

ЕЛІПТИЧНА ПОЛЯРИЗАЦІЯ МАГНЕТНОГО ПОЛЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ СТРУМІВ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

Р. М. Джала, В. Р. Джала, Б. Я. Вербенець, О. І. Сенюк

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: dzhala@ipm.lviv.ua

Розвинуто математичну модель магнетного поля (МП) паралельних прямолінійних змінних електричних струмів з урахуванням різниці фаз між ними, що призводить до виникнення еліптично поляризованого сумарного МП. Проаналізовано методи визначення координат і струмів паралельних підземних трубопроводів (ПТ). Отримано співвідношення компонент МП для різних координат ПТ, струмів і різниці фаз між ними. Відомі методи визначення координат і струмів паралельних ПТ призначені для частинної лінійної поляризації МП (за синфазних або протифазних струмів). За еліптичної поляризації МП слід комбінувати методи налаштування і сканування з методикою еліптично поляризованого поля геофізичної електророзвідки.

Ключові слова: *магнетне поле струму, еліптична поляризація, паралельні підземні трубопроводи, методи визначення координат і струмів трубопроводів.*

ELLIPTICAL POLARIZATION OF THE MAGNETIC FIELD OF PARALLEL CURRENTS AND METHODS OF THEIR DETERMINATION

R. M. Dzhala, V. R. Dzhala, B. Ya. Verbenets, O. I. Senyuk

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

Determination of positions and electrical currents of underground pipelines using the electromagnetic method allows us to draw conclusions about the quality of the insulation of pipelines. The analysis of the spatial characteristics of the magnetic field of the low-frequency current of the pipeline is carried out on the basis of the Biot-Savard–Laplace law, which determines the dependence of the components of the magnetic field on the given current in a homogeneous, boundless space. It is shown that for two or more parallel pipelines to each other placed close, it is necessary to take into account their total magnetic field.

A mathematical model of the magnetic field of parallel rectilinear alternating electric currents was developed, taking into account the phase difference between them, which leads to the emergence of an elliptically polarized total magnetic field. The methods of determining the coordinates of the currents of parallel underground pipelines are analyzed. The relation of the components of the magnetic field for different coordinates of the pipelines, currents and the phase difference between the currents was obtained. Known methods of determining the coordinates and currents of parallel underground pipelines are intended for the partial case of linear polarization of the magnetic field (with in-phase or anti-phase currents). In the general case of elliptic polarization of the magnetic field, a combination of tuning and scanning methods should be used.

Keywords: *magnetic current field, elliptical polarization, parallel underground pipelines, methods of determining coordinates and pipeline currents.*

Вступ. Електромагнетні обстеження підземних трубопроводів (ПТ) та інших інженерних комунікацій, а також струмопроводів (СП) передбачають визначення координат і сили струмів, за якими роблять висновки про просторове розташування, стан ізоляції трубопроводів, оцінюють роботу станцій катодного захисту. Шукані величини отримують шляхом розрахунків, використовуючи функціональні залежності між ними і магнетним полем (МП), утвореним струмами, що протікають по СП.

Просторові характеристики МП низькочастотного струму аналізують на основі закону Біо-Савара–Лапласа, який визначає залежність компонент МП від заданого струму в однорідному безмежному просторі. Зокрема, МП прямолінійного

© Р. М. Джала, В. Р. Джала, Б. Я. Вербенець, О. І. Сенюк, 2023

струму має концентричний характер і гіперболічно зменшується з віддаленням від осі СП. Як відомо, цей закон залишається справедливим для ПТ з низькочастотними струмами [1, 2]. Застосування такої моделі магнетного поля СП дало змогу запропонувати низку способів [1–3] і створити портативні прилади типу “ОРТ” для визначення розміщення трубопроводів, автоматизовані вимірювачі глибини залягання і струму однопроводного ПТ та сили струму (БІТ-3, БІТ-КВП, БМС тощо) [1, 3].

