – власна індуктивність одинокої екранованої обмотки перетворювача (основної);  $L_{1e}(p)$  – внесена операторна індуктивність, викликана наявністю об'єкта контролю (труби).

В області 1 (всередині труби)  $\tilde{A}_1(p)$  визначається виразом [2]:

$$\tilde{A}_1 = m_0 \tilde{d}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_{i1} b_{k01}}{n_i^2 + m_k^2} J_1(n_i r) \cos m_k z + \tilde{d}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} I_1(p_1 r) \cos m_k z, \quad (2)$$

або в межах висоти обмотки збудження ( $-b_1/2 \leq z \leq b_1/2$ )

$$\tilde{A}_1 = m_0 \tilde{d}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} a_{i1} J_1(n_i r) \frac{1}{n_i^2 \operatorname{ch}(n_i H/2)} [\operatorname{chn}_i(H/2) - \operatorname{chn}_i((H-b_1)/2) \operatorname{chn}_i z] + \tilde{d}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} I_1(p_1 r) \cos m_k z, \quad (3)$$

а в межах вимірної обмотки ( $b_1/2 \leq z \leq H/2$ )

$$\tilde{A}_1 = m_0 \tilde{d}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} a_{i1} J_1(n_i r) \frac{1}{n_i^2 \operatorname{ch}(n_i H/2)} [\operatorname{shn}_i(b_1/2) \operatorname{shn}_i(H/2 - z)] + \tilde{d}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} I_1(p_1 r) \cos m_k z, \quad (4)$$

де  $a_{i1} = \frac{2Y_1}{R^2 J_0^2(I_i)}$  – коефіцієнт ряду Фур'є-Бесселя функції  $f_1(r) = 1$  при  $r_1 \leq r \leq r_2$  і  $f_1(r) = 0$  при

$0 \leq r \leq r_1$  і  $r_2 \leq r \leq R$ , розкладеної у проміжку  $(0, R)$ ;  $Y_1 = \int_{r_1}^{r_2} J_1(n_i r) r dr$ ;  $J_0$  – функція Бесселя першого

роду нульового порядку;  $J_1$  – функція Бесселя першого роду першого порядку;  $n_i = I_i/R$ ;

$I_1, I_2, \dots, I_i, \dots$  – корені рівняння  $J_1(I) = 0$ ;  $b_{k01} = \frac{4}{H} \int_0^{b_1/2} \cos m_k z dz = \frac{4}{m_k H} \sin \frac{m_k b_1}{2}$  – коефіцієнт

ряду Фур'є функції  $f_2(z) = 1$  при  $-b_1/2 \leq z \leq b_1/2$  і  $f_2(z) = 0$  при  $-H/2 \leq z \leq -b_1/2$  і  $b_1/2 \leq z \leq H/2$ , розкладеної у проміжку  $(-H/2, H/2)$ ;  $m_k = (2k-1)\pi/H$ ;  $I_1$  – модифікована

циліндрична функція Бесселя першого порядку першого роду;  $p_1^2 = m_k^2 + pg_1 m_0$ .

Після підстановки (3) в (1) і інтегрування одержимо

$$L_{10} = \frac{4pm_0 W_1^2}{a_1^2 b_1^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{Y_1^2}{I_i^2 J_0^2(I_i)} \left[ b_1 - \frac{2\text{chn}_i((H-b_1)/2)\text{shn}_i(b_1/2)}{n_i \text{ch}(n_i H/2)} \right] \quad (5)$$

і

$$L_{1b}(p) = \frac{4pW_1^2}{a_1^2 b_1^2} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} Y_3 \sin m_k(b_1/2)/m_k, \quad (6)$$

де  $Y_3 = \int_{r_1}^{r_2} I_1(p_1 r) r dr$ .

