

**ВЕКТОРНИЙ ПОТЕНЦІАЛ І СКЛАДОВІ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ
МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРОХІДНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА У ПРОВІДНІЙ ТРУБІ**

М. А. Яцун, А. М. Яцун

Національний університет “Львівська політехніка”;

Львівський національний аграрний університет

E-mail: yatsun@imp.lviv.ua

Визначено перетворений за Лапласом векторний потенціал магнітного поля, радіальну і осьову складові магнітної індукції для двох зустрічно увімкнених кільцевих циліндричних котушок прямокутного поперечного перерізу зі струмом довільної форми, які використовують як обмотку збудження первинного прохідного внутрішнього перетворювача для локалізації і кращої однорідності магнітного поля під час діагностування технічного стану внутрішньої поверхні трубопроводів.

Ключові слова: *векторний потенціал, радіальна і осьова складові магнітної індукції, прохідний внутрішній вихрострумний перетворювач, локалізація і однорідність магнітного поля, діагностування трубопроводів.*

**VECTOR POTENTIAL AND COMPONENTS OF THE MAGNETIC FIELD
INDUCTION OF TRANSMISSION EDDY CURRENT TRANSDUCER
IN THE FEEDING PIPE**

M. A. Yatsun, A. M. Yatsun

National University "Lviv Polytechnic"

Lviv National Agrarian University

Pipe technical diagnostics of main pipelines provides establishment of the actual pipe wall thickness, detection of defects, such as a discontinuity and the determination of the profile of its surface. When diagnosing the technical state of pipelines, intellectual pistons, developed on the basis of eddy current, magnetic and acoustic (ultrasonic) methods of control are used. The advantages of eddy current inspection method are no need of contact, absence of residual magnetic effects and the ability to detect surface cracks with a small opening and defects of the delamination of the pipeline metal. Vector potential of the magnetic field, transformed by Laplace, the radial and axial components of the magnetic induction of the primary internal eddy current probe of transmission type with an excitation winding consisting of two counter enabled shielded circular cylindrical coils of rectangular cross-section with a current of arbitrary shape, which include a measurable winding and located inside the tube, are determined. According to the obtained analytical expressions the graphs of the axial distribution of certain radial and axial components, introduced by the object of control and the total component of the magnetic induction on the inner surface of the pipe upon excitation of the transducer with the pulses of rectangular shape with a unit current density, are calculated and presented. Such an arrangement of the excitation winding is recommended to be used for localization and better homogeneity of the magnetic field when diagnosing of the technical condition of the internal surface of pipelines. The obtained results should be used for diagnosing the technical state of the internal surface of the pipelines to determine the informative value of the primary measuring circle with the considered primary microprobe converter and their sensitivities to the parameters and defects of the object of control for the purpose of multi-parameter information resolution.

Keywords: *vectorial potential, radial and axial constituents of magnetic induction, indoor internal eddy current transformer, localization and homogeneity of the magnetic field, diagnostics of pipelines.*

Аналіз проблеми. Внутрішньотрубна технічна діагностика стану магістральних трубопроводів (газопроводів) передбачає встановлення фактичної тов-

щини стінки трубопроводу, виявлення суцільності і визначення профілю його поверхні. Для цього використовують інтелектуальні поршні, розроблені на основі вихрострумowego, магнітного і акустичного (ультразвукового) методів контролю.

Перевагами вихрострумowego методу є безконтактність, відсутність залишкових магнітних ефектів і можливість виявляти поверхневі тріщини з малим розкриттям та дефекти розшарування металу трубопроводу. Тут первинний прохідний перетворювач зазвичай має форму циліндричної котушки прямокутного поперечного перерізу і орієнтується (розташований) співвісно всередині контрольованої труби. Тому актуально розраховувати магнітне поле таких параметричного і трансформаторного перетворювачів, щоб забезпечити кращу локалізацію і рівномірність розподілу магнітної індукції у зоні контролю. Розрахункова модель внутрішнього прохідного перетворювача подана на рис. 1, в якій вимірна обмотка розташована між двома котушками обмотки збудження.