Постава задачі. Часто в одному транспортному коридорі залягають два і більше трубопроводів, знаходяться інші СП зі струмами промислової частоти (лінії електропередачі, кабелі зв’язку, залізничні колії тощо), які спричиняють електромагнетні завади під час обстежень. Очевидно, що за паралельних СП вказані способи і пристрої мірянь мають додаткові методичні похибки [3–6], оскільки, алгоритми їх роботи ґрунтуються на моделі трубопроводу як одиночного прямолінійного струму. Щоб визначити координати і струми близько розміщених паралельних ПТ, необхідно дослідити інформативні ознаки розподілу їх МП.

Аналіз останніх досліджень. Виконані діагностичні обстеження магістральних газопроводів (МГ) підтвердили придатність методів безконтактних мірянь струмів (БМС) за відстані між МГ не менше 15 м [1]. Встановлено умови БМС з достатньою точністю з урахуванням глибини залягання ПТ, відстані від нього до паралельного трубопроводу та співвідношення міряного і заводнесучого струмів [2]. Проте магістральні нафтопроводи (МН) часто прокладають на відстані ~6 м, де названі умови не виконуються і необхідно враховувати поле паралельного ПТ.

Загальний розв’язок крайової задачі для паралельних ізольованих трубопроводів у середовищі подано у праці [4], де в строгій електродинамічній постанові її зведено до нескінченної системи лінійних алгебричних рівнянь (НСЛАР) для невідомих амплітуд парціальних хвиль частинних областей структури. Матричні елементи НСЛАР описують взаємозв’язки між цими хвилями паралельних трубопроводів. Аналітико-числовими методами можна отримати всі електродинамічні характеристики поля трубопроводів. Проте таке розв’язання доволі громіздке і потребує детального аналізу.

Відомо, що МП струму ПТ можна з достатньою для практики точністю описати законом Біо-Савара–Лапласа як поле лінійного струму. На цій основі розроблено математичні моделі МП синфазних і протифазних струмів паралельних ПТ [3, 5–7]. Під час обстежень близько розміщених ПТ спостерігали незалежність сигналу від повороту магнетосприймача, тобто кругову поляризацію поля.

Магнетне поле паралельних струмопроводів. У працях [3, 5–7] вивчали і подали функції профілювання вертикальної H_y і горизонтальної H_x компонент МП двох паралельних ПТ зі синфазними та протифазними струмами, що найчастіше зустрічаються у практиці. Проте іноді з різних причин зсув фаз між струмами може бути інший. Розглянемо цей загальний випадок.

Нехай паралельні трубопроводи розміщені на глибинах h_1 і h_2 ; відстань між проекціями осей на поверхню землі $b_1 + b_2$. Введемо прямокутну систему координат x, y (рис. 1).

Нехай трубами протікають струми з однакою частотою ω , але з різними фазами φ_1 і φ_2 :

$$J_1 = J_{A_1} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1), \quad J_2 = J_{A_2} \sin(\omega t + \varphi_2). \quad (1)$$

Компоненти сумарного МП двох струмів (J_1 і J_2) низької частоти (до 1000 Гц) у декартовій системі координат (x, y) , перпендикулярній трубопроводам, описують вирази

$$H_x = \frac{J_1}{2\pi} \frac{y_1}{y_1^2 + x_1^2} + \frac{J_2}{2\pi} \frac{y_2}{x_2^2 + y_2^2},$$

$$H_y = \frac{J_1}{2\pi} \frac{x_1}{y_1^2 + x_1^2} + \frac{J_2}{2\pi} \frac{x_2}{x_2^2 + y_2^2}, \quad (2)$$

де $x_1 = x - b_1$, $x_2 = x - b_2$, $y_1 = y - h_1$, $y_2 = y - h_2$; $b_1, h_1; b_2, h_2$ – координати трубопроводів.

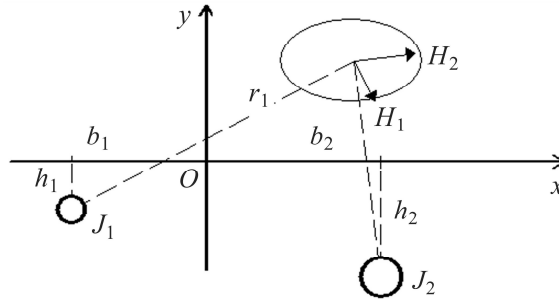


Рис. 1. Координати і магнетні поля струмів паралельних трубопроводів. Виникнення еліптичної поляризації поля струмів.

