

БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ ГАЛЬВАНІЧНО З'ЄДНАНИХ ПАРАЛЕЛЬНИХ ПРОМИСЛОВИХ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ

А. В. ЯВОРСЬКИЙ, І. С. КІСІЛЬ

Запропоновано методику контролю стану ізоляційного покриття паралельних гальванічно зв'язаних нафтогазопроводів, які лежать на відстані, меншій за подвійну глибину залягання

A procedure is proposed for control of the condition of insulation coating in parallel galvanically coupled oil and gas pipelines, lying at a distance shorter than the double depth of the pipeline.

В даний час існує ряд методик безконтактного контролю стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів. Методики проведення контролю магістральних і промислових трубопроводів суттєво відрізняються між собою, оскільки в багатьох випадках промислові нафтогазопроводи гальванічно з'єднані і розміщуються на невеликій відстані один від одного (до 0,4 м) [1].

Найбільш перспективним безконтактним методом контролю стану ізоляційного покриття можна вважати електромагнітний метод, що базується на визначенні струму в стінках підземного нафтогазопроводу на різних його ділянках, в тому числі і із пошкодженою ізоляцією. Він оснований на вимірюванні напруженості магнітного поля на поверхні землі над контрольованим нафтогазопроводом.

Отримання достовірних даних під час проведення контролю таких трубопроводів електромагнітним методом досить складна задача, оскільки гальванічний контакт між ними приводить до того, що контрольований струм розповсюджується по паралельних трубопроводах і при невеликій відстані між ними в результаті інтерференційної взаємодії магнітних полів ускладнюється визначення положення осей контрольова-

них трубопроводів і отримання достовірних даних про величину струму в стінках цих трубопроводів.

В зоні контролю, крім цього, можуть бути потужні джерела промислових електромагнітних завад. Робота системи безконтактного контролю ізоляції трубопроводів (БКІТ) в умовах значних промислових електромагнітних завад описана в роботах [2, 3]. Однак уникнути впливу сторонніх комунікацій з використанням системи БКІТ не вдається у випадку наявності гальванічного контакту досліджуваного трубопроводу з іншими паралельними трубопроводами, які пролягають на невеликій відстані від нього (менше 2 м).

Характер напруженості магнітного поля при наявності двох гальванічно зв'язаних паралельних трубопроводів показано на рис. 1. Для прикладу, струми в трубопроводах 1 і 2 (I_1 , I_2) однакові. На рис. 1 зображено вплив відстані між трубопроводами на характер сумарної напруженості над ними. Якщо відстань між максимумами профілів напруженості H_1 і H_2 менша за деяке значення L_{\min} (при відповідних значеннях струмів I_1 і I_2), то тоді пошук максимуму напруженості H_1 і відповідно вихід на вісь трубопроводу 1 є проблематичним через появу сумарного магнітного поля з напруженістю H_c (рис. 1, б).

