

## СКЛАДОВІ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ ПРОХІДНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА У ПРОВІДНІЙ ТРУБИ

Ї Яцун М. А., 2018

Визначено перетворені за Лапласом осьова і радіальна складові магнітної індукції кільцевої екранованої циліндричної котушки прямокутного поперечного перерізу зі струмом довільної форми, яка використовується як обмотка збудження первинного прохідного внутрішнього перетворювача при діагностуванні технічного стану внутрішньої поверхні трубопроводів.

*Ключові слова: осьова і радіальна складові магнітної індукції, внутрішній прохідний вихрострумний перетворювач, діагностування трубопроводів.*

The converted on Laplace radial and axial constituents of magnetic induction circular screened cylinder spool of rectangular transverse section with the current of free-form is certain, which are used as a puttee of primary indoor internal transformer at diagnosing of the technical state of internal surface of pipelines.

*Keywords: axial and radial constituents of magnetic induction, indoor internal eddy current transformer, diagnosing of pipelines.*

### Постановка проблеми

Під час діагностування технічного стану магістральних трубопроводів (газопроводів) виявляють дефекти типу порушення суцільності, встановлюють фактичну товщину стінки трубопроводу, виявляють і визначають профіль його поверхні. На основі акустичного (ультразвукового), магнітного і вихрострумного, методів контролю розроблені інтелектуальні поршні, які використовуються за внутрішньотрубною технічною діагностики [1–6]. При вихрострумному і магнітному методах контролю первинний прохідний перетворювач параметричного або трансформаторного типу зазвичай має (може мати) форму циліндричної котушки з прямокутною формою поперечного перерізу і орієнтується (розташований) соосно із контрольованою трубою. Тому актуальною є задача розрахунку магнітного поля прохідного екранованого вихрострумного первинного перетворювача параметричного і трансформаторного типів, розташованих всередині контрольованої труби, розрахункову модель якого подано на рис. 1.

Вихрострумний метод контролю дає можливість виявити поверхневі тріщини з малим розкриттям та дефекти розшарування металу трубопроводу. Значними недоліками вихрострумного методу контролю є неглибоке проникнення вихрових струмів в об'єкт контролю (залежно від частоти збудження), значна залежність чутливості контролю від відстані між збуджуючою котушкою та об'єктом контролю і недостатня швидкодія методу для сучасних швидкостей руху внутрішньотрубних поршнів.

### Аналіз останніх досліджень

Магнітне поле збуджуючої котушки реєструється сенсорними котушками на відстані 2-х та більше діаметрів труби. Електромагнітні коливання, які проникають у стінку трубопроводу, залежать від будь-яких дефектів біля сенсорної котушки. Точність відомого методу [4, 5]

знаходиться на рівні методу вимірювання магнітного потоку. До недоліків цього методу належить значне енергоспоживання та мала швидкодія.

### Виклад основного матеріалу

На рис. 1 прийнято такі позначення:  $i_0$  і  $\delta_{01}$  – струм і густина струму в обмотці збудження давача;  $a_1$  і  $b_1$  – розміри (ширина і висота) поперечного перерізу обмотки збудження (1);  $a_2$  і  $b_2$  – розміри (ширина і висота) поперечного перерізу вимірної обмотки (2) у випадку трансформаторного перетворювача;  $r_1$  і  $r_2$  – внутрішній і зовнішній радіуси обмотки збудження;  $r_3$  і  $r_4$  – внутрішній і зовнішній радіуси вимірної обмотки;  $h_1$  і  $h_2$  – ординати вимірної обмотки;  $r_5$ ,  $r_6$  і  $d$  – внутрішній і зовнішній радіуси і товщина контрольованої труби;  $\mu$  і  $\gamma$  – абсолютна магнітна проникність і питома електрична провідність труби;  $R$  і  $H$  – радіус і висота екрана; 1, 2 і 3 – області всередині екрана. Области всередині і зовні труби (1 і 3) неферромагнітні ( $\mu = \mu_0$ ) з питомою електричною провідністю відповідно  $\gamma_1$  і  $\gamma_3$ .