За формулами (1) і (2) з початком відліку фази $\varphi_1 = 0$, компоненти сумарного поля двох струмів набувають вигляду

$$H_x = G_1 \sin(\omega t) + G_2 \sin(\omega t + \varphi_2),$$

$$H_y = V_1 \sin(\omega t) + V_2 \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (3)$$

де $G_1 = \frac{J_{A1} y_1}{2\pi r_1^2}$; $V_1 = \frac{J_{A1} x_1}{2\pi r_1^2}$; $r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$, і тому формули для G_2, V_2 подібні. Як видно з наведених виразів, сумарне поле залежить не тільки від координат, але й від різниці фаз струмів і може змінюватись у часі не тільки за значенням, але й за напрямом.

Модуль вектора напруженості сумарного МП

$$H(x, y, t) = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}, \quad (4)$$

а його орієнтацію у довільний момент часу відносно вертикалі характеризує кут $\alpha = \alpha(x, y, z, t)$, який для кожної точки простору має вигляд

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_x}{H_y} = \frac{G_1 \sin \omega t + G_2 \sin(\varphi_2 + \omega t)}{V_1 \sin \omega t + V_2 \sin(\varphi_2 + \omega t)}. \quad (5)$$

Розглянемо частинні випадки:

1) $\varphi_2 = 0$ – струми синфазні, тоді згідно з формулами (4), (5)

$$H(x, y, t) = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (V_1 + V_2)^2} \cdot \sin \omega t, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{G_1 + G_2}{V_1 + V_2}; \quad (6)$$

2) $\varphi_2 = \pi$ – струми протифазні, тоді

$$H(x, y, t) = \sqrt{(G_1 - G_2)^2 + (V_1 - V_2)^2} \cdot \sin \omega t, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{G_1 - G_2}{V_1 - V_2}. \quad (7)$$

Для однакових фаз коливань полів компоненти алгебрично додають; за різниці π – віднімають за формулами (1). В обох цих частинних випадках МП зали-

шається лінійно поляризованим: вектор сумарного поля коливається з часом у напрямі, який залежить від векторної суми компонент у кожній точці простору і не залежить від часу. За відхиленя від цих частинних випадків характеристики сумарного поля ускладнюються.

Еліптична поляризація поля. Загалом, коли струми не синфазні і не протифазні, вектор сумарного МП коливається (обертається) по еліпсу (рис. 1), параметри якого для кожної точки простору визначають амплітуди складників поля та зсув фаз між струмами. Зокрема, при $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi/2$ і за однакових амплітуд полів обох струмів у певних точках сумарний вектор коливається по колу, тобто маємо кругову поляризацію змінного у часі МП.

Проаналізуємо це явище. Покажемо частинний випадок:

3) $\varphi_2 = \pi/2$ – фази струмів зсунуті на чверть періоду, тоді згідно з виразами (5) і (6), отримаємо:

$$H(x, y, t) = \sqrt{(G_1 \sin \omega t + G_2 \cos \omega t)^2 + (V_1 \sin \omega t + V_2 \cos \omega t)^2},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{G_1 \sin \omega t + G_2 \cos \omega t}{V_1 \sin \omega t + V_2 \cos \omega t}. \quad (8)$$

Значення і орієнтація вектора напруженості сумарного поля у кожній точці простору змінюється у часі з періодом $T = 2\pi/\omega$.