Під час діагностування технічного стану внутрішньої поверхні трубопроводів для локалізації і кращої однорідності магнітного поля доцільно, щоб обмотка збудження первинного прохідного перетворювача складалася з двох зустрічно увімкнених кільцевих циліндричних котушок прямокутного поперечного перерізу зі струмом довільної форми, які охоплюють вимірну обмотку.

Аналіз останніх досліджень. Відомий метод [1, 2], коли магнітне поле збуджувальної котушки на відстані двох та більше діаметрів труби реєструють сенсорні котушки. Будь-які дефекти біля них впливатимуть на електромагнітні коливання, що проникають у стінку трубопроводу. Точність методу така ж, як методу вимірювання магнітного потоку (радіальної складової магнітної індукції і її розподілу вздовж осі труби). Визначено [1] векторний потенціал магнітного поля прохідного кільцевого вихрострумowego первинного перетворювача параметричного і трансформаторного типів у провідній трубі для однієї котушки обмотки збудження.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 прийняли такі позначення: a_1 і b_1 – розміри (ширина і висота) поперечного перерізу кожної з обмоток збудження (1); r_1 і r_2 – внутрішній і зовнішній її радіуси; a_2 і b_2 – розміри (ширина і висота) поперечного перерізу вимірної обмотки (2) для трансформаторного перетворювача; r_3 і r_4 – внутрішній і зовнішній радіуси вимірної обмотки; $|h_1|$ і $|h_2|$ – ординати обмоток збудження; r_5 , r_6 і d – внутрішній і зовнішній радіуси, а також товщина контрольованої труби; μ і γ – абсолютна магнітна проникність і питома електрична провідність труби; R і H – радіус і висота екрана (досліджуваного простору), який охоплює об'єкт контролю; $I-3$ – області всередині екрана. Вважаємо, що області всередині і зовні труби (1 і 3) неферомагнітні ($\mu = \mu_0$) і мають питому електричну провідність відповідно γ_1 і γ_3 . Струм і густина струму в обмотках збудження напрямлені протилежно.

Внаслідок осової симетрії задачі векторний потенціал \vec{A} має тільки одну азимутальну складову і від кута α не залежить, тобто його зображення за Лапласом $\tilde{A} = \tilde{A}_\alpha(r, z)$. Тому надалі для спрощення виразів індекси “ α ” пропускатимемо. Тоді перетворений за Лапласом векторний потенціал магнітного поля у циліндричній системі координат r , α і z для всіх областей дослідження (1–3 на рис. 1) визначають вирази:

для області 1 (всередині труби з обмотками)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{A}_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{A}_1}{\partial z^2} - \left(p\gamma_1 \mu_0 + \frac{1}{r^2} \right) \tilde{A}_1 = -\mu_0 \tilde{\delta}_0; \quad (1)$$

для області 2 (труби – об'єкта контролю)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{A}_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{A}_2}{\partial z^2} - \left(p\gamma\mu + \frac{1}{r^2} \right) \tilde{A}_2 = 0; \quad (2)$$

для області 3 (зовні труби)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{A}_3}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{A}_3}{\partial z^2} - \left(p\gamma_3\mu_0 + \frac{1}{r^2} \right) \tilde{A}_3 = 0, \quad (3)$$

де $\tilde{\delta}_0 = \tilde{\delta}_{01}$ – зображення за Лапласом густини струму в обмотках збудження дача, якщо $r_1 \leq r \leq r_2$ і $h_1 \leq |z| \leq h_2$, а в іншій частині першої області $\tilde{\delta}_0 = 0$; μ_0 – магнітна стала.