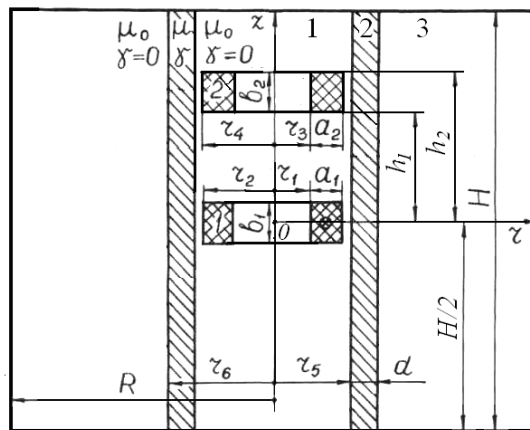


Рис. 1. Розрахункова модель первинного вихрострумове екранованого перетворювача трансформаторного і параметричного типів всередині контрольованої труби

Із [7] векторний потенціал магнітного поля у циліндричній системі координат  $r$ ,  $\alpha$  і  $z$  в області 1 у випадку надпровідного екрана

$$\tilde{A}_1 = \mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_{i1} b_{k01}}{n_i^2 + m_k^2} J_1(n_i r) \cos m_k z + \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} I_1(p_1 r) \cos m_k z, \quad (1)$$

де  $\tilde{\delta}_0 = \tilde{\delta}_{01}$  – зображення за Лапласом густини струму в обмотці збудження при  $r_1 \leq r \leq r_2$  і  $-b_1/2 \leq z \leq b_1/2$ , а в іншій частині першої області  $\tilde{\delta}_0 = 0$ ;  $\mu_0$  – магнітна стала;

$m_k = (2k-1)\pi/H$ ;  $b_{k01} = \frac{4}{H} \int_0^{b_1/2} \cos m_k z dz = \frac{4}{m_k H} \sin \frac{m_k b_1}{2}$  – 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  $(-H/2, H/2)$ ;  $I_1$  і  $K_1$  – циліндричні модифіковані функції Бесселя першого порядку першого і другого роду;  $p_1^2 = m_k^2 + r\gamma_1\mu_0$ ;  $p_2^2 = m_k^2 + r\gamma\mu$ ;  $p_3^2 = m_k^2 + r\gamma_3\mu_0$ ;  $J_1$  – функція Бесселя першого порядку першого роду;  $n_i = \lambda_i/R$ ;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots$  – корені рівняння  $J_1(\lambda) = 0$ ;  $a_{i1}$  – коефіцієнт ряду Фур'є-Бесселя функції  $f_1(r)$ , розкладеної у проміжку  $(0, R)$ ; при  $r_1 \leq r \leq r_2$   $f_1(r) = 1$ , а при  $0 \leq r \leq r_1$  і  $r_2 \leq r \leq R$   $f_1(r) = 0$ ;

$a_{i1} = \int_0^R f_1(r) J_1(n_i r) r dr / \|J_1\|^2 = \frac{2Y_1}{R^2 J_0^2(\lambda_i)}$ ;  $J_0$  – функція Бесселя першого роду нульового

порядку;

$$Y_1 = \int_0^R f_1(r) J_1(n_i r) r dr = \int_{r_1}^{r_2} f_1(r) J_1(n_i r) r dr = \int_{r_1}^{r_2} J_1(n_i r) r dr =$$

$$= \frac{1}{n_i} \left\{ r_1 J_0(n_i r_1) - r_2 J_0(n_i r_2) + \frac{2}{n_i} [J_1(n_i r_2) - J_1(n_i r_1) + J_3(n_i r_2) - J_3(n_i r_1) + J_5(n_i r_2) - J_5(n_i r_1) + \dots] \right\} -$$

ряд, який швидко сходиться;  $\|J_1\|^2 = \frac{R^2}{2} [J_1'(\lambda_i)]^2 = \frac{R^2}{2} J_0^2(\lambda_i)$  – квадрат норми.

$$C_{11} = \frac{\mu N_1 P_1 I_1(p_2 r_5) + \mu N_2 P_1 K_1(p_2 r_5) - P_2 D_1}{P_2 I_1(p_1 r_5)}; D_1 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\mu_0 Y_1 b_{k01} J_1(n_i r_5)}{R^2 J_0^2(\lambda_i) (n_i^2 + m_k^2)}$$

$$N_1 = \mu_0 p_2 M_1 K_0(p_2 r_6) + \mu p_3 M_2 K_1(p_2 r_6); \quad N_2 = \mu_0 p_2 M_1 I_0(p_2 r_6) - \mu p_3 M_2 I_1(p_2 r_6)$$

$$M_1 = I_1(p_3 r_6) - I_1(p_3 R) K_1(p_3 r_6) / K_1(p_3 R); \quad M_2 = I_0(p_3 r_6) + I_1(p_3 R) K_0(p_3 r_6) / K_1(p_3 R);$$

$$P_1 = D_2 I_1(p_1 r_5) - p_1 D_1 I_0(p_1 r_5);$$

$$P_2 = \mu_0 p_2 I_1(p_1 r_5) [N_1 I_0(p_2 r_5) - N_2 K_0(p_2 r_5)] - \mu p_1 I_0(p_1 r_5) [N_1 I_1(p_2 r_5) + N_2 K_1(p_2 r_5)]$$