Аналогічно взаємна операторна індуктивність між обмоткою збудження і вимірною обмоткою перетворювача визначається виразом

$$M(p) = \frac{2pW_1 W_2}{a_1 b_1 a_2 b_2 \tilde{d}_{01}} \int_{h_1}^{h_1+b_2} dz \int_{r_3}^{r_4} r \tilde{A}_1 dr = M_0 + M_e(p), \quad (7)$$

де  $M_0$  – взаємна індуктивність між обмотками перетворювача за відсутності об'єкта контролю (основна)

і  $M_b(p)$  – взаємна внесена операторна індуктивність, викликана наявністю об'єкта контролю.

Після підстановки (3) в (4) і інтегрування одержимо:

$$M_0 = \frac{4pm_0 W_1 W_2}{a_1 b_1 a_2 b_2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{Y_1 Y_2 \text{shn}_i(b_1/2)}{n_i I_i^2 J_0^2(I_i) \text{ch}(n_i H/2)} [\text{chn}_i(H/2 - h_1) - \text{chn}_i(H/2 - h_1 - b_2)]$$

або

$$M_0 = \frac{8pm_0 W_1 W_2}{a_1 b_1 a_2 b_2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{Y_1 Y_2 \text{shn}_i(b_1/2) \text{shn}_i(b_2/2) \text{shn}_i(H/2 - h_1 - b_2/2)}{n_i I_i^2 J_0^2(I_i) \text{ch}(n_i H/2)} \quad (8)$$

і

$$M_b(p) = \frac{2pW_1 W_2}{a_1 b_1 a_2 b_2} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} Y_4 [\sin m_k(h_1 + b_2) - \sin m_k h_1]/m_k$$

або

$$M_b(p) = \frac{4pW_1 W_2}{a_1 b_1 a_2 b_2} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} Y_4 \sin m_k(b_2/2) \cos m_k(h_1 + b_2/2)/m_k, \quad (9)$$

де  $W_2$  – кількість витків вимірної обмотки;

$$Y_2 = \int_{r_3}^{r_4} J_1(n_i r) r dr; \quad Y_4 = \int_{r_3}^{r_4} I_1(p_1 r) r dr; \quad C_{11} = \frac{D_1 S_5 - m_r D_2 S_6}{m_r p_1 S_6 I_0(p_1 r_5) - S_5 I_1(p_1 r_5)};$$

$$S_1 = I_0(p_3 r_6) K_1(p_3 R) + I_1(p_3 R) K_0(p_3 r_6);$$

$$S_2 = I_1(p_3 r_6) K_1(p_3 R) - I_1(p_3 R) K_1(p_3 r_6);$$

$$S_3 = K_1(p_3 R) [q S_2 I_0(p_2 r_6) - S_1 I_1(p_2 r_6)];$$

$$S_4 = K_1(p_3 R) [q S_2 K_0(p_2 r_6) + S_1 K_1(p_2 r_6)];$$

$$S_5 = p_2 [S_4 I_0(p_2 r_5) - S_3 K_0(p_2 r_5)]; \quad S_6 = S_4 I_1(p_2 r_5) + S_3 K_1(p_2 r_5);$$

$$D_1 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2m_0 Y_1 b_{k01} J_1(n_i r_5)}{R^2 J_0^2(I_i)(n_i^2 + m_k^2)}; \quad D_2 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2m_0 n_i Y_1 b_{k01} J_0(n_i r_5)}{R^2 J_0^2(I_i)(n_i^2 + m_k^2)}; \quad q = \frac{m_0 p_2}{m p_3} = \frac{p_2}{m_r p_3};$$

$I_0$  і  $K_0$  – модифіковані циліндричні функції Бесселя нульового порядку;  $p_2^2 = m_k^2 + p g m$ ,  
 $p_3^2 = m_k^2 + p g_3 m_0$ .

