

## ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПІДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Р. М. Джала, Я. Є. Підгірняк

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

E-mail: pid@org.lviv.ntt

Описано розроблені безконтактні вимірювачі змінного та постійного електричних полів підземного трубопроводу. Для підвищення чутливості використано синхронний детектор. Опорні коливання з формою меандра і частотою 100 Гц задають генератором. Антена вимірювача змінного електричного поля виконана у вигляді двох рознесених у просторі і розміщених на одній осі металевих циліндрів. Для постійного електричного поля використано механічне переривання вимірюваного сигналу. У вимірювачі постійного поля опорну частоту задають оптопарою, у зазорі якої розміщено рухомий електрод. Описано функціональні схеми та показано результати лабораторних і натурних випробувань вимірювачів постійного та змінного електричних полів. Виміряно профілі електричного поля підземного трубопроводу.

**Ключові слова:** *підземний трубопровід, катодний захист від корозії, електричне поле, завади, синхронний детектор, сенсор.*

## MEASUREMENT OF ELECTRIC FIELD OF UNDERGROUND PIPELINE

R. M. Dzhala, Ya. Ye. Pidhirnyak

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

The paper presents the developed contactless measurement devices of alternating and direct electric fields of underground pipeline. A synchronous detector was used to increase the sensitivity. The base oscillation has a meander shape. The base frequency for measuring AC fields is 100 Hz, given by the reference frequency generator. Antenna of measuring alternating electric field is designed as two separated in space and placed on the same axis metal cylinders. Mechanical interruption of signal was used for constant electric field measurement. In the measurer of DC field a reference frequency is set by the optoelectronic coupler that has a gap in which the movable electrode is located. Functional diagrams are described and experimental results of laboratory tests and field study of the alternating and direct electric field measurers are shown. The profiles of the underground pipeline electric field are measured.

**Keywords:** *underground pipeline, cathodic protection, electric field, corrosion, noise, synchronous detector, sensor.*

Для захисту металевих конструкцій трубопроводів та морського нафтопромислового обладнання від корозії найчастіше застосовують установки катодного захисту (УКЗ), які подають на металоконструкцію випрямлений струм промислової частоти і створюють електричну напругу з постійною і змінними складовими. Пошкодження ізоляції трубопроводу призводять до збільшення витрати струму, зменшують його захищеність і термін експлуатації.

Для визначення розміщення трубопроводу та контролю стану його ізоляції застосовують вимірювання магнітного поля УКЗ [1], які суттєво підвищують оперативність та інформативність обстежень. Контролюють електрохімічний захист, як правило, контактними методами [2–4], які мають низку недоліків, пов'язаних зі забезпеченням великої кількості надійних контактів та їх нестабільністю і залежністю контактної різниці потенціалів від умов середовища і температури.

Менше розроблені для цього безконтактні вимірювання електричної складової поля, що актуально для підвищення оперативності та інформативності контролю катодного захисту від корозії металоконструкцій. Такі вимірювання стикаються з труднощами подолання високого рівня електромагнітних завад, які ство-

© Р. М. Джала, Я. Є. Підгірняк, 2016

рюють технічні об'єкти. Простим фільтруванням видобути сигнал із вимірюваного можливо тільки для завідомо високих рівнів корисного сигналу. Одним із методів підвищення чутливості вимірювань на фоні великих шумів є застосування синхронного детектування [5–7], при цьому відношення сигнал/шум досягає 80 дБ.

Мета роботи – створити безконтактні вимірювачі постійної і змінної компонент електричного поля підземного трубопроводу для діагностичних обстежень стану протикорозійного захисту металоконструкцій.

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

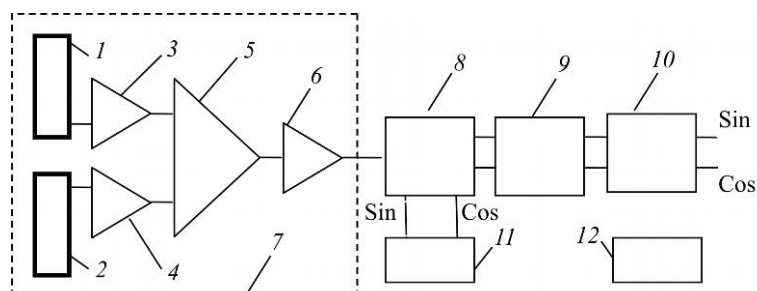


Рис. 1. Функціональна схема вимірювача електричного поля катодного захисту трубопроводу: 1, 2 – антена; 3 і 4 – попередні підсилювачі; 5 – суматор; 6 – підсилювач; 7 – герметичний діелектричний корпус; 8 – перемножувач; 9 – інтегратор; 10 – вихідний підсилювач; 11 – генератор квадратурних сигналів; 12 – живлення.