Тоді складові магнітної індукції в першій області визначаються виразами:

радіальна

$$B_{r1} = -\frac{\partial A_1}{\partial z} = \mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{m_k a_{i1} b_{k01}}{n_i^2 + m_k^2} J_1(n_i r) \sin m_k z + \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} m_k C_{11} I_1(p_1 r) \sin m_k z \quad (2)$$

і осьова

$$B_{z1} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r A_1)}{\partial r} = \mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_{i1} b_{k01}}{n_i^2 + m_k^2} n_i J_0(n_i r) \cos m_k z + \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} p_1 I_0(p_1 r) \cos m_k z. \quad (3)$$

У виразах (1) (2) і (3) перші складові є основними (за відсутності об'єкта контролю – труби), а другі складові внесені об'єктом контролю.

За отриманими аналітичними виразами проведено розрахунки у програмному середовищі MathCAD і наведено на рис. 2–5 графіки розподілу визначених радіальної  $B_{Br}$  і осьової  $B_{Bz}$ , внесених об'єктом контролю, і сумарних  $B_r$  (радіальної) і  $B_z$  (осьової) складових магнітної індукції на внутрішній поверхні труби у початковий момент часу і за усталеного режиму під час збудження перетворювача імпульсами прямокутної форми з одиничною густиною струму для таких електромагнітних властивостей окремих областей і геометричних розмірів (у м):  $\gamma_1 = \gamma_3 = 0$ ;  $\gamma_2 = 10$  МС/м;  $\mu = 50 \mu_0$ , де  $\mu_0$  – магнітна стала;  $R = H = 0,5$ ;  $a_1 = b_1 = 0,025$ ;  $r_1 = 0,075$ ;  $r_2 = 0,1$ ;  $r_5 = 0,105$ ;  $r_6 = 0,125$ .

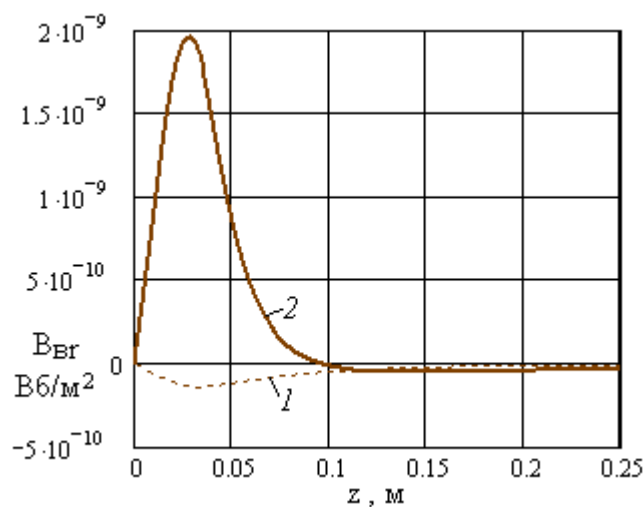


Рис. 2. Внесена радіальна складова магнітної індукції на внутрішній поверхні труби: 1 – у початковий момент часу; 2 – за усталеного режиму

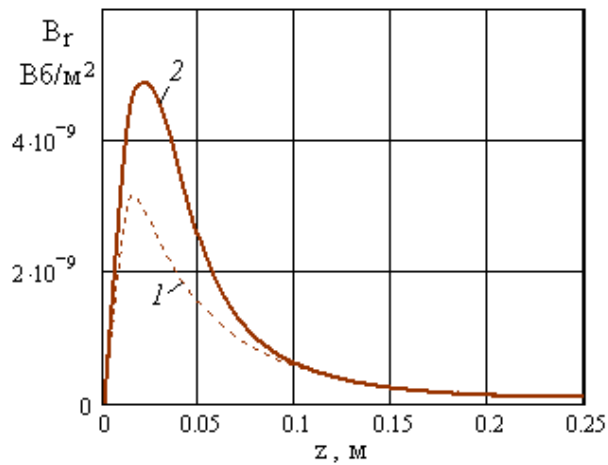


Рис. 3. Сумарна радіальна складова магнітної індукції на внутрішній поверхні труби:  
 1 – у початковий момент часу; 2 – за усталеного режиму

