

ВИМІРЮВАЧ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ТРУБОПРОВОДУ

Р.М. Джала, В.Й. Глемба,
Я.Є. Підгірняк, О.М. Семенюк*

Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАН України
м. Львів, вул. Наукова, 5
*Львівський Центр інституту
космічних досліджень
м. Львів, вул. Наукова, 5а
E-mail: pid@org.lviv.net

Описано схему і роботу безконтактного вимірювача електричного поля. Для підвищення завадостійкості використовується синхронний детектор. За результатами досліджень показано можливість застосування такого пристрою для контролю протикорозійного захисту підземних і підводних трубопроводів.

Вступ. Для захисту трубопроводів та металевих конструкцій морських газонафтопромислових платформ від корозії застосовують ізоляційні покриття і електрохімічний захист. При цьому до металу конструкції та анодного заземлення під'єднують джерело електричної напруги.

Пошкодження ізоляції металоконструкцій спричинює проникнення агресивного середовища до поверхні металу, приводить до збільшення витрат струму катодного захисту, що зменшує захищеність трубопроводу, термін його експлуатації та ін.

Для визначення розміщення трубопроводу та контролю стану його ізоляції застосовують вимірювання магнітного поля струму катодного захисту [1]. Менше розроблені для цієї мети вимірювання електричної складової поля. Причиною цього є труднощі пов'язані з вимірюванням електричного поля в повітрі [2, 3].

Реальний трубопровід знаходиться під електрохімічним захистом, при цьому, на трубопровід подають випрямлений пульсуючий струм, у якому присутня гармоніка з частотою 100 Гц.

Відомі застосування індикатора електричного поля, збудженого підключеним до трубопроводу спеціальним генератором, що дає можливість за

змінами рівня сигналу виявляти локальні наскрізні пошкодження ізоляції [1, 4, 5]. Проте, для діагностичних обстежень актуальною є розробка вимірювача компонент електричного поля катодного захисту.

Вимірювання електричного поля стикається з труднощами подолання високого рівня електромагнітних завад, що створюються технічними об'єктами. Простим фільтруванням видобути сигнал із вимірюного можливо тільки для завідомих високих рівнів корисного сигналу.

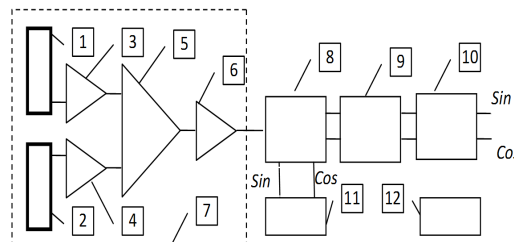
Одним із методів покращення чутливості вимірювань на фоні надзвичайно високих завад є застосування синхронного детектування [6, 7, 8]. При цьому відношення сигнал/шум досягає 80 дБ.

Контролюючи напруженість електричного поля, створеного електрохімічним захистом трубопроводу у воді, можна оцінювати стан протикорозійного захисту металоконструкції.

Вимірювання електричного поля у таких випадках проводять, як правило, контактними методами [1, 2, 3]. Ці методи мають ряд недоліків. Вони пов'язані з використанням контактних електродів, які вносять похибки у вимірювання через часову нестабільність і залежність електрорушійної сили їх подвійного електричного шару від умов оточуючого середовища, глибини, температури та ін. Подолання цих недоліків вимагає значних зусиль пов'язаних з ускладненням схем вимірювань та збільшення енергоспоживання.

Запропонований безконтактний вимірювач електричного поля позбавлений цих недоліків.

Функціональна схема. Функціональна схема вимірювача електричного поля показана на рис. 1.



Р и с. 1. Функціональна схема вимірювача електричного поля трубопроводу

На схемі позначено: 1, 2 – антена; 3, 4 – електрометричні підсилювачі; 5 – суматор; 6 – підсилювач; 7 – герметичний діелектричний корпус; 8 – перемножувач; 9 – інтегратор; 10 – вихідний підсилювач; 11 – генератор квадратурних сигналів, 12 – живлення.

Схема працює наступним чином.

Під дією вимірюваного електричного поля на антени 1, 2 наводиться напруга U , яка подається на попередні електрометричні підсилювачі 3, 4, виходи яких з'єднані з суматором 5, вихід якого, в свою чергу, приєднаний до підсилювача 6. На виході підсилювача 6 маємо підсилений корисний сигнал, змішаний із наведеними на антену завадами. Частота цього корисного сигналу 100 Гц, амплітуда – KU , де K – коефіцієнт передачі попереднього підсилювача.

Вихід попереднього підсилювача під'єднаний до перемножувача 8, на два інші входи якого подається опорний сигнал частотою 100 Гц. Внаслідок операції перемноження на $\sin(\omega_0 t)$ на виході перемножувача 8 одержуємо сигнал:

$$x_1(t) = KU\{[\cos(\omega - \omega_0)t + \varphi] - [\cos(\omega + \omega_0)t + \varphi]\}/2,$$

де ω_0 – опорна частота, ω – частота досліджуваного сигналу.