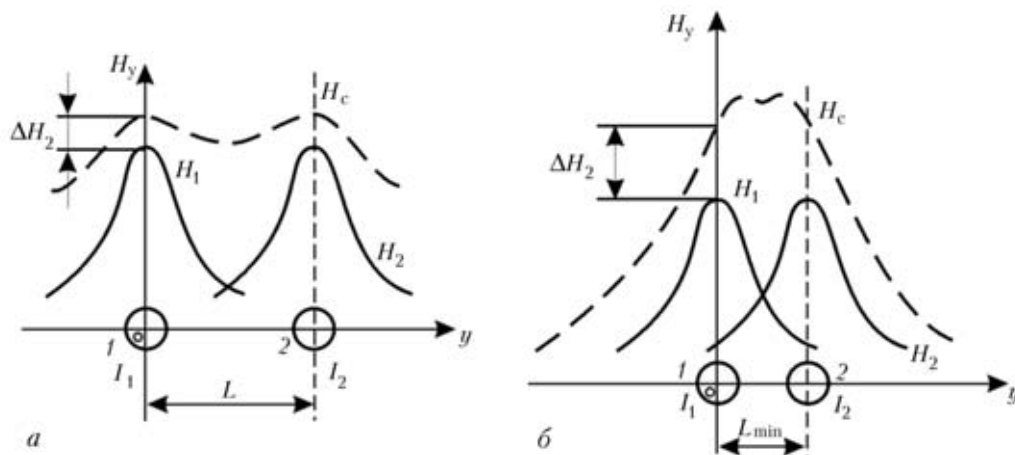


Рис. 1. Характер зміни напруженості магнітного поля над гальванічно з'єднаними паралельними трубопроводами

Похибку δ , зумовлену впливом сусіднього трубопроводу при безконтактному вимірюванні струму над досліджуваним трубопроводом, можна отримати за допомогою рівняння для паралельних циліндричних провідників [4]:

$$\delta = \frac{\Delta H_2}{H_{1\max}}, \quad (1)$$

де $H_{1\max}$ — максимальна напруженість магнітного поля в точці над віссю трубопроводу 1, викликана струмом I_1 ; ΔH_2 — напруженість магнітного поля в тій же точці над трубопроводом 1, викликана струмом I_2 .

Одна із методик безконтактного визначення струму в кожному з паралельних трубопроводів запропоновано в роботі [5]. Вона базується на використанні рівнянь, що описують профільні залежності модулів вертикальної H_z і горизонтальної H_y складових напруженості магнітного поля над двома паралельними підземними трубопроводами. Згідно роботи [5], достатньо проведення двох вимірювань відстаней між точками крайніх мінімумів вертикальної складової H_z магнітного поля, на основі яких можна здійснити розрахунок струмів в стінках трубопроводів, глибини їх залягання і відстані між ними. Для практичної реалізації задачі в цьому випадку потрібен тільки трасопошуковий пристрій. Але, незважаючи на свою простоту, таке рішення має ряд суттєвих недоліків, а саме: попередньо приймається, що струми в стінках трубопроводів рівні між собою (що рідко зустрічається на практиці внаслідок різного стану ізоляції, різної довжини і кількості додаткової арматури на кожному із трубопроводів). Вважається, що для реалізації методики

необхідно, щоб відстань між трубопроводами не була меншою за подвоєну глибину їх залягання.

Ця методика базується на використанні профільної залежності горизонтальної складової напруженості магнітного поля для двох трубопроводів [5]:

$$H_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{I_1 z_1}{z_1^2 + y_i^2} + \frac{I_2 z_2}{z_2^2 + (y_i - b)^2} \right), \quad (2)$$

де I_1, I_2 — струми в стінках трубопроводів 1 і 2; z_1, z_2 — глибини залягання відповідних трубопроводів; b — відстань між трубопроводами; y_i — абсциса профільної залежності (рис. 2).

Вираз (2) з достатньою для практики точністю описує залежність складової напруженості від параметрів (I_1, I_2, z_1, z_2, b) для частоти контролюваного сигналу, що не перевищує 1000 Гц [5, 6], при вимірюванні напруженості магнітного поля H_y в кожній точці з кроком $\Delta y = y_{i+1} - y_i$ над трубопроводами. Практичне використання залежності (2) ускладнюється тим, що без даних про положення одного із паралельних підземних трубопроводів неможливо встановити положення точки відліку, яка прив'язана до осі трубопроводу 1 (рис. 2).

Для усунення цього недоліку нами пропонується у вираз (2) ввести додатковий параметр d для компенсації невизначеності точки відліку, тобто:

$$H_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{I_1 z_1}{z_1^2 + (y_i + d)^2} + \frac{I_2 z_2}{z_2^2 + (y_i - b + d)^2} \right), \quad (3)$$

де параметр d — відстань між точкою відліку, з якої починається вимірювання профілю, і віссю трубопроводу 1, який лежить найближче до точки відліку (рис. 3).

