

БЕЗКОТАКТНЕ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ ВИПРЯМЛЕНОГО СТРУМУ ЗА ГАРМОНІКАМИ

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

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка
Національної академії наук України, Львів

E-mail: dzhala@ipm.lviv.ua

Описано метод безконтактного визначення напрямку випрямленого електричного струму за характеристиками його магнетного поля. Проаналізовано часові залежності гармонічних складників струму для дво- і однопівперіодного випрямлення. Виявлено інформативні ознаки напрямку випрямленого струму за напрямком струму другої гармоніки у моменти максимальних значень першої. Розроблено схеми і виготовлено макет пристрою та перевірено його роботу в лабораторії і на трасі магістральних трубопроводів. Перевагами методу (порівняно з відомими) є вилучення впливу завадонесучих струмів і полів, що підвищує надійність і вірогідність визначення напрямку випрямленого струму в захищених провідниках. Метод можна використовувати для виявлення і визначення напрямку випрямленого пульсуючого струму незалежно від інших сторонніх постійних полів під час контролю струмів електрохімічного захисту від корозії у підземних трубопроводах, а також у системах управління, електроавтоматики і радіоелектроніки.

Ключові слова: випрямлений струм, пульсації потоку, гармоніки, напрямок струму, протикорозійний захист.

CONTACTLESS DETERMINATION OF RECTIFIED CURRENT DIRECTION BY HARMONICS

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

Karpenko Physico-Mechanical Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

The direction of electric current is important in electrochemistry, in the problem of metal corrosion in an electrically conductive medium. The flow of current from the medium to the steel surface (cathodic polarization) inhibits corrosion, while the flow of current causes the metal failure. Electrochemical protection is carried out by cathodic protection installations. A rectified pulsating electric current is applied to the metal. The direction of this current is taken into account to control the correctness of cathodic protection and determine the protective current density. The known contact and contactless methods for determining the direction of current are analyzed, and their shortcomings are revealed.

A new method for contactless determining the direction of rectified current is proposed, the physical grounds of which are the presence of periodic pulsations with harmonic components, the asymmetry of pulsations relative to the average value, and the unambiguous relationship of current components with the polarity and magnitude of electrical signals from the magnetic field receiver. The time dependences of the harmonic components of the current for two- and one-half-wave rectification are analyzed. The essence of the method is explained by graphs of the time dependences of the rectified current and its harmonic components for forward and reverse currents. The maximum values of the first harmonic correspond to the smooth extrema of the forward rectified pulsating current. For the reverse current the maxima of the same first harmonic correspond to the sharp extrema of the rectified current. This asymmetry of ripples is used for the recognition of forward and reverse rectified currents proposed in this method (Dzhala's method). Informative signs of the direction of the rectified current along the direction of the second harmonic current at the moments of maximum values of the first harmonic were identified. Schemes were developed and a prototype of the device was manufactured and its operation was tested in the laboratory and on the route of main pipelines.

© Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, В. Р. Джала, М. І. Мельник, О. І. Сенюк, 2025

The elimination of the influence of interfering currents and fields, which increases the reliability and accuracy of determining the direction of the rectified current in hidden conductors are the method advantages compared to the known methods. The method can be used to detect and determine the direction of rectified pulsating current regardless of the presence of other external direct currents when monitoring electrochemical corrosion protection currents in underground pipelines, as well as in control systems, electrical automation, and radio electronics.

Keywords: *rectified current, flow pulsations, harmonics, current direction, corrosion protection.*

Вступ. Напрямок електричного струму важливий у електрохімії і, зокрема, за корозії металевих споруд в електропровідному середовищі. У випадку натікання струму з середовища на поверхню сталі корозійні процеси гальмуються (катодна поляризація), а під час витікання відбувається анодне розчинення металу. В практиці електрохімічного захисту широко використовують установки катодного захисту (УКЗ), які живляться від електромережі змінного струму і подають на поверхню підзахисного металу випрямлений пульсуючий електричний струм, який змінює значення з плином часу, але не змінює (як змінний струм) свій напрямок. Бувають випадки неправильного увімкнення УКЗ, що призводить до руйнування металу. За напрямками струмів у різних точках підземних трубопроводів (ПТ) можна визначити зону дії УКЗ; напрям також необхідно враховувати під час оцінювання густини захисного струму. Тому потрібні різні засоби контролю.