Внесена операторна (за Лапласом) індуктивність (6) апроксимується виразом [3]:

$$L'_{1\epsilon}(p) = \frac{L_{1\epsilon k}}{p} + \frac{L_{1\epsilon 0} - L_{1\epsilon k}}{p + d} + \frac{\Delta L_{1\epsilon}}{(p + d_1)^{\alpha_1}}, \quad (10)$$

де  $L_{1\epsilon 0}$ ,  $L_{1\epsilon k}$  і  $\Delta L_{1\epsilon}$  – відповідно початкове, кінцеве і наближене значення внесеної індуктивності обмотки збудження;  $\delta$  і  $\delta_1$  – коефіцієнти загасання (основного і першого наближення);  $\alpha_1$  – показник степеня. Ці величини і коефіцієнти є інформативними щодо параметрів контролю.

Коефіцієнт  $\Delta L_{1\epsilon}$ , коефіцієнт загасання  $\delta_1$  і показник степеня  $\alpha_1$  у виразі (7) визначаються із системи трьох рівнянь, які виражають збіг кривих  $L_{1\epsilon}(p)$  і  $L'_{1\epsilon}(p)$  у трьох точках:  $p_{j-1}$ ,  $p_j$  і  $p_{j+1}$ , причому в точці з абсцисою  $p_j$  функція

$$j(p) = L_{1\epsilon}(p) - \frac{L_{1\epsilon k}}{p} - \frac{L_{1\epsilon 0} - L_{1\epsilon k}}{p + d}$$

приймає за модулем максимальне значення. Тоді спочатку визначається  $\delta_1$  із рівняння

$$\ln \frac{j(p_j)^2}{j(p_{j+1})j(p_{j-1})} \ln \frac{p_j + d_1}{q p_j + d_1} = \ln \frac{j(p_{j+1})}{q j(p_j)} \ln \frac{(p_j + q d_1)(q p_j + d_1)}{q(p_j + d_1)^2}$$

а потім

$$a_1 = \ln \frac{j(p_{j+1})}{q j(p_j)} \Big/ \ln \frac{p_j + d_1}{q p_j + d_1} \quad \text{і} \quad \Delta L_{1\epsilon} = j(p_j)(p_j + d_1)^{\alpha_1} / p_j. \quad (11)$$

Для отримання перехідних внесених індуктивностей необхідно перейти від їх зображень за Лапласом до оригіналів, тобто здійснити числове обернення перетворення Лапласа. Тоді, обертаючи (10), для внесеної власної індуктивності обмотки збудження одержимо:

$$L_{1\epsilon}(t) = L_{1\epsilon k} + (L_{1\epsilon 0} - L_{1\epsilon k})e^{-dt} + \frac{\Delta L_{1\epsilon}}{\Gamma(a_1)} t^{a_1-1} e^{-d_1 t}, \quad (12)$$

де  $\Gamma(x)$  – гамма-функція.

## Висновки

Отримані вирази для власної і взаємної операторної (перетвореної за Лапласом) і перехідної основної і внесеної індуктивностей обмотки збудження прохідного екранованого кільцевого первинного перетворювача прямокутного поперечного перерізу всередині контрольованої провідної труби зі струмом довільної форми, яка використовується як первинний перетворювач для діагностування технічного стану внутрішньої поверхні трубопроводів. Отримані результати доцільно використати для визначення інформативних величин первинного вимірної кола з прохідним первинним вихрострумовим перетворювачем і їх чутливостей до параметрів і дефектів об'єкта контролю.

1. *Pipeline Inspection Technologies Demonstration Report*. – Gas Research Institute. – 2004. – 98 p.
2. Яцун М.А., Яцун А.М. Векторний потенціал магнітного поля прохідного кільцевого вихрострумового первинного перетворювача параметричного і трансформаторного типів у провідній трубі // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2013. – №763: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 120–126.
3. Яцун М.А., Яцун А.М. Власна і взаємна перехідні індуктивності накладного вихрострумового перетворювача // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2009. – № 654. – С. 280–285.