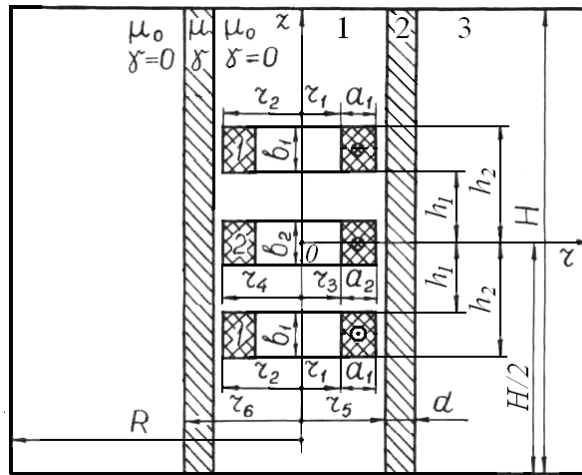


Рис. 1. Розрахункова модель вихрострумове первинного перетворювача параметричного і трансформаторного типів всередині контрольованої труби.

За надпровідного екрана (для спрощення розв'язку) нормальну складову магнітної індукції на його поверхні вважаємо рівною нулю, тобто для двох зустрічно увімкнених котушок обмотки збудження крайові умови виражають співвідношення

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_1)}{\partial r} \right)_{z=-H/2} &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_2)}{\partial r} \right)_{z=-H/2} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_3)}{\partial r} \right)_{z=-H/2} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_1)}{\partial r} \right)_{z=H/2} = \\ &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_2)}{\partial r} \right)_{z=H/2} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_3)}{\partial r} \right)_{z=H/2} = - \left(\frac{\partial\tilde{A}_3}{\partial z} \right)_{r=R} = 0. \end{aligned}$$

Це означає, що на поверхні екрана векторний потенціал

$$\begin{aligned} (\tilde{A}_1)_{z=-H/2} &= (\tilde{A}_2)_{z=-H/2} = (\tilde{A}_3)_{z=-H/2} = \\ &= (\tilde{A}_1)_{z=H/2} = (\tilde{A}_2)_{z=H/2} = (\tilde{A}_3)_{z=H/2} = (\tilde{A}_3)_{r=R} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Крім цього, у досліджуваному просторі ($0 \leq r \leq R$, $-H/2 \leq z \leq H/2$) він повинен бути обмеженим.

Якщо $z = \pm H/2$, то крайові умови (4) виконуються за розкладу шуканих розв'язків рівнянь (1)–(3) і густини струму в котушках обмотки збудження I в синусний ряд Фур'є по координаті z , тобто

$$\tilde{A} = \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin m_k z; \quad (5)$$

$$\tilde{\delta}_0 = \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} b_{k01} \sin m_k z, \quad (6)$$

де \tilde{A} – перетворений за Лапласом векторний потенціал магнітного поля в будь-якій області; C_k – коефіцієнти, які визначають за розкриття граничних і крайових умов; $m_k = 2k\pi/H$ і $b_{k01} = \frac{4}{H} \int_{h_1}^{h_2} \sin m_k z dz = \frac{8}{m_k H} \sin m_k \frac{b_1}{2} \sin m_k \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right)$ – коефіцієнт ряду Фур'є розкладеної у проміжку $-H/2 \leq z \leq H/2$ функції $f_2(z) = 1$, якщо $h_1 \leq z \leq h_2$, і $f_2(z) = -1$, якщо $-h_2 \leq z \leq -h_1$, а в інших частинах області I (рис.1) вона рівна нулю.

З урахуванням (5) диференціальні рівняння (1)–(3) для k -ої гармоніки набувають вигляду

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{A}_{1k}}{\partial r} \right) - \left(m_k^2 + p\gamma_1 \mu_0 + \frac{1}{r^2} \right) \tilde{A}_{1k} &= -\mu_0 b_{k01}; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{A}_{2k}}{\partial r} \right) - \left(m_k^2 + p\gamma \mu + \frac{1}{r^2} \right) \tilde{A}_{2k} &= 0; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{A}_{3k}}{\partial r} \right) - \left(m_k^2 + p\gamma_3 \mu_0 + \frac{1}{r^2} \right) \tilde{A}_{3k} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Тоді загальні розв'язки рівнянь (5) будуть:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 &= \tilde{A}_0 + \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} [C_{11} I_1(p_1 r) + C_{12} K_1(p_1 r)] \sin m_k z; \\ \tilde{A}_2 &= \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} [C_{21} I_1(p_2 r) + C_{22} K_1(p_2 r)] \sin m_k z; \\ \tilde{A}_3 &= \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} [C_{31} I_1(p_3 r) + C_{32} K_1(p_3 r)] \sin m_k z, \end{aligned} \quad (8)$$