Схема працює так. Під дією електричного поля, збудженого струмом катодного захисту у трубопроводі, на антени 1, 2 наводиться напруга  $U$ , яка подається на попередні електрометричні підсилювачі 3 і 4, виходи яких з'єднані з суматором 5, вихід якого підключений до підсилювача 6. Елементи 1–7 функціональної схеми – попередній підсилювач, на виході якого є підсилений корисний сигнал, змішаний із завадами. Частота корисного сигналу 100 Гц [1], амплітуда –  $KU$ , де  $K$  – коефіцієнт передачі попереднього підсилювача.

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

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

де  $\omega_0$  – опорна частота,  $\omega$  – частота досліджуваного сигналу.

Результатом перемноження є гармонійний сигнал з сумарною та різницевою складовими. Якщо такий сигнал пропустити через фільтр нижніх частот 9 з частотою зрізу  $\omega_3 \leq \omega_0$ , то на виході одержимо тільки ті сигнали, частоти яких близькі до опорної (відрізняються від опорної частоти на величину, що не перевищує частоту зрізу фільтра).

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

$$x_1(t) = KU(\cos\varphi)/2.$$

Таким чином, вихідний сигнал пропорційний амплітуді вхідного та залежить від зсуву фаз  $\varphi$  між вимірюваним та опорним сигналами.

Якщо опорний сигнал  $\cos(\omega_0 t)$ , то на виході фільтра

$$x_2(t) = KU(\sin\varphi)/2.$$

Сигнали  $x_1(t)$  та  $x_2(t)$  пропорційні квадратурним складовим вимірюваного сигналу  $U$ . Вони дають змогу визначити окремо амплітуду  $s$  і фазу  $\varphi$  вимірюваного сигналу:

$$s^2 = x_1^2(t) + x_2^2(t), \quad \text{tg}\varphi = x_1(t)/x_2(t).$$

Квадратурні сигнали дають можливість побудувати вектор електричного поля катодного захисту. Крім того, фаза між квадратурними сигналами містить інформацію про електричні властивості середовища, що є додатковим інформативним параметром під час таких досліджень.

Якщо вимірюваний сигнал  $s(t)$  має неперервний спектр, то в результаті множення його на гармонійний опорний сигнал зсувається спектр по осі частот на величину рівну частоті опорного сигналу  $\omega_0$ , а фільтр вирізає із зсунутого сигналу область низьких частот  $\omega = \omega_0$ . Таким чином, синхронний детектор діє як смуговий фільтр налаштований на частоту опорного сигналу і має смугу пропускання рівну частоті зрізу фільтра нижніх частот.

Перемножувати сигнали у такому детекторі можна різноманітними способами і пристроями. Опорний сигнал не обов'язково повинен бути гармонійним, важливий тільки збіг частот опорного та досліджуваного сигналу. Зокрема, опорний сигнал у формі меандра спрощує перемноження сигналів. При цьому змінюємо знак опорного сигналу за 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, які лежать коло частот всіх гармонік опорного сигналу  $\omega_0$ ;  $2\omega_0$ ;  $3\omega_0$  і т. д. Це погіршує співвідношення сигнал/шум порівняно з детектором, у якому використовують гармонійний опорний сигнал. Це пояснюється тим, що на вихід детектора разом з вимірюваним сигналом попадають кратні гармоніки шуму та опорного сигналу, які у корисному сигналі відсутні. Цей недолік усувається попередньою фільтрацією сигналу селективним фільтром невисокої добротності, який усуває шуми та завади на кратних частотах.

**Реалізація вимірювача змінного поля.** У розробленій схемі перемноження вимірюваного сигналу на два квадратурні сигнали частотою 100 Гц відбувається на мікросхемі D1:AD630J\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 вимірюваним сигналом.

У цій схемі забезпечена чутливість до фази і амплітуди вимірюваного сигналу та висока частотна вибірковість. Це особливо важливо для виділення вимірюваного сигналу за високого рівня завад.

Передбачається, що корисний сигнал має вузьку смугу навколо нульової частоти  $\omega_0$ . Амплітуда сигналу співмірна з шумом, який займає ширшу частотну смугу.

На рис. 2 показано макетний зразок вимірювача змінної складової електричного поля катодного захисту трубопроводу. Попередній підсилювач конструктивно розміщений в антені. Живлення макетного зразка вимірювача автономне, від двох батарейок.

Вимірювач випробуваний у лабораторних та польових умовах з викори-

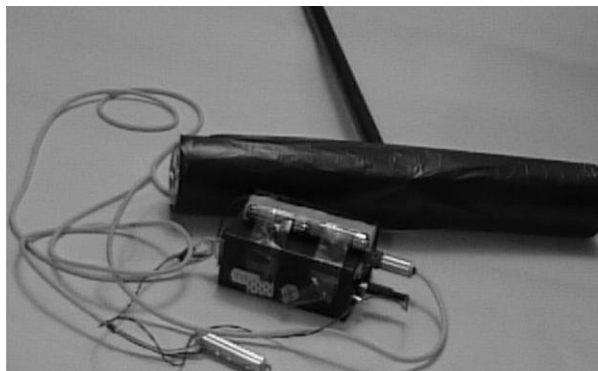


Рис. 2. Макетний зразок вимірювача змінної складової електричного поля.