Аналіз стану проблеми. Напрямок електричного струму у провіднику можна визначити, підключаючи мілівольтметр до струмопроводу у двох точках і виявляючи точку з вищим потенціалом (стрілка мілівольтметра відхиляється в його сторону), від якої, як відомо, струм тече до точки з нижчим потенціалом.

Недоліком відомого методу є вимога забезпечення контактів зі струмопроводом, що ускладнює його використання для ізольованих і захищених провідників, і зокрема, підземних трубопроводів. Подібні труднощі є і під час контролю пучків заряджених частинок.

Можна визначити напрямок струму у провіднику безконтактним методом, який базується на визначенні напрямку створеного струмом магнетного поля і використанні правил свердлика. Напрямок магнетного поля визначають магнетною стрілкою, але для задач контролю прийнятнішим є перетворення поля в електричний сигнал, за полярністю якого роблять висновок про напрям струму.

Проте існує потужне магнетне поле Землі, на фоні якого виділення магнетного поля струму ускладнене і потребує спеціальних пристроїв [1–4]. Крім того, відомі постійні (контактні і безконтактні) способи не дають можливості виділяти випрямлений струм УКЗ за наявності інших (блукуючих) постійних струмів, які можуть протікати трубопроводом.

Формулювання завдання. Виникає задача безконтактного визначення напрямку випрямленого струму за наявності завад – сторонніх полів і струмів.

Матеріали дослідження і обґрунтування отриманих наукових результатів. На основі досліджень структури і характеристик поля випрямленого струму, запропоновано новий метод визначення його напрямку – зіставленням миттєвих значень гармонійних складових [5].

Фізичними основами методу є:

- наявність періодичних пульсацій випрямленого струму (поток);
- можливість розкладу випрямленого струму на гармонійні складові (згідно з принципом суперпозиції) за теоремою Фур'є;
- асиметрія пульсацій відносно середнього за період значення.

Крім цього, для розв'язання цієї проблеми використовуємо однозначний зв'язок напрямку і значення струму з напрямом і напруженістю створюваного ним магнетного поля (за законом Біо-Савара) та з полярністю і значенням електричного сигналу від сприймача магнетного поля.

Опис методу [5]. Нехай пульсуючий струм отримано двопівперіодним випрямленням змінного струму з частотою f . Його зміну з часом описуємо виразом

$$J(t) = J_a \cdot |\sin \omega t|, \quad (1)$$

де J_a – амплітуда; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота; t – час. Розкладаючи в ряд Фур'є за гармонійними складовими, маємо:

$$J(t) = J_0 - J_1 \cos 2\omega t - J_2 \cos 4\omega t - J_3 \cos 6\omega t \dots, \quad (2)$$

де амплітуди гармонік

$$J_0 = \frac{2}{\pi} J_a, \quad J_1 = \frac{4}{3\pi} J_a, \quad J_2 = \frac{4}{3 \cdot 5\pi} J_a, \quad J_3 = \frac{4}{5 \cdot 7\pi} J_a, \dots \quad (3)$$

Вирази (1) і (2) описують прямий струм (у вибраному напрямку). Для зворотного струму вирази відрізняються знаком:

$$J_{in}(t) = -J_a \cdot |\sin \omega t|. \quad (4)$$

Відмітимо, що часові залежності поля, створеного струмом у деякій точці спостереження, аналогічні виразам (1)–(4). Суттєвим для подальшого використання методу є можливий зсув фаз між гармоніками, який виникає у середовищах з дисперсією і повинен бути врахований під час налаштування відповідного пристрою.

Суть методу легко пояснити графічно. На рис. 1 показано часові залежності випрямленого струму і його гармонійних складових для прямого (а) і зворотного (б) струмів. Ці ж графіки демонструють зміни в часі магнетних полів, створених струмом і його складовими. Штрихові лінії показують випрямлений (що пульсує з частотою 2ω) струм $J(t)$ з амплітудою J_a та його середнє значення – постійну складову J_0 , які описуються виразами (1) і (3). Суцільні лінії ілюструють першу і другу гармоніки з амплітудами J_1 та J_2 і частотами 2ω та 4ω відповідно (описані виразами (2) і (3)); при цьому гармоніка J_1 зображена відносно середнього значення J_0 .