де I_1 і K_1 – модифіковані циліндричні функції Бесселя першого порядку першого і другого роду; $p_1^2 = m_k^2 + p\gamma_1 \mu_0$; $p_2^2 = m_k^2 + p\gamma \mu$; $p_3^2 = m_k^2 + p\gamma_3 \mu_0$; \tilde{A}_0 – перетворений векторний потенціал магнітного поля за відсутності провідної феромагнітної труби (об'єкта контролю) в неелектропровідному просторі, обмеженому екраном. Його приймаємо як частковий розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (1).

Для визначення потенціалу \tilde{A}_0 з дотриманням крайових умов (4) розкладемо шуканий розв'язок і густину струму в обмотці збудження у подвійний ряд: ряд Фур'є–Бесселя по координаті r і синусний ряд Фур'є по координаті z [3], тобто

$$\tilde{A}_0 = \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} C_{0ik} J_1(n_i r) \sin(m_k z); \quad (9)$$

$$\tilde{\delta}_0 = \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} a_{i1} b_{k01} J_1(n_i r) \sin(m_k z), \quad (10)$$

де J_1 – функція Бесселя першого роду першого порядку; $n_i = \lambda_i/R$; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots$ – корені рівняння $J_1(\lambda) = 0$; a_{i1} – коефіцієнт ряду Фур'є–Бесселя функції $f_1(r) = 1$, якщо $r_1 \leq r \leq r_2$, і $f_1(r) = 0$, якщо $0 \leq r \leq r_1$ і $r_2 \leq r \leq R$, розкладеної у проміжку $(0, R)$. Тоді

$$a_{i1} = \int_0^R f_1(r) J_1(n_i r) r dr / \|J_1\|^2 = \frac{2Y_1}{R^2 J_0^2(\lambda_i)}, \quad (11)$$

де J_0 – функція Бесселя першого роду нульового порядку;

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

$$= \int_{r_1}^{r_2} J_1(n_i r) r dr = \frac{1}{n_i} \left\{ r_1 J_0(n_i r_1) - r_2 J_0(n_i r_2) + \right.$$

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

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

Тоді

$$\tilde{A}_0 = \mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_{i1} b_{k01}}{n_i^2 + m_k^2} J_1(n_i r) \sin m_k z, \quad (12)$$

або, якщо $|z| \leq h_1$,

$$\tilde{A}_0 = 2\mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} a_{i1} J_1(n_i r) \frac{\text{sh}(n_i z)}{n_i^2 \text{sh}(n_i H/2)} [\text{sh}n_i(b_1/2) \text{sh}n_i(H/2 - h_1/2 - h_2/2)],$$

якщо $h_1 \leq z \leq h_2$,

$$\tilde{A}_0 = \mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} a_{i1} J_1(n_i r) \frac{1}{n_i^2 \text{sh}(n_i H/2)} \left[\frac{\text{sh}n_i(H/2) - \text{sh}n_i h_1 \text{sh}n_i(H/2 - z)}{-\text{sh}n_i z \text{ch}n_i(H/2 - h_2)} \right]; \quad (13)$$

якщо $z \geq h_2$,

$$\tilde{A}_0 = 2\mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} a_{i1} J_1(n_i r) \frac{\text{sh}n_i(H/2 - z)}{n_i^2 \text{sh}(n_i H/2)} [\text{sh}n_i(b_1/2) \text{sh}n_i(h_1/2 + h_2/2)].$$

Коли $H \rightarrow \infty$, одержимо:

при $|z| \leq h_1$

$$\tilde{A}_0 = 2\mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} a_{i1} J_1(n_i r) \frac{\text{sh}(n_i z)}{n_i^2} \text{sh}n_i(b_1/2) e^{-n_i(h_1+h_2)/2};$$

$$B_{r0} = -\frac{\partial A_0}{\partial z} = -2\mu_0\tilde{\delta}_{01}\sum_{i=1}^{\infty}a_{i1}J_1(n_i r)\frac{\operatorname{ch}(n_i z)}{n_i}\operatorname{sh}n_i(b_1/2)e^{-n_i(h_1+h_2)/2};$$

$$B_{z0} = \frac{1}{r}\frac{\partial(rA_0)}{\partial r} = 2\mu_0\tilde{\delta}_{01}\sum_{i=1}^{\infty}a_{i1}J_0(n_i r)\frac{\operatorname{sh}(n_i z)}{n_i}\operatorname{sh}n_i(b_1/2)e^{-n_i(h_1+h_2)/2};$$

при $h_1 \leq z \leq h_2$

$$\tilde{A}_0 = \mu_0\tilde{\delta}_{01}\sum_{i=1}^{\infty}a_{i1}J_1(n_i r)\frac{1}{n_i^2}\left[1 - \operatorname{chn}_i h_1 e^{-n_i z} - \operatorname{sh}n_i z e^{-n_i h_2}\right];$$

$$B_{r0} = -\frac{\partial A_0}{\partial z} = -\mu_0\tilde{\delta}_{01}\sum_{i=1}^{\infty}a_{i1}J_1(n_i r)\frac{\operatorname{chn}_i h_1 e^{-n_i z} - \operatorname{chn}_i z e^{-n_i h_2}}{n_i};$$

$$B_{z0} = \frac{1}{r}\frac{\partial(rA_0)}{\partial r} = \mu_0\tilde{\delta}_{01}\sum_{i=1}^{\infty}a_{i1}J_0(n_i r)\frac{1}{n_i}\left[1 - \operatorname{chn}_i h_1 e^{-n_i z} - \operatorname{sh}n_i z e^{-n_i h_2}\right];$$

при $z \geq h_2$

$$\tilde{A}_0 = 2\mu_0\tilde{\delta}_{01}\sum_{i=1}^{\infty}a_{i1}J_1(n_i r)\frac{e^{-n_i z}}{n_i^2}\left[\operatorname{sh}n_i(b_1/2)\operatorname{sh}n_i(h_1/2 + h_2/2)\right];$$

$$B_{r0} = -\frac{\partial A_0}{\partial z} = 2\mu_0\tilde{\delta}_{01}\sum_{i=1}^{\infty}a_{i1}J_1(n_i r)\frac{e^{-n_i z}}{n_i}\left[\operatorname{sh}n_i(b_1/2)\operatorname{sh}n_i(h_1/2 + h_2/2)\right];$$

$$B_{z0} = \frac{1}{r}\frac{\partial(rA_0)}{\partial r} = 2\mu_0\tilde{\delta}_{01}\sum_{i=1}^{\infty}a_{i1}J_0(n_i r)\frac{e^{-n_i z}}{n_i}\left[\operatorname{sh}n_i(b_1/2)\operatorname{sh}n_i(h_1/2 + h_2/2)\right].$$

Остаточно загальні розв'язки (8) набувають вигляду

$$\begin{aligned}\tilde{A}_1 = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_{1\sigma} &= \mu_0\tilde{\delta}_{01}\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{a_{i1}b_{k01}}{n_i^2 + m_k^2}J_1(n_i r)\sin m_k z + \\ &+ \tilde{\delta}_{01}\sum_{k=1}^{\infty}\left[C_{11}I_1(p_1 r) + C_{12}K_1(p_1 r)\right]\sin m_k z; \\ \tilde{A}_2 &= \tilde{\delta}_{01}\sum_{k=1}^{\infty}\left[C_{21}I_1(p_2 r) + C_{22}K_1(p_2 r)\right]\sin m_k z; \\ \tilde{A}_3 &= \tilde{\delta}_{01}\sum_{k=1}^{\infty}\left[C_{31}I_1(p_3 r) + C_{32}K_1(p_3 r)\right]\sin m_k z.\end{aligned}\tag{14}$$