Зокрема, наприклад, у точці з координатами $x = b_1, y = h_2$ (рис. 2), де $G_2 = 0$ і $V_1 = 0$, одержимо:

$$H(b_1, h_2, t) = \sqrt{(G_1 \sin \omega t)^2 + (V_2 \cos \omega t)^2}, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{G_1 \sin \omega t}{V_2 \cos \omega t} = \frac{G_1}{V_2} \operatorname{tg} \omega t. \quad (9)$$

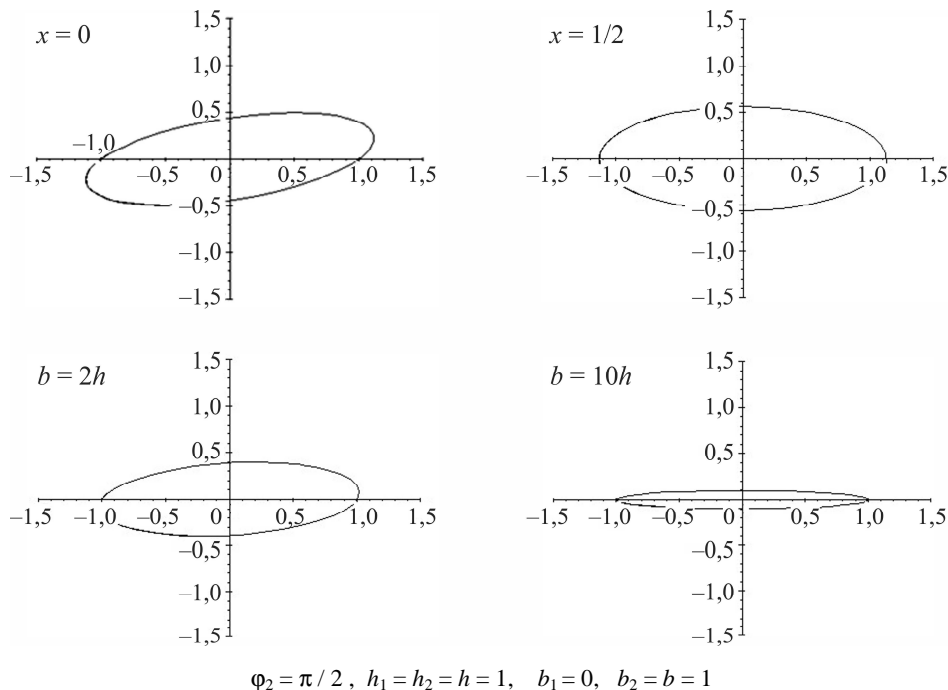


Рис. 2. Еліптична поляризація сумарного магнетного поля паралельних струмопроводів.

Якщо при цьому $G_1 = V_2$, то

$$H(b_1, h_2, t) = G_1, \quad \text{tg } \alpha = \text{tg } \omega t. \quad (10)$$

Тоді у вказаній точці простору вектор напруженості сумарного МП двох паралельних змінних струмів не змінюється у часі

$$H(b_1, h_2, t) = \frac{J_{A_1}}{2\pi(h_2 - h_1)} = \frac{J_{A_2}}{2\pi(b_2 - b_1)}, \quad (11)$$

проте міняє орієнтацію, обертаючись з кутовою швидкістю $a/t = \omega$. Тут маємо певну аналогію з обертовим МП статора асинхронного електродвигуна.

Умовою кругової поляризації сумарного МП у вибраній точці з координатами (b_1, h_2) згідно з формулами (10), (11) є

$$\frac{J_{A_1}}{J_{A_2}} = \frac{h_2 - h_1}{b_1 - b_2}. \quad (12)$$

Подібно у місцях, де радіус-вектори точки спостереження r_1 і r_1 (рис. 1) взаємно перпендикулярні, а напруженості полів, створених змінними струмами трубопроводів, рівні за значенням і зсунуті за фазою на чверть періоду зміни струмів у часі, також міститиме колову поляризацію сумарного МП. Такі точки розміщені на колі, яке проходить через осі трубопроводів так, що відстань між ними

$$O_1O_2 = \sqrt{(b_1 - b_2)^2 + (h_1 - h_2)^2} \quad (13)$$

є діаметром цього кола. Центр його знаходиться на середині відстані O_1O_2 і має координати

$$x_c = (b_1 + b_2)/2, \quad y_c = (y_1 + y_2)/2. \quad (14)$$

Геометричне місце точок спостереження з координатами (x, y) , в яких r_1 і r_2 (а отже, і напруженості поля струмів) взаємно перпендикулярні, описує рівняння

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = b_{12}^2, \quad (15)$$

де $b_{12} = O_1O_2/2$ – половина відстані між осями струмопроводів.