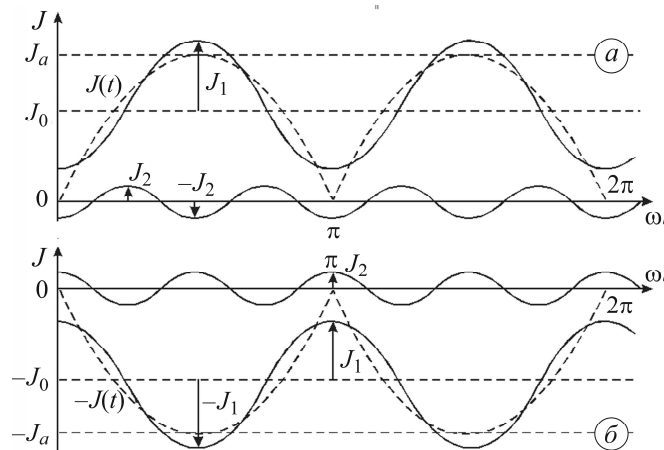


Рис. 1. Епюри випрямленого струму $J(t)$ та його гармонійних складових J_1 , J_2 для прямого (а) і зворотного (б) струмів.

Як видно з рис. 1а, максимальні значення першої гармоніки відповідають плавним екстремумам прямого випрямленого пульсуючого струму, а для зворотного струму (рис. 1б) максимуми цієї ж першої гармоніки відповідають гострим екстремумам випрямленого струму – $J_{in}(t)$. Ця асиметрія пульсацій покладена в основу розпізнавання прямого і зворотного випрямленого струмів, запропонова-

ного у даному методі (спосіб Джали [5]). Плавний і гострий екстремуми формуються вищими гармоніками. Зокрема, за екстремальних значень зворотного струму вона додатна (рис. 1). Вказану відмінність напрямів струму другої гармоніки (у моменти досягнення максимального значення струму першої гармоніки) використовують для визначення напрямку випрямленого струму [5, 6].

Формули (1)–(4) описують ідеально двопівперіодно випрямлений струм. Можливі також інші пульсуючі струми. У випадку неоднакових характеристик пліч випрямляча (наприклад, УКЗ) струми на першому і другому півперіодах будуть різні. Виникає питання – чи працюватиме метод для таких неідеально випрямлених пульсуючих струмів (потоків)?

Розглянемо крайній випадок однопівперіодного випрямлення. Замість виразу (1) тоді для кожного періоду отримаємо:

$$J'(t) = \begin{cases} J_a \sin \omega t, & 0 \leq \omega t \leq \pi, \\ 0, & \pi \leq \omega t \leq 2\pi, \end{cases} \quad (5)$$

а замість (2)

$$J'(t) = J'_0 + J'_1 \sin \omega t - (J'_2 \cos 2\omega t + J'_4 \cos 4\omega t + \dots), \quad (6)$$

де

$$J'_0 = \frac{J_a}{4}, \quad J'_1 = \frac{J_a}{2}, \quad J'_2 = \frac{2}{3\pi} J_a, \quad J'_4 = \frac{2}{3 \cdot 5\pi} J_a, \dots \quad (7)$$

Третій і четвертий члени цього розкладу описують коливання з частотами 2ω і 4ω , як і у попередньому випадку. Амплітуди цих гармонік тут у два рази менші, чого і слід очікувати. Відмінність полягає у появі додаткової гармоніки з частотою ω , що по суті не змінює запропонованого способу, який повністю придатний і тут. Таким чином, цей метод дає змогу однозначно визначати напрям випрямленого пульсуючого струму (у сенсі геометрично визначеного напрямку) за напрямками компонент (гармонік) поля (чи полярності сигналів) у певні вказані вище моменти часу. Додаткове калібрування за допомогою струму заданого напрямку не обов'язкове.

Для контролю напрямку струму УКЗ зручно використовувати першу і другу гармоніки з частотами 100 і 200 Гц. В окремих випадках за цим методом можна застосовувати й інші частоти.