станням стандартного аналого-цифрового перетворювача та ноутбука, що дало можливість унезалежити їх від індикаторів сигналу та блоків живлення. Одержано чіткі і надійні сигнали. У лабораторії поле моделювали за допомогою двох паралельних пластин, підключених до генератора з частотою 100 Гц. Напруженість модельованого поля змінювали у діапазоні від нуля до 1 В/м. Вимірювач добре реагує як на поле між пластинами, так і поза ними.

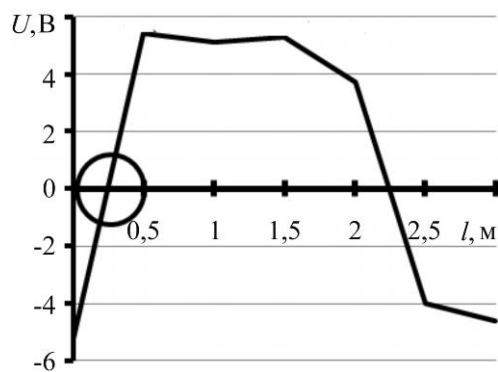


Рис. 3. Графік горизонтальної компоненти змінної складової електричного поля катодного захисту підземного трубопроводу.

На рис. 3 подано графік залежності зміни впоперек траси підземного трубопроводу горизонтальної компоненти електричного поля катодного захисту, одержаний під час натурних випробувань вимірювача. Польові випробування показали, що отримуємо надійний сигнал від електричного поля УКЗ трубопроводу. Горизонтальна складова електричного поля зафіксована над поверхнею землі у триметровій зоні від трубопроводу.

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

легко ідентифікувати вимірюваний сигнал шляхом незначної зміни опорного сигналу за різницевою частотою.

Між антеною та джерелом сигналу існує ємнісний зв'язок, що дає змогу розмістити антену та попередній підсилювач у герметичний діелектричний контейнер, який можна поміщати у воду. Таким чином, вимірювач електричного поля забезпечує вимірювання як під водою, так і в повітрі.

Для **вимірювань постійного електричного поля** катодного захисту розроблено вимірювач з перериванням вимірюваного сигналу. Його функціональна схема показана на рис. 4.

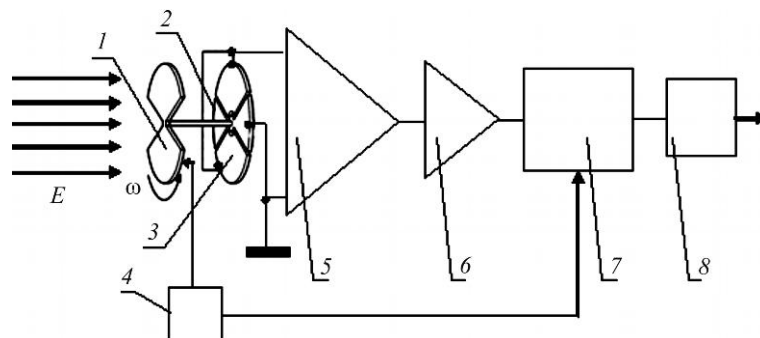


Рис. 4. Функціональна схема сенсора електричного поля трубопроводу:

1 – заземлений рухомий електрод; 2 і 3 – нерухомі електроди; 4 – індикатор обертання; 5 – вхідний підсилювач; 6 – підсилювач; 7 – синхронний детектор; 8 – вихідний підсилювач.

Форма електродів зрозуміла з рисунка. Рухомий електрод 1 та частина нерухомого електрода 2 з'єднані з електричною землею сенсора. Нерухомий електрод 3 під'єднано до входу попереднього електрометричного підсилювача 5, вихід якого підключено до входу підсилювача 6, сигнал з якого подається на вхід синхронного детектора 7, а на другий його вхід під'єднано вихід оптопарі індикатора обертання 4. Вихід синхронного детектора 7 підключено до вихідного підси-

лювача 8. Край рухомого електрода переміщується у зазорі оптопари. Рухомий електрод конструктивно розміщений на валу ротора мікроелектродвигуна, який за увімкненого стану сенсора живиться від акумулятора.

Внаслідок обертання рухомого електрода 1 змінюється частина площі  $S$  електрода 3, яка відкрита для електричного поля  $E$ . Під дією електричного поля з напруженістю  $E$  на незакритій частині нерухомого електрода 3 виникає заряд

$$q = \sigma ES,$$

який пропорційний до площі  $S$ ;  $\sigma$  – провідність середовища.

Густина заряду індукованого на нерухомому електроді 3 змінюється від 0 до максимального значення. Її амплітуда пропорційна напруженості вимірюваного постійного електричного поля, а знак визначається знаком електричного поля. Зменшення площі  $S