Граничні умови між областями виражають співвідношення на основі рівності нормальних складових векторів магнітної індукції, тобто самих векторних потенціалів, і дотичних складових векторів напруженості магнітного поля. Тоді коефіцієнти C з різними індексами у розв'язках (14) визначають із неврахованих ще крайової і граничних умов: якщо $r = 0$, $|\tilde{A}_1| < \infty$ – умова обмеженості векторного потенціалу на осі z , звідки безпосередньо випливає, що $C_{12} = 0$; якщо $r = R$, $\tilde{A}_3 = 0$;

$$\text{якщо } r = r_5, \left(\tilde{A}_1\right)_{r=r_5} = \left(\tilde{A}_2\right)_{r=r_5} \quad \text{і} \quad \frac{1}{\mu_0 r_5} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_1)}{\partial r}\right)_{r=r_5} = \frac{1}{\mu r_5} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_2)}{\partial r}\right)_{r=r_5};$$

$$\text{якщо } r = r_6, \left(\tilde{A}_2\right)_{r=r_6} = \left(\tilde{A}_3\right)_{r=r_6} \quad \text{і} \quad \frac{1}{\mu r_6} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_2)}{\partial r}\right)_{r=r_6} = \frac{1}{\mu_0 r_6} \left(\frac{\partial(r\tilde{A}_3)}{\partial r}\right)_{r=r_6}. \quad (15)$$

Після розкриття граничних і крайових умов (15) для визначення невідомих сталих коефіцієнтів C з різними індексами одержимо таку систему із п'яти рівнянь:

$$\begin{aligned} D_1 + C_{11} I_1(p_1 r_5) &= C_{21} I_1(p_2 r_5) + C_{22} K_1(p_2 r_5); \\ \mu D_2 + \mu p_1 C_{11} I_0(p_1 r_5) &= \mu_0 p_2 C_{21} I_0(p_2 r_5) - \mu_0 p_2 C_{22} K_0(p_2 r_5); \\ C_{21} I_1(p_2 r_6) + C_{22} K_1(p_2 r_6) &= C_{31} I_1(p_3 r_6) + C_{32} K_1(p_3 r_6); \\ \mu_0 p_2 C_{21} I_0(p_2 r_6) - \mu_0 p_2 C_{22} K_0(p_2 r_6) &= \mu p_3 C_{31} I_0(p_3 r_6) - \mu p_3 C_{32} K_0(p_3 r_6); \\ C_{31} I_1(p_3 R) + C_{32} K_1(p_3 R) &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{де } D_1 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\mu_0 Y_1 b_{k01} J_1(n_i r_5)}{R^2 J_0^2(\lambda_i) (n_i^2 + m_k^2)}; \quad D_2 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\mu_0 n_i Y_1 b_{k01} J_0(n_i r_5)}{R^2 J_0^2(\lambda_i) (n_i^2 + m_k^2)}; \quad I_0 \text{ і } K_0 - \text{модифіковані}$$

ні циліндричні функції Бесселя нульового порядку.