Результату запропонованим методом досягають так:

- перетворюємо поле випрямленого пульсуючого струму (поток) в електричний сигнал;
- виділяємо першу і другу змінні гармонійні складові;
- зіставляємо напрямки їх миттєвих значень;
- у моменти досягнення максимальних значень сигналу (напруги) першої гармоніки вирізаємо (виділяємо) строб-імпульси другої гармоніки;
- за напрямком (полярністю, знаком) отриманих строб-імпульсів робимо висновки про напрямок випрямленого струму.

Практичне використання способу передбачає розміщення давача магнетного поля поперек струмопроводу в азимутально позитивному (додатному) напрямі (рис. 2), визначення напрямку пульсуючого магнетного поля, яке охоплює струмопровід; за правилом правого гвинта (свердлика) визначають напрям струму.

Початковий електричний сигнал від струму (чи аналогічного іншого фізичного потоку, який контролюють) можна отримати за допомогою різних сприймачів (перетворювачів) поля: електричних (контактних-кондуктивних, ємнісних) та магнетних. Суттєвою перевагою цього способу є можливість використання індуктивних сприймачів (рамка, котушка), що спрощує апаратну реалізацію.

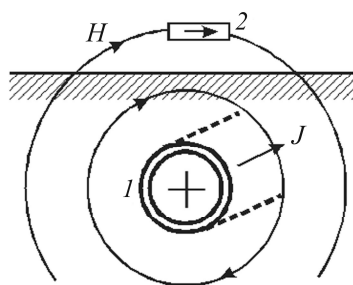


Рис. 2. Положення давача магнетного поля (2) відносно струмопроводу (1).

ВИСНОВКИ

Перевагами запропонованого способу порівняно з відомими є вилучення впливу завадонесучих струмів і полів, що підвищує надійність і вірогідність визначення напрямку випрямленого струму в захованих провідниках. Його можна використовувати для виявлення і визначення напрямку випрямленого пульсуючого струму незалежно від інших сторонніх постійних струмів під час контролю струмів УКЗ у підземних трубопроводах, а також у системах управління, електроавтоматики і радіоелектроніки. Для реалізації методу розроблено функціональну структурну і принципову схеми пристрою для визначення напрямку випрямленого струму. Виготовлено макет пристрою і перевірено його роботу в лабораторії і на трасі магістральних трубопроводів. Створений для реалізації описаного методу пристрій дає можливість оперативно безконтактно визначати наявність і напрям струму УКЗ у підземних трубопроводах. Запропонований спосіб і відповідні йому пристрої можна використовувати автономно або в комплексі засобів для корозійних обстежень систем підземних трубопроводів і з'єднувальних проводів для контролю правильності підключень УКЗ ПТ і пов'язаних з ними металевих споруд.

1. Baekmann, W.; Schwenk, W. Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes, 2nd ed.; Weinheim-Basel: Verlag Chemie, 1980. (In German).
2. Uhlig, H. H.; Revie, R. W. Corrosion and corrosion control. An Introduction to Corrosion Science and Engineering, 3rd ed.; A Wiley-Interscience Publication, 1985.
3. Ostapenko, V. M.; Yagupolska, L.N.; Lukovych, V.V.; Kokhanovskiy, I.M.; Egorov, E.V.; Kuzmenko, Yu.O.; Kalkutin, Yu.G. Electrochemical protection of pipelines against corrosion; Naukova dumka, 1988. (In Ukrainian).
4. Soprunyuk, P.M.; Nazarchuk, Z.T. Development of research on physicomety at the Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Information Extraction and Processing* **2001**, 15 (91), 5–36 (In Ukrainian).
5. Dzhala, R.M. Dzhala's method of determining the direction of rectified current. UKR15546, 1995.
6. Dzhala, R.M. *Non-contact current measurements*; Naukova Dumka, 2024. (In Ukrainian).

Одержано 03.04.2025

ORCID iDs

Dzhala R.M.  <https://orcid.org/0000-0002-0197-0389>
 Verbenets B.Ya.  <https://orcid.org/0009-0007-7107-6204>
 Dzhala V.R.  <https://orcid.org/0009-0002-7980-5567>
 Melnyk M.I.  <https://orcid.org/0009-0000-1641-4900>
 Senyuk O.I.  <https://orcid.org/0009-0008-3571-8676>