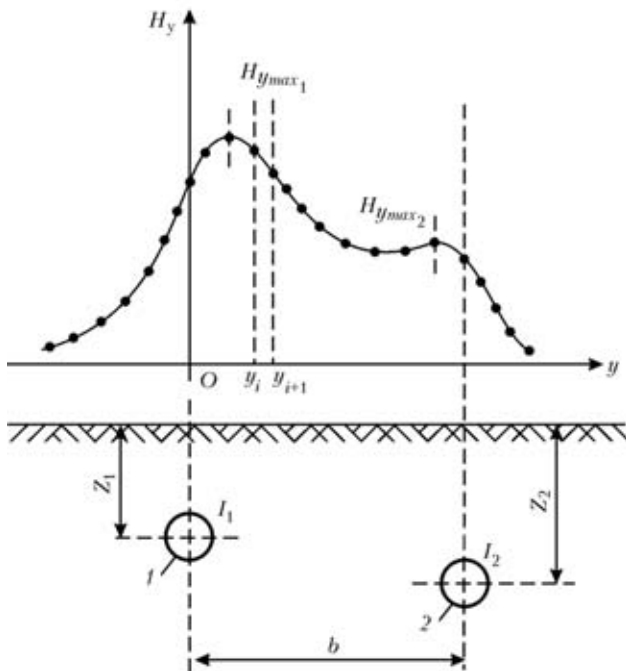


Рис. 2. Профільна залежність горизонтальної складової напруженості магнітного поля для двох паралельних підземних трубопроводів

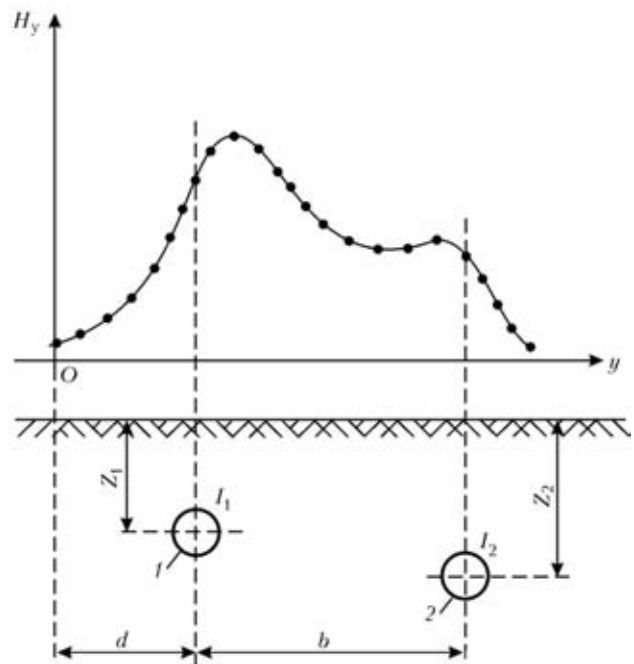


Рис. 3. Побудова профільної залежності горизонтальної складової магнітного поля для двох паралельних підземних трубопроводів з використанням зсуву d



Для визначення шуканих параметрів функції (3) $x = (I_1, I_2, z_1, z_2, b, d)$ можна використати методи мінімізації декількох функціоналів, таких, як середнього квадратичного відхилення, відносного відхилення, мінімуму максимального відхилення між теоретичними і експериментально отриманими значеннями. Теоретичні і експериментальні дослідження показали, що для даної задачі найбільш оптимальним є використання функціоналу метод середнього квадратичного відхилення, тобто:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (H_{y_i} - \tilde{H}_{y_i})^2, \quad (4)$$

де H_{y_i} — теоретичні значення напруженості магнітного поля по профілю; \tilde{H}_{y_i} — виміряні значення напруженості магнітного поля по профілю над досліджуваними трубопроводами.

Задача визначення параметрів в залежності (3) полягає в мінімізації функціоналу (4):

$$\sigma^2 \rightarrow \min_{I_1, I_2, z_1, z_2, b, d}. \quad (5)$$

Пряме використання методу мінімізації середнього квадратичного відхилення (5) може привести до отримання значень параметрів, які фізично не реалізуються (наприклад, перевищення величини струму в стінці трубопроводу або від'ємне значення заглиблення). Тому для визначення значень параметрів функції (3) потрібно вказати діапазон реальних значень шуканих параметрів. Для задачі визначення значень струмів в стінках двох гальванічно зв'язаних трубопроводів цей діапазон буде таким:

$$\begin{aligned} I_{\max} \geq I_1 \geq I_{\min}, \quad I_{\max} \geq I_2 \geq I_{\min}, \\ z_{\max} \geq z_1 \geq z_{\min}, \quad z_{\max} \geq z_2 \geq z_{\min}, \quad b_{\max} \geq b \geq b_{\min}. \end{aligned} \quad (6)$$

На параметр d обмеження не накладаються, оскільки він не впливає на формування магнітного поля над паралельними гальванічно зв'язаними трубопроводами. Обмеження (6) практично зводяться до такої системи рівнянь:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{v}, \quad (7)$$

де \mathbf{A} — матриця коефіцієнтів системи рівнянь; \mathbf{x} — вектор параметрів функції (3); \mathbf{v} — вектор граничних значень параметрів x ;

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{pmatrix} I_{\max} \\ -I_{\min} \\ I_{\max} \\ -I_{\min} \\ z_{\max} \\ -z_{\min} \\ z_{\max} \\ -z_{\min} \\ b_{\max} \\ -b_{\min} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Задачу мінімізації функціоналу (4) з обмеженнями (по струму, по глибині, по відстані) можна вирішити за допомогою методу множників Лагранжа [7]. Функція Лагранжа для задачі визначення параметрів функції (3) буде мати такий вигляд:

$$F(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{u}) = \sigma^2 + \sum_{i=1}^m \lambda_i [\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{v} + u_i^2], \quad (9)$$

де \mathbf{x} — вектор параметрів функції; $\boldsymbol{\lambda}$ — вектор множників Лагранжа; $i = 1, \dots, m$, де $m = 10$ — кількість обмежень; u_i — послаблююча змінна.

Мінімізація функції (9) зводиться до вирішення такої системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma^2}{\partial x_j} + \sum_i \lambda_i \frac{\partial (\mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_j - v_i)}{\partial x_j} = 0, \\ \mathbf{v}_{\min} + \mathbf{u}^2 = 0, \quad \mathbf{v}_{\max} + \mathbf{u}^2 = 0, \\ \lambda [\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{v}_{\min}] = 0, \quad \lambda [\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{v}_{\max}] = 0, \quad 2\lambda_i u_i = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

де $j = 1, \dots, n$; $n = 16$ — кількість параметрів; \mathbf{v}_{\min} — відноситься до мінімальних значень параметрів; \mathbf{v}_{\max} — відповідно до максимальних значень.

Значення параметрів функції (3) можна знайти шляхом вирішення системи рівнянь (10). Однак система рівнянь (10) досить складна (кількість рівнянь — 16). Нелінійність цих рівнянь практично не дозволяє аналітичне вирішення її, а потребує застосування чисельних методів, що вимагає досить потужних обчислювальних засобів.

Крім методу множників Лагранжа для знаходження параметрів функції (3) з обмеженнями (7) можна застосувати методи прямого пошуку мінімуму функціоналу (4). Найбільш придатними для даної задачі є метод градієнта (метод спуску) і метод комплексів Бокса.

Сутність методу градієнта полягає в послідовному пошуку точок в просторі параметрів функції, для якої шукається екстремум [7], а саме

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + a_k \cdot \mathbf{P}_k, \quad (11)$$

де \mathbf{P}_k — вектор, що визначає напрям спуску; a_k — величина кроку пошуку точок; k — номер ітерації, $k = 0, 1, 2$. При цьому точки \mathbf{x}_k визначаються так, щоб для них виконувалися всі задані обмеження.

Для пошуку параметрів функції Лагранжа (9) засновано метод градієнта

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + a_k F'(\mathbf{x}_k), \quad (12)$$

де $F'(\mathbf{x}_k)$ — градієнт функції $F(\mathbf{x})$ в точці \mathbf{x}_k ,

$$F'(\mathbf{x})_k = \left(\frac{\partial F(\mathbf{x})_k}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial F(\mathbf{x})_k}{\partial x_{16}} \right)^T. \quad (8)$$

У випадку, коли точка \mathbf{x}_k виходить за границю допустимої області, антиградієнт проектується на площину, які апроксимують ділянку границі поблизу точки \mathbf{x}_k . Після цього проводиться пошук точки \mathbf{x}_{k+1} такої, що $F(\mathbf{x}_{k+1}) < F(\mathbf{x}_k)$.

Загалом, метод градієнту складається з наступних операцій: 1) в точці \mathbf{x}_k визначається напрям спуску \mathbf{P}_k ; 2) знаходиться величина кроку a_k ; 3) визначається нове наближення параметрів функції (3).

Метод градієнту має високу точність, але повільну збіжність, що вимагає високої потужності обчислювальних засобів. Даний метод пошуку параметрів доцільно використовувати для точного визначення стану ізоляційного покриття паралельних трубопроводів при проведенні планово-регламентного контролю.

Метод комплексів Бокса — це різновид методу багатогранників, що деформуються [7]. Для пошуку екстремуму функції $\sigma^2(\mathbf{x})$ (4) в шестивимірному просторі параметрів функції \mathbf{x} (3) будуються багатогранники, які складаються з $n + 1 = 7$ вершин (точок в просторі параметрів). Відповідно координати багатогранника будуть такими:

$$x[j, k] = (x_1[j, k], \dots, x_6[j, k])^T, \quad (13)$$

де j — номер точки в комплексі, $j = 1, 2, \dots, 7$; k — номер ітерації, $k = 0, 1, 2$.

Алгоритм комплексного методу полягає в наступному. Визначається початкова точка $x[1, 0]$ в області допустимих значень параметрів функції (6). Далі потрібно вибрати шість точок, що відповідають обмеженням. Координати даних шести вершин визначаються наступним чином:

$$x_i[j, 0] = a_i + r_i(p_i - a_i), \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad j = 2, 3, \dots, 7, \quad (14)$$

де a_i — обмеження на мінімальні значення параметрів; p_i — обмеження на максимальні значення параметрів функції (3); r_i — псевдовипадкове число, рівномірно розподілене на інтервалі $[0, 1]$. На основі отриманих координат вершин багатогранника розраховується значення функції $\sigma^2(\mathbf{x})$ для кожної точки. З усіх розрахованих значень функції вибирається максимальне:

$$\sigma^2(x[h, k]) = \max\{\sigma^2(x[1, k]), \dots, \sigma^2(x[7, k])\}. \quad (15)$$

Наступним кроком є розрахунок центра ваги багатогранника:

$$x_i[l, k] = \frac{1}{7} \left(\sum_{j=1}^7 x_j[j, k] - x_i[h, k] \right), \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (16)$$

На кожній ітерації замінюється вершина $x[h, k]$, в якій значення функції має найбільшу величину. Для цього $x[h, k]$ відбивається відносно центру ваги $x[l, k]$ багатогранника. Точка $x[m, k]$, що замінює вершину $x[h, k]$, визначається за формулою:

$$x[p, k] = (a + 1)[l, k] + a[h, k], \quad (17)$$

де $a > 0$ — коефіцієнт відбиття, найбільш прийнятні дає значення $a = 1, 3$. При цьому нові вершини

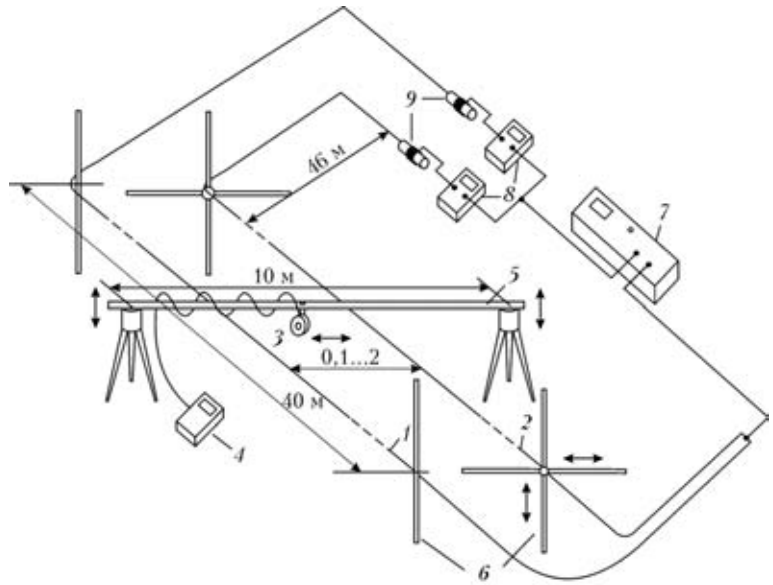


Рис. 4. Схематичне зображення експериментальної установки

багатогранника відшукуються за невелику кількість кроків, а значення функції $\sigma^2(\mathbf{x})$ зменшується достатньо швидко. Якщо $\sigma^2(x[p, k]) > \sigma^2(x[h, k])$, тоді коефіцієнт відбиття зменшується вдвічі до того моменту, поки точка $x[p, k]$ не стане допустимою. Пошук закінчується, якщо значення функції мало змінюється на протязі п'яти послідовних ітерацій:

$$|\sigma^2(x[l, k + 1]) - \sigma^2(x[l, k])| \leq \epsilon, \quad k = 1, 2, \dots, 5, \quad (18)$$

де ϵ — задана константа. В цьому випадку координати центру ваги багатогранника є шуканими параметрами.

Перевагами методу комплексів Бокса є його простота, зручність для програмування, надійність в роботі, використання тільки значень функції (4) і обмежень (6). Таким чином, метод комплексів Бокса може бути реалізований для малопотужних обчислювальних засобів, які входять до складу вимірювальних пристроїв.

Запропонована залежність (3) також може бути застосована і для більшої кількості, ніж два паралельних гальванічно з'єднаних трубопроводів:

$$H_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{I_1 z_1}{z_1^2 + (y_1 + d)^2} + \sum_{j=2}^n \frac{I_j z_j}{z_j^2 + (y_j - b_{j-1} + d)^2} \right), \quad (19)$$

де n — кількість паралельних трубопроводів; b_j — відстань між трубопроводом 1 (що знаходиться найближче до точки відліку) і j -м трубопроводом при $j = 2, \dots, n$.

На основі наведеного вище пропонується методика контролю ізоляційного покриття гальванічно з'єднаних паралельних трубопроводів, суть якої полягає в наступному.

На певній відстані від орієнтовної траси пролягання паралельних трубопроводів вибирається точка відліку, починаючи з якої з певним кроком вимірюються значення горизонтальної складової напруженості магнітного поля над трубопроводами. Вимірювання проводиться в напрямку, перпендикулярному трасі пролягання трубопроводів,

Результати експериментальних досліджень, проведених на лабораторній установці

Величина, одиниця виміру	Задані значення			Визначені величини					
				градієнтний метод найшвидшого спуску			метод комплексів Бокса		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
I_1 , А	0,080	0,045	0,045	0,083	0,048	0,047	0,090	0,05	0,04
I_2 , А	0,060	0,080	0,090	0,068	0,080	0,090	0,072	0,072	0,082
z_1 , м	0,200	0,140	0,200	0,210	0,140	0,150	0,230	0,18	0,16
z_2 , м	0,200	0,200	0,250	0,240	0,210	0,30	0,220	0,16	0,23
b , м	0,400	0,350	0,350	0,440	0,310	0,290	0,350	0,35	0,40
d , м	0,300	0,250	0,180	0,250	0,210	0,200	0,320	0,28	0,16

Примітка. № 1–3 – номери експерименту.

до точки, яка лежить на протилежній стороні від траси по відношенню до точки відліку.

Значення сили струму в стінках кожного з трубопроводів, значення глибини їх залягання і відстані між ними визначається на основі отриманої профільної залежності напруженості магнітного поля. Визначення параметрів проводиться або безпосередньо на місці контролю із застосуванням чисельного методу комплексів Бокса, або в стаціонарних умовах з вищою точністю із застосуванням градієнтного методу найшвидшого спуску.

Для перевірки запропонованої методики безконтактного визначення вище наведених параметрів для гальванічно з'єднаних паралельних трубопроводів була розроблена експериментальна установка, схема якої представлена на рис. 4.

Для моделювання трубопроводів використовуються два циліндричні провідники 1 і 2, які закріплені на стояках 6. Провідник 2 може переміщуватись по горизонталі і вертикалі. Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля, що необхідна для побудови профільної залежності, здійснюється за допомогою магнітної антени 3. Безпосереднє відображення значення напруженості поля здійснюється вторинним пристроєм 4. Магнітна антена переміщується над провідниками 1, 2 за допомогою пристрою 5. Джерелом синусоїдального сигналу служить генератор 7; з метою підвищення завадозахисту частота контрольного сигналу генератора становить 477 Гц. Контроль величини струму сигналу в кожному з провідників здійснюється за допомогою цифрових амперметрів 8. Струм в кожному провіднику задається реостатами 9.

З метою отримання профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля магнітна антена 3 переміщувалась перпендикулярно до осей паралельних провідників 1, 2 з кроком 0,05 м. В результаті вимірювань були отримані профільні

залежності для різних наборів значень струму в провідниках (I_1 , I_2), а також відстані від осі кожного провідника до перекладни пристрою переміщення 5 (z_1 , z_2), що імітує поверхню землі, і відстані між провідниками b . Для пошуку параметрів використовувався градієнтний метод найшвидшого спуску і метод комплексів Бокса. Результати проведених експериментальних досліджень ілюструє таблиця.

Проведені експериментальні дослідження показали адекватність запропонованої математичної моделі фізичним процесам утворення магнітного поля навколо паралельних гальванічно зв'язаних трубопроводів і достатню для практичного застосування точність визначення значень струмів, що протікають в стінках даних трубопроводів. Описана вище методика для свого застосування на практиці не вимагає визначення точного положення осі кожного з трубопроводів, завдяки введенню додаткового параметру зсуву.

1. Джала Р. М. Електромагнітні обстеження і контроль корозії підземних трубопроводів // Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довід. посібник. Т. 5. — Львів: ФМІ НАНУ. — 2001. — С. 307–318.
2. Ващишак С. П., Яворський А. В. Вдосконалення приладу для безконтактного контролю стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів // Методи і прилади контролю якості. — 2000. — № 6. — С. 25–28.
3. Ващишак С. П., Яворський А. В. Система безконтактного контролю стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів в умовах значних промислових завод // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — Праці НК, Хмельницький, 31 травня — 3 червня 2001 р.
4. Яковлев И. И. Бесконтактные электроизмерительные приборы. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.
5. Дослідження магнітного поля паралельних трубопроводів, збуджених струмами низької частоти / Р. М. Джала, Л. А. Мізюк, О. П. Максименко, О. І. Сенюк // Методи і прилади контролю якості. — 1999. — № 4. — С. 3–6.
6. Гордиенко В. И., Ярошевский Е. В. Электромагнитное обнаружение инженерных коммуникаций и локальных аномалий. — Киев: Наук. думка, 1981. — 227 с.
7. Банди Б. Методы оптимизации. — М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.