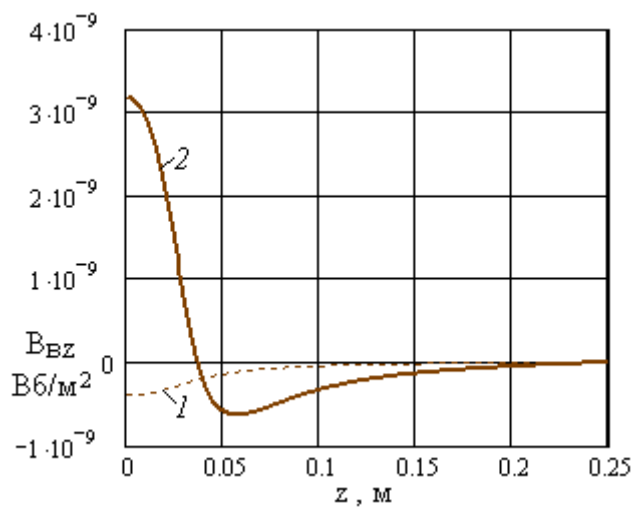


Рис. 4. Внесена осьова складова магнітної індукції на внутрішній поверхні труби:  
 1 – у початковий момент часу; 2 – за усталеного режиму

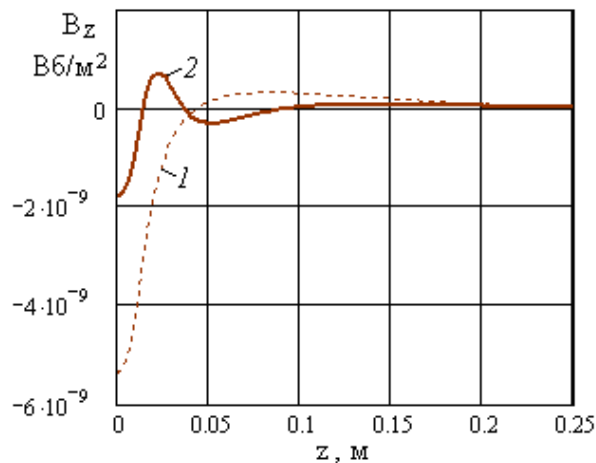


Рис. 5. Сумарна осьова складова магнітної індукції на внутрішній поверхні труби:  
 1 – у початковий момент часу; 2 – за усталеного режиму

Із рис. 2–5 видно, що найбільшу інформативність про об'єкт контролю від первинного перетворювача трансформаторного типу маємо у випадку, коли вимірна обмотка примикає до обмотки збудження, бо тоді радіальна складова магнітної індукції набуває найбільшого значення і,

особливо, за усталеного режиму діагностування. Тоді складові магнітної індукції набувають найбільшого значення в межах обмотки збудження і швидко спадають із віддаленням від неї.

### Висновки

Отримано вирази для перетворених за Лапласом радіальної і осьової складових магнітної індукції, створеної струмом довільної форми в кільцевій обмотці збудження прямокутного поперечного перерізу первинного внутрішнього прохідного вихрострумове перетворювача параметричного чи трансформаторного типів. Такий первинний перетворювач доцільно використовувати для діагностування технічного стану внутрішньої поверхні трубопроводів. Отримані результати пропонуються використати для проектування первинних вихрострумів перетворювачів з метою збільшення їх чутливостей до параметрів і дефектів об'єкта контролю.

1. Muzhitsky V. F. *Computerized Eddy Current Flaw Detector VD-89NM with Higher Reliability of Detection and Danger Level estimation of Stress-corrosion cracks when Inspecting Gas Pipeline under Stress-Corrosion* / V. F. Muzhitsky, V. A. Karabchewski // *Pipeline & Gas Journal*. – 2002. – Vol. 2. – P. 35–44. 2. *Pipeline Inspection Technologies Demonstration Report*. – Gas Research Institute. – 2004. – 98 p. 3. Albert Teisma. *Technical Assessment Report Technology Assessment for Delivery Reliability for Natural Gas*. – Gas Technology Institute. – 2004. – 56 p. 4. *Remote Field Eddy Current Defect Interaction, GRI Final Report GRI-95/0506*. December 1995. Atherton, D. L., Clapham, L., Czura, W., Mergelas, B. J., Smith, S., Winslow, J., Zhang, Y. – Gas Research Institute. – 1995. – 125p. 5. *Experience with the Remote Field Eddy Current Technique* / Schmidt T. R., Atherton D. L., Sullivan S. // *Proc. of 3rd Nat. Sem. on Nondestructive Evaluation of Ferromagnetic Materials, Houston, March 23–25th, 1988*. – 1988. – P. 89–97. 6. *Delivery Reliability for Natural Gas – Inspection Technologies. Technical Semiannual Progress Report DE-FC26-04NT42266*. – Gas Technology Institute. – 2005. – 215 p. 7. Яцун М. А., Яцун А.М. Векторний потенціал магнітного поля прохідного кільцевого вихрострумове первинного перетворювача параметричного і трансформаторного типів у провідній трубі // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Електроенергетичні та електромеханічні системи»*. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. – № 763. – С. 120–126.