Далі для сталих коефіцієнтів маємо:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{\mu N_1 P_1 I_1(p_2 r_5) + \mu N_2 P_1 K_1(p_2 r_5) - P_2 D_1}{P_2 I_1(p_1 r_5)}; \quad C_{12} = 0; \quad C_{21} = \frac{\mu N_1 P_1}{P_2}; \\ C_{22} &= \frac{\mu N_2 P_1}{P_2}; \quad C_{31} = \frac{\mu P_1 K_1(p_3 R) [N_1 I_1(p_2 r_6) + N_2 K_1(p_2 r_6)]}{P_2 [I_1(p_3 r_6) K_1(p_3 R) - I_1(p_3 R) K_1(p_3 r_6)]}; \\ C_{32} &= -\frac{\mu P_1 I_1(p_3 R) [N_1 I_1(p_2 r_6) + N_2 K_1(p_2 r_6)]}{P_2 [I_1(p_3 r_6) K_1(p_3 R) - I_1(p_3 R) K_1(p_3 r_6)]}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad N_1 &= \mu_0 p_2 M_1 K_0(p_2 r_6) + \mu p_3 M_2 K_1(p_2 r_6); \\ N_2 &= \mu_0 p_2 M_1 I_0(p_2 r_6) - \mu p_3 M_2 I_1(p_2 r_6); \\ M_1 &= I_1(p_3 r_6) - I_1(p_3 R) K_1(p_3 r_6) / K_1(p_3 R); \\ M_2 &= I_0(p_3 r_6) + I_1(p_3 R) K_0(p_3 r_6) / K_1(p_3 R); \\ P_1 &= D_2 I_1(p_1 r_5) - p_1 D_1 I_0(p_1 r_5); \\ P_2 &= \mu_0 p_2 I_1(p_1 r_5) [N_1 I_0(p_2 r_5) - N_2 K_0(p_2 r_5)] - \\ &\quad - \mu p_1 I_0(p_1 r_5) [N_1 I_1(p_2 r_5) + N_2 K_1(p_2 r_5)]. \end{aligned}$$

Тоді для радіальної складової (по осі r) магнітної індукції отримаємо: для основної (за відсутності об'єкта контролю)

$$B_{r0} = -\frac{\partial A_0}{\partial z} = -\mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{m_k a_{i1} b_{k01}}{n_i^2 + m_k^2} J_1(n_i r) \cos m_k z;$$

для внесеної об'єктом контролю

$$B_{r1\theta} = -\frac{\partial A_{1\theta}}{\partial z} = -\tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} m_k C_{11} I_1(p_1 r) \cos m_k z$$

і сумарної

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

Для осової складової (по осі z) магнітної індукції дістанемо:
для основної (за відсутності об'єкта контролю)

$$B_{z0} = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_0)}{\partial r} = \mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_{i1} b_{k01}}{n_i^2 + m_k^2} n_i J_0(n_i r) \sin m_k z;$$

для внесеної об'єктом контролю

$$B_{z1\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_{1\theta})}{\partial r} = \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} p_1 I_0(p_1 r) \sin m_k z$$

і сумарної

$$B_{z1} = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_1)}{\partial r} = \mu_0 \tilde{\delta}_{01} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_{i1} b_{k01}}{n_i^2 + m_k^2} n_i J_0(n_i r) \sin m_k z + \tilde{\delta}_{01} \sum_{k=1}^{\infty} C_{11} p_1 I_0(p_1 r) \sin m_k z.$$