Тобто, результатом перемноження є гармонійний сигнал з сумарною та різницевою складовими. Якщо такий сигнал пропустити через фільтр нижніх частот з частотою зрізу $\omega_3 \leq \omega_0$, то на виході одержимо тільки ті сигнали частоти яких близькі до опорної частоти (відрізняються від опорної частоти на величину, що не перевищує частоту зрізу фільтра).

У випадку рівності частоти сигналу і опорної частоти появиться складова з нульовою частотою – постійна складова:

$$x_1(t) = KU(\sin(\omega t))/2.$$

Таким чином, у цьому випадку вихідний сигнал пропорційний амплітуді вхідного та залежить від зсуву фаз φ між вимірюваним та опорним сигналом.

Якщо опорний сигнал $\cos(\omega_0 t)$, то на виході фільтра буде, у випадку рівності

опорної та вимірюваної частот, постійний сигнал

$$x_2(t) = KU(\cos(\omega t))/2.$$

Сигнали $x_1(t)$ та $x_2(t)$ пропорційні квадратурним складовим вимірюваного сигналу U , вони дозволяють визначити окремо амплітуду S і фазу φ вимірюваного сигналу:

$$S^2 = x_1^2(t) + x_2^2(t),$$

$$\operatorname{tg} \varphi = x_1(t)/x_2(t)$$

Якщо вимірюваний сигнал $s(t)$ має неперервний спектр, то, в результаті множення його на гармонійний опорний сигнал, відбувається зсув спектра по осі частот на величину рівну частоті опорного сигналу ω_0 , а фільтр вирізає із зсунутого сигналу область низьких частот $\omega < \omega_3$. Таким чином, синхронний детектор діє як смуговий фільтр настроєний на частоту опорного сигналу і має смугу пропускання рівну частоті зрізу фільтра нижніх частот.

Отже, у схемі забезпечується чутливість до фази і амплітуди вимірюваного сигналу та висока частотна вибірковість. Це особливо важливо для виділення вимірюваного сигналу при високому рівні завад.

Перемноження сигналів у частотному детекторі може здійснюватися різнорізними способами і пристроями. Опорний сигнал не обов'язково повинен бути гармонійним, важливо тільки співпадання частот опорного та досліджуваного сигналу.

Опорний сигнал у формі меандра спрощує реалізацію перемноження сигналів. При цьому реалізація перемноження замінюється зміною знака опорного сигналу, і може бути виконане з допомогою, наприклад, інвертора. Такий перемножувач це – балансний модулятор.

Особливістю синхронного детектора з прямокутним опорним сигналом є те, що у результаті перемноження у низькочастотну область переносяться складові сигналу, що лежать коло частот всіх гармонік опорного сигналу ω_0 ; $2\omega_0$; $3\omega_0$ і т.д. Це погіршує співвідношення сигнал-шум для такого синхронного

детектора у порівнянні з детектором у яком використовується гармонійним опорний сигнал. Це пояснюється тим, що на вихід детектора разом з вимірюваним сигналом попадають кратні гармоніки завад та опорного сигналу які в корисному сигналі відсутні. Цей недолік усувається попередньою фільтрацією сигналу селективним фільтром невисокої добротності, який усуває завади на кратних частотах.

Реалізація вимірювача. У розробленій схемі пристрій перемноження вимірюваного сигналу на два квадратурні сигнали частотою 100 Гц відбувається на мікросхемі D1: AD630\AD. На мікросхемі D2:OP-27A\AD квадратурні сигнали інтегруються і подаються на вихідні підсилювачі виконані на мікросхемі D3:OP-27A\AD. На виході маємо два постійні сигнали пропорційні амплітуді вимірюваного, яка помножена на косинус і синус кута між опорним і виміряним сигналом.

Наявність квадратурних сигналів дає можливість побудувати вектор вимірюваного електричного поля катодного захисту. Крім того, фаза між квадратурними сигналами містить інформацію про електричні властивості середовища, що є додатковим інформативним параметром при проведенні таких досліджень та додатковою перевагою над іншими методами вимірювань.

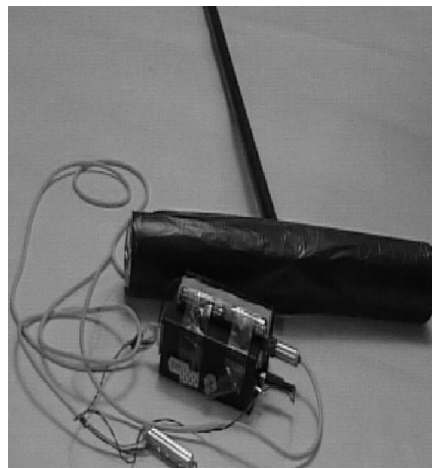
При цьому передбачається, що корисний сигнал має дуже вузьку смугу навколо нульової частоти ω_0 (яка дуже низька). Амплітуда сигналу співмірна з завадою, яка займає більш широку частотну смугу.