Умовою рівності напруженостей МП цих струмів є

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{J_{A_1}}{J_{A_2}}. \quad (16)$$

У просторі існують дві симетрично протилежні точки, які задовольняють рівняння (15), (16). За однакових амплітуд струмів вони однаково віддалені від струмопроводів: $r_1 = r_2 = \sqrt{2} \cdot b_{12}$, тобто знаходяться на перпендикулярі, що проходить крізь середину відстані O_1O_2 . За неоднакових (з круговою поляризацією сумарного поля) згідно з (16) зміщуються по колу (15) до меншого струму.

Аналіз методів визначення координат і струмів паралельних ПТ. Для обстежень паралельних ПТ можна виділити методи сканування [5–7] і налаштування [8]. Сканувати компоненти МП поперек траси ПТ можна, фіксуючи екстремуми МП [5–7] або періодично зчитуючи відліки значень компонент МП [9, 10]. За екстремальними значеннями компонент визначають координати ПТ та їх синфазні або протифазні струми [5–7].

Для знаходження координат і струмів ПТ за профілюванням МП у ряді точок вздовж прямої лінії поперек траси застосовують апроксимацію та мінімізацію, метод множників і функції Лагранжа, вживаючи для пошуку екстремуму

градієнтний метод Девідсона–Флетчера–Пауела та прямий метод Бокса [9]. Використовують штучні нейронні мережі [10].

Для реалізації методу налаштування можна застосовувати систему давачів МП [8]. На рис. 3 подано варіант системи індукційних магнетосприймачів (давачів сигналів) для безконтактних мірянь струмів паралельних ПТ [8]. Тут 1 і 2 – міряльні давачі; 3 і 4 та 5 і 6 – дві пари орієнтаційних давачів, закріплені на взаємно ортогональних штангах 7 і 8. Через механізм 9 міряння кута α повороту штанг та висоти b їх центра A штанги з'єднані зі стояком 10, 11 і 12 – перший і другий трубопроводи, 13 і 14 – додаткові міряльні давачі.

За сигналами орієнтаційних давачів систему розміщують на колі, діаметром якого є відстань l між ПТ. Тоді за сигналами міряльних давачів визначають відстань від центра системи до ПТ-1 та струм I_1 у ньому. Повертаючи систему на 90° , можна розрахувати струм I_2 [8].

За цими методами можна визначити синфазні або протифазні струми ПТ за лінійною поляризацією МП. Для еліптичної слід комбінувати ці методи або застосовувати спеціальні методи геофізичної електророзвідки [11], використовуючи наведені співвідношення між компонентами еліптично поляризованого поля змінних струмів з апіорі невідомою різницею фаз.