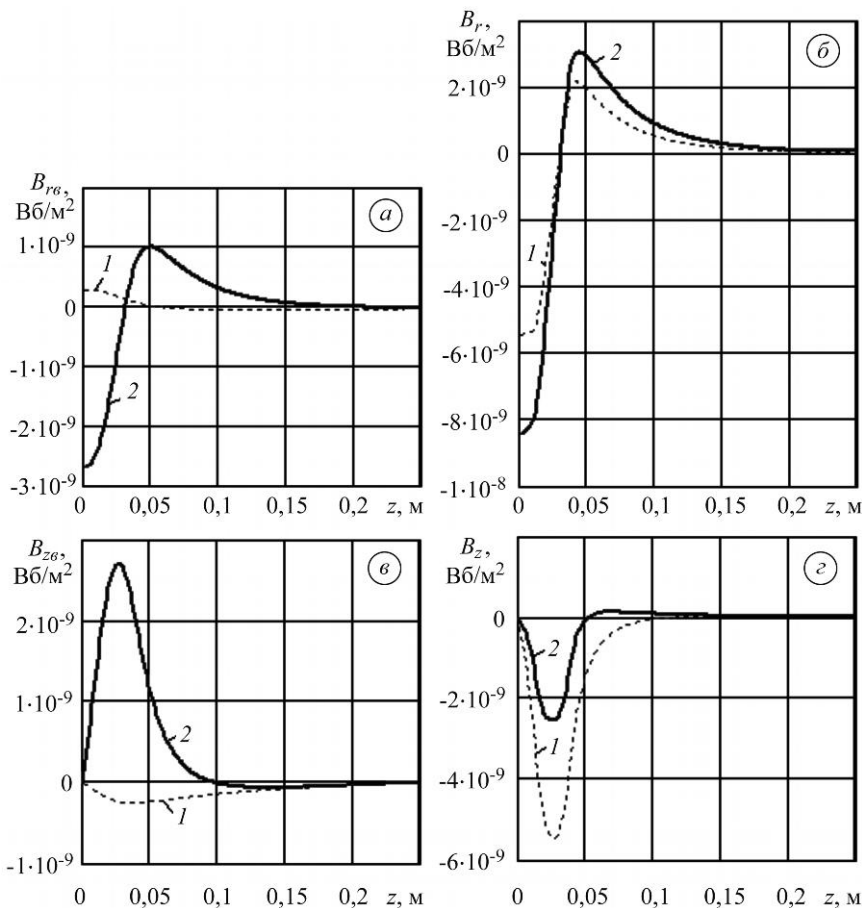


Рис. 2. Радіальна (а, б) і осьова (в, г) складові магнітної індукції на внутрішній поверхні труби ($r = r_s$) за двох зустрічно увімкнених обмоток збудження:
1 – у початковий момент часу; 2 – за усталеного режиму.

За отриманими аналітичними виразами виконано розрахунки у програмному середовищі MathCAD і побудовано (рис. 2) графіки осьового розподілу визначених радіальної і осьової внесених об'єктом контролю і сумарних 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 μ_0 – магнітна стала; $R = H = 0,5$; $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 0,025$; $h_1 = 0,0125$; $h_2 = 0,0375$; $r_1 = r_3 = 0,075$; $r_2 = r_4 = 0,1$; $r_5 = 0,105$; $r_6 = 0,125$.

Як бачимо, найбільшу інформативність про об'єкт контролю від первинного перетворювача трансформаторного типу маємо за двох зустрічно увімкнених обмоток збудження, бо тоді радіальна складова магнітної індукції набуває найбільше значення (на ділянці між обмотками і, особливо, за усталеного режиму діагностування). Вимірну обмотку первинного перетворювача доцільно розмістити саме тут. Тоді осьова складова магнітної індукції набуває найбільше значення в межах обмоток збудження і швидко падає з віддаленням від них. Таким чином, зустрічне увімкнення обмоток збудження забезпечує суттєво більшу локальність контролю, що особливо важливо під час оцінки технічного стану внутрішньої поверхні труб.

ВИСНОВКИ

Отримано вирази для перетвореного за Лапласом векторного потенціалу магнітного поля, радіальної і осьової складових магнітної індукції первинного внутрішнього вихрострумowego перетворювача прохідного типу з обмоткою збудження, яка складається з двох зустрічно увімкнених кільцевих циліндричних котушок прямокутного поперечного перерізу зі струмом заданої форми. Таку обмотку доцільно використовувати для локалізації і кращої однорідності магнітного поля під час діагностування технічного стану внутрішньої поверхні трубопроводів.

1. Яцун М. А., Яцун А. М. Векторний потенціал магнітного поля прохідного кільцевого вихрострумowego первинного перетворювача параметричного і трансформаторного типів у провідній трубі // Вісник НУ "ЛП". Сер. Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2013. – № 763. – С. 120–126.
2. Schmidt T. R., Atherton D. L., Sullivan S. Experience with the Remote Field Eddy Current Technique // Proc. of 3rd Nat. Sem. on Nondestructive Evaluation of Ferromagnetic Materials, Houston, March 23–25, 1988. – P. 89–97.
3. Remote Field Eddy Current Defect Interaction / D. L. Atherton, L. Clapham, W. Czura, B. J. Mergelas, S. Smith, J. Winslow, Y. Zhang // GRI Final Report GRI-95/0506. December 1995. – Gas Research Institute, 1995. – 125 p.

Одержано 01.10.2015