

ІНВАРІАНТНИЙ МЕТОД БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПРЯМОЛІНІЙНОГО СТРУМУ

© Джала Р.М., 2005

Наведено формули визначення сили струму за вимірами модулів напруженості магнітного поля у трьох точках, розміщених на базі, довільно орієнтованій у площині, перпендикулярній до струмопроводу. Розглянуто частинні випадки вимірювань струму і визначення координат.

The formulas for definition of a current intensity behind measurements of modulus tensions of a magnetic field in three dots, located on base, arbitrary oriented in a plain perpendicular to rectilinear conductor with an electric current are presented.

Вступ

Безконтактні вимірювання струмів (БВС) використовують при обстеженнях підземних струмопровідних комунікацій (трубопроводів, кабелів) для виявлення пошкоджень ізоляційних покриттів та контролю розподілу струму катодного захисту від корозії для запобігання аварій, забезпечення надійної експлуатації. Велика протяжність комунікацій потребує мобільних засобів, до яких належать безконтактні вимірювачі струмів [1–3]. Для автоматизації БВС актуальними є розробки методів, інваріантних до орієнтації давачів поля щодо струмопроводу.

Відомий і використовується метод БВС за вимірами магнітного поля у двох точках на різних висотах над струмопроводом (при радіальному розміщенні бази точок спостереження) [1, 3]. Вимірювання двох компонент МП у двох точках площини ортогональної струмопроводу дають змогу визначати координати і силу струму при довільній орієнтації бази, що реалізовано в апаратурі БИТ-3 [2, 3]. Була спроба [4] розробки способу БВС, інваріантного до просторового розміщення первинного перетворювача, який складається з двох трикомпонентних взаємно ортогональних магнітосприймачів. Проте отриманий розв'язок непридатний у разі розміщення бази у радіальній до струмопроводу площині і, зокрема, при радіальній орієнтації бази по градієнту МП; його необхідно зарахувати до паралакських методів [5].

У роботі для спрощення процедури БВС для подальшої автоматизації розглядаємо **задачу** визначення струму за вимірами модулів напруженості МП. Вважаємо, що база точок спостереження може бути довільно орієнтована у перпендикулярній до струмопроводу площині. Необхідні і достатні умови визначення цієї площини розглянуті в нашій роботі [2] і не спричиняють особливих практичних ускладнень.

Визначення струму і його координат за модулями магнітного поля у трьох точках

Метод визначення струму за магнітним полем у трьох точках спостереження [6] подано на рисунку. Даємо коротке виведення основних співвідношень.

Значення модуля напруженості магнітного поля, утвореного прямолінійним електричним струмом J на деякій відстані r_i від нього, визначають відомою формулою

$$H_i = J / 2\pi r_i, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (1)$$

яка є наслідком закону Біо-Савара-Лапласа. Для визначення струму J необхідно, крім вимірювань H_i , визначити відстань r_i .

Розглянемо два трикутники (див. рисунок) зі сторонами r_1, b_1, r_3 та r_1, b, r_2 , у яких є спільні сторона r_1 і кут φ_1 . Відстань b між крайніми точками 1 і 2 дорівнює сумі відстаней третьої (середньої) точки від перших двох $b = b_1 + b_2$.

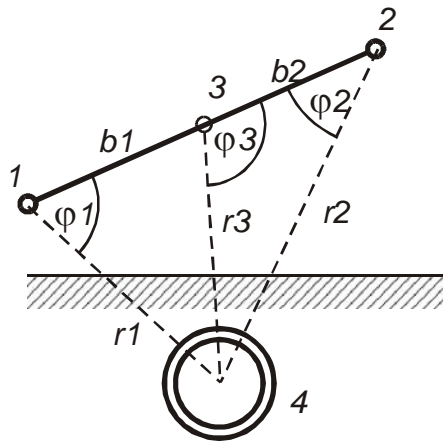


Схема безконтактного вимірювання струму в підземному трубопроводі:
1-3 – точки вимірювання магнітного поля; 4 – підземний трубопровід

За теоремою косинусів маємо

$$r_3^2 = r_1^2 + b_1^2 - 2r_1b_1 \cos \varphi_1 \quad \text{і} \quad r_2^2 = r_1^2 + b^2 - 2r_1b \cos \varphi_1. \quad (2)$$

З цих виразів, вилучивши φ_1 , отримуємо

$$r_3^2 = r_1^2 + b_1^2 + (r_2^2 - r_1^2 - b^2)b_1/b$$

Звідси, враховуючи, що $b - b_1 = b_2$, одержуємо

$$r_3^2 - r_1^2 b_2/b - r_2^2 b_1/b = -b_1 b_2.$$

Розділивши обидві частини цього рівняння на $-b_1 b_2$, одержуємо співвідношення

$$\frac{r_1^2}{bb_1} + \frac{r_2^2}{bb_2} - \frac{r_3^2}{b_1 b_2} = 1. \quad (3)$$

Оскільки згідно з (1) маємо

$$r_i = J/2\pi H_i, \quad (4)$$

то, підставивши (4) у співвідношення (3), отримуємо

$$\left(\frac{J}{2\pi}\right)^2 \left[\frac{1}{bb_1 H_1^2} + \frac{1}{bb_2 H_2^2} - \frac{1}{bb_3 H_3^2} \right] = 1.$$

Звідси випливає формула для визначення струму

$$J = 2\pi \left[\frac{1}{bb_1 H_1^2} + \frac{1}{bb_2 H_2^2} - \frac{1}{bb_3 H_3^2} \right]^{-1/2}. \quad (5)$$

Одержану розрахункову формулу (5) можна дещо спростити в частинному випадку $b_1 = b_2$; тоді маємо

$$J = \pi b \left[\frac{1}{2H_1^2} + \frac{1}{2H_2^2} - \frac{1}{H_3^2} \right]^{-1/2}. \quad (6)$$

У частинному випадку $H_1 = H_2$, коли база орієнтована азимутально відносно струмопроводу, отримуємо

$$J = \pi b H_1 H_3 / \sqrt{H_3^2 - H_1^2}. \quad (7)$$

Відстані від струмопроводу до точок спостереження визначаємо за (4). Зіставляючи r_1 і r_2 , знаходимо, з якого боку відносно бази розташовано струмопровід (рис.): якщо $r_1 = r_2$, то вісь

струмопроводу (точніше її проекція на вісь бази) знаходиться посередині бази; у протилежному випадку струмопровід, очевидно, розміщений з боку ближчої до нього точки спостереження (наприклад, ближче до r_1 , якщо $r_1 < r_2$).

Подібно, якщо $r_3 < r_1$ і $r_3 < r_2$, то проекція струмопроводу розташована у межах бази.

Практично може бути корисним визначати напрям на струмопровід, який знаходимо як кут трикутника з відомими сторонами (див. рисунок). Кут між базою і лінією, що проходить через середню точку спостереження в напрямку на вісь струмопроводу, визначаємо згідно з (2) за формулою

$$\varphi_3 = \text{Arc cos} \left(\frac{b_2^2 + r_3^2 - r_2^2}{2b_2 r_3} \right). \quad (8)$$

Напрями з крайніх точок спостереження на вісь струмопроводу визначаємо за формулою

$$\varphi_k = \text{Arc cos} \left(\frac{b_k^2 + r_k^2 - r_3^2}{2b_k r_k} \right), \text{ де } k=1, 2. \quad (9)$$

при довільній орієнтації бази у перпендикулярній до струмопроводу площині (див. рисунок).

Можна показати, що в частинному випадку радіальної орієнтації бази (5) приводиться до відомого виразу, коли струм можна визначити за вимірами поля в двох точках на радіальній прямій [1]; тоді, якщо $\varphi_1 = \pi$, згідно з (2) маємо $r_2 = r_1 + b$.

Отже, запропонований спосіб є узагальненням відомого способу вимірювання струму, – вимірювання МП у третій точці дає змогу знімати обмеження на орієнтацію бази. Усуваються похибки, які спричинені відхиленнями бази від радіальної орієнтації та можливими відхиленнями взаємної орієнтації однокомпонентних магнітосприймачів, які притаманні відомим способам [1, 2]. Це сприяє підвищенню оперативності вимірювань (бо не треба орієнтувати базу), точності визначення струму, спрощує процедуру БВС, особливо при переміщеннях вздовж траси.

Приклад. Нехай вимірювання напруженості магнітного поля у трьох точках спостереження при $b_1 = b_2 = 0,6$ м показали такі значення: $H_1 = 17,0 \cdot 10^{-3}$ А/м, $H_2 = 12,5 \cdot 10^{-3}$ А/м, $H_3 = 15,0 \cdot 10^{-3}$ А/м. Підставляючи вказані величини у (5), одержуємо значення вимірюваного струму $J = 0,17$ А. За (4) знаходимо відстані від давачів до осі струмопроводу $r_1=1,6$ м, $r_2=2,2$ м, $r_3=1,8$ м. З отриманих значень видно, що оскільки $r_1 < r_2$, то струмопровід знаходиться ближче до давача 1. А з нерівності $r_3^2 > (r_1^2 + b_1^2)$ згідно з (2) впливає, що у такому разі кут $\varphi_1 > 90^\circ$; за (9) обчислюємо $\varphi_1 \approx 100^\circ$.

Можливості автоматизації БВС для обстежень підземних трубопроводів.

Для реалізації методу потрібно три давачі [6], розташовані на фіксованих відстанях вздовж однієї прямої (жорсткої бази). Для зменшення похибок вимірювання, зв'язаних з геометрією пристрою, бажано відстані між давачами вибирати співмірними з відстанями давачів від струмопроводу. Як давачі магнітного поля можуть бути використані будь-які магнітоприймачі, що дають змогу вимірювати модуль напруженості магнітного поля, створеного в точці спостереження вимірюваним струмом. Це можуть бути як зв'язані двокомпонентні давачі (системи рамок чи котушок), так і інваріантні до напрямку (квантові, протонні) магнетометри. Це значно розширяє клас давачів, для реалізації методу, що може бути використано в конкретних практичних випадках. Оскільки в запропонованому способі не потрібна орієнтація давачів поля щодо бази, то це істотно знижує конструктивні вимоги до геометрії антени (системи давачів) і сприяє підвищенню точності вимірювання.

Описані алгоритми визначення струму можна застосувати при автоматичній обробці з використанням обчислювальної техніки (мікроконтролерів). Метод дає змогу здійснювати вимірювання при довільному розташуванні бази з давачами в площині, ортогональній до струмопроводу. Це спрощує можливість автоматизації вимірювання (не потрібно кожний раз орієнтувати базу,

операції вимірювання однотипні) при переміщенні вздовж траси. Місцезнаходження струмопроводу, яке априорі точно не відоме, достатньо приблизно оцінювати за сигналами H_1 і H_2 від крайніх давачів; цього достатньо, щоб оператору “не збитись з траси” при переміщенні вздовж струмопроводу під час його обстеження.

Висновки

Розроблено метод безконтактних вимірювань струму за вимірами модулів напруженості магнітного поля у трьох точках площини, перпендикулярної до струмопроводу, що забезпечує якісно нові можливості створення автоматизованої апаратури для обстежень стану протикорозійного захисту підземних трубопроводів та інших струмопровідних комунікацій.

Перевагою запропонованого методу над раніше відомими є підвищення точності БВС, зумовлене вилученням похибок від взаємної орієнтації давачів МП та від зміщення і орієнтації їх бази щодо струмопроводу.

1. Джала Р.М. Методи безконтактних вимірювань струмів при корозійних обстеженнях підземних трубопроводів // Протикорозійний захист підземних споруд та методи неруйнівного контролю, КСП-97. – Львів, 1997. – С. 15–36. 2. Джала Р.М. Метод безконтактних вимірювань струмів для контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1999. – Т.35, № 3. – С. 105–112. 3. Джала Р.М. Електромагнітні обстеження і контроль корозії трубопроводів // Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т. Назарчука. – Львів. – 2001. – Розд. 5. – С. 263–330. 4. Максименко О.П., Кулинич Я.П. Безконтактне вимірювання струму трикомпонентним первинним перетворювачем. // Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів: Матеріали н.-т. конференції “Леотест-98”. – Славське, 1998. Київ-Львів, 1998. – С. 25–27. 5. Джала Р.М. Градієнтний та паралаксий методи безконтактних вимірювань струмів при обстеженнях підземних трубопроводів // Метрологічне забезпечення в галузі електричних, магнітних та радіовимірювань: III Міжнар. н.-т. конф. “Метрологія в електроніці”. – Наукові праці у 2-х томах. – Харків, 2000. – Т. 1. – С.110–113. 6. А.с. 1788852, СССР. МКИ³ G01R19/00. Способ бесконтактного определения тока в подземном токопроводе. / Р.М. Джала – Рег. 15.09.1992. – 4 с.

УДК 621.317.73

Є.В. Походило

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

АНАЛІЗ МЕТОДИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМІТАНСУ

© Походило Є.В., 2005

Проаналізовано методичні похибки вимірювання параметрів імітансу низькоомних та високоомних об’єктів. Одержано вирази для оцінювання похибок від впливу неінформативного імітансу.

The methodical measuring errors of parameters of an immittance of low-impedance and high-ohmic objects are parsed. The expressions for estimation of errors from influencing not informative immittance are obtained.

Вступ

Однією з причин виникнення методичної похибки вимірювання параметрів імітансу багатоелементного двополосника, яким подаються об’єкти контролю, зокрема об’єкти кваліметрії як електричної, так і неелектричної природи, є спотворення їх схем заміщення у ході під’єднання до