На рис. 2 показано фото макетного зразка (пристрою) вимірювача електричного поля трубопроводу де видно блок електроніки та антену.

Попередній підсилювач конструктивно розміщений у антені. У блоці електроніки розміщені синхронний детектор (перемножувач та генератор опорної частоти), фільтри, вихідний підсилювач та блок живлення. Живлення пристрою автономне, здійснюється від двох батарейок.

Вимірювач випробуваний у лабораторних та польових умовах. Одержано чіткі сигнали. У лабораторії

поле моделювали з допомогою двох провідних паралельних пластин розміром 1×1 м рознесених на 1 м і підключених до генератора 100 Гц. Напруженість модельованого поля змінювано у діапазоні від нуля до 1 В/м. Вимірювач добре реагує як на поле між пластинами, так і поза ними.



Р и с. 2. Макетний зразок вимірювача електричного поля катодного захисту трубопроводу

Лабораторні дослідження і польові випробування розробленого макетного зразка вимірювача електричного поля для узгодження сигналів проведено з використанням стандартного аналогово-цифрового перетворювача приєднаного до ноутбука.

На рис. 3 показано графік вимірів горизонтальної складової електричного поля над трубопроводом на поверхні землі, одержаний під час натурних випробувань вимірювача на трасі магістрального газопроводу. Колом умовно позначено трубопровід у поперечному перерізі відповідно до масштабу графіка.

Під час польових випробувань отримано надійний сигнал від поля катодного захисту трубопроводу. Горизонтальну складову електричного поля вимірювали у 3-метровій зоні навколо трубопроводу. Трубопровід знаходився повністю у землі.

У конструкції макетного зразка вимірювача передбачено можливість зміни опорної частоти детектора у вузькому діапазоні, що дозволило легко ідентифі-

кувати вимірюваний сигнал шляхом незначної зміни опорного сигналу за різницевою частотою.

Антену зібрану з двох електропровідних, розміщених на спільній осі, циліндричних трубок, закріплених на діелектричній основі. Розміри кожного з циліндрів: довжина – 20 см, діаметр – 6,5 см. Віддаль між циліндрами – 5 см. Максимальний сигнал отримуємо при розміщенні антени над трубопроводом з радіальною орієнтацією сенсорів відносно трубопроводу, тобто, вздовж вектора напруженості електричного поля катодного захисту.

Антену та попередній підсилювач розміщені у герметичному діелектричному контейнері 9, як показано на рис. 1. Це дозволяє проводити вимірювання поля у воді.

Таким чином вимірювач електричного поля забезпечує вимірювання як в повітрі, так і у водному середовищі.

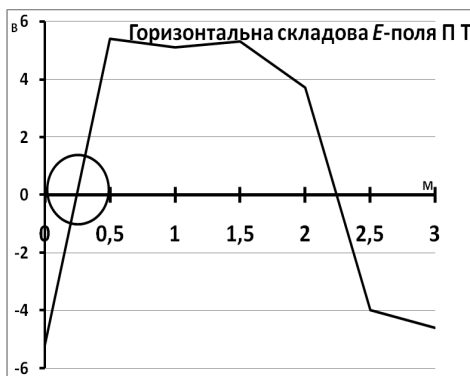


Рис. 3. Виміри горизонтальної складової електричного поля трубопроводу

Висновки. Запропоновано метод і пристрій вимірювання електричного поля, який дозволяє розширити можливості досліджень протикорозійного захисту підземних і підводних трубопроводів.

У вимірювачі електричного поля обґрунтовано застосування синхронного детектування досліджуваного сигналу.

Розроблений вимірювач поля має високу заводостійкість і може працювати за наявності високого рівня промислових завод.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Джала Р. М. Электромагнитні обстеження і контроль корозії трубопроводів // Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібн. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: ФМІ НАН України. – 2001. – Розд. 5. – С. 263-330.
2. Кочанов Э.С., Зимин Е.Ф. Измерение электрического поля токов проводимости в сверхнизкочастотном диапазоне (Обзор) // Радиотехника и электроника. Том XXVII. Вып. 7. 1982. – С. 1249-1267.
3. Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. – М.: Энергоиздат 1985. – 256 с.
4. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / Под ред. В.А. Шевнина и И.Н. Модина – М.: РУССО, 1999. – 511 с.
5. Калашиников А.И., Дудкин Ф.М., Николаенко Ю.Б. Основы морской электроразведки. – К.: Наукова думка, 1980. – 222 с.
6. Плаксин И.И., Астахов Ю.А., Собищев А.А. Модуляционный датчик электрического поля в проводящей среде. // Тезисы докладов VIII Всесоюзного семинара «Фундаментальные проблемы морских электромагнитных исследований». – Звенигород, 1990.
7. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. – М.: Мир, 1983. – Т.2. – 256 с.
8. Петин Г. Ключевой синхронный детектор. // Схемотехника, № 3, 2003. – С. 1–6.