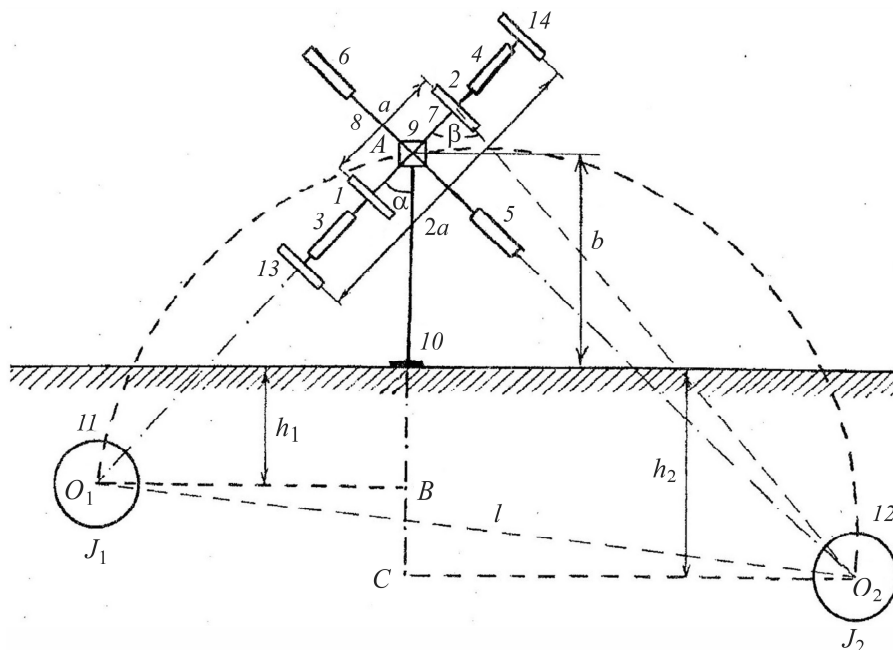


Рис. 3. Система давачів для міряння струмів двох паралельних трубопроводів [8].

ВИСНОВКИ

Розвинуто математичну модель МП паралельних прямолінійних змінних електричних струмів з урахуванням різниці фаз між ними, що призводить до виникнення еліптично поляризованого сумарного МП. Отримано співвідношення компонент МП для різних координат ПТ, струмів і різниці фаз між ними. Відомі методи визначення координат і струмів паралельних ПТ призначені для частинних випадків лінійної поляризації МП (за синфазних або протифазних струмів). Для еліптичної поляризації МП слід комбінувати ці методи, що потребує відповідних досліджень і розробок.

1. Dzhala, R.M. Current state and problems of corrosion testing of underground pipelines. Proc. 4th Int. Conf.-Exhibition "Corrosion-98", Lviv, 1998, 411–414. (in Ukrainian)
2. Dzhala, R.M.; Senyuk, O.I. Influence of a parallel current line on determining the current of an underground pipeline. *Information Extraction and Processing*, **1997**, 11(87), 11–14. (in Ukrainian)
3. Dzhala, R.M.; Dikmarova, L.P.; Dzhala V.R.; Verbenets B.Ya. Electromagnetic testing of insulation of underground pipelines. Kyiv: Naukova dumka, 2021. (in Ukrainian)
4. Dzhala, R.M. Electrodynamic model of parallel insulated pipelines. *Radio electronics and telecommunications: Bulletin of Lviv Polytechnic State University*, **2000**, 387, 474–479. (in Ukrainian)
5. Maksymenko, O.P.; Kulynych, Ya.P. Assessment of the capabilities of the induction method for determining the position of parallel engineering communications. *Information Extraction and Processing*. **1997**, 11(87), 59–61.
6. Dzhala, R.M.; Miziuk, L.Ya.; Maksymenko, O.P.; Senyuk, O.I. Determination of coordinates and currents of parallel pipelines. Materials of the 3rd scientific and practical seminar "Anti-corrosion protection of pipelines and structures and testing methods, KTS-99". Lviv: FMI, 1999. 85–93. (in Ukrainian)
7. Dzhala, R.M.; Miziuk, L.Ya.; Maksymenko, O.P.; Senyuk, O.I. Study of the magnetic field of parallel pipelines excited by low-frequency currents. *Methods and devices of quality control*. **1999**, 4, 3–6. (in Ukrainian)
8. Miziuk, L.Ya.; Vakulskyi, O.A.; Dub, P.B.; Nichoga, V.O. Non-contact measurement of electrochemical protection currents of two parallel pipelines. Proc. 4th Int. Conf.-Exhibition "Corrosion-98", Lviv, 1998, 461–464. (in Ukrainian)
9. Yavorskyi, A.V. Development of a method and system for non-contact monitoring of the state of insulation of industrial oil and gas pipelines: Ph.D. Dissertation Ivano-Frankivsk, 2005. (in Ukrainian)
10. Kostiv, B.V. Improvement of non-contact determination of currents in the walls of underground pipelines to control their insulation coating: Ph.D. Dissertation. Ivano-Frankivsk, 2010. (in Ukrainian)
11. Svetov, B.S.; Miziuk, L.Ya.; Podzhary, V.M. Ore electrical prospecting using the elliptically polarized field method. Nedra, 1969. (in Russian)

Одержано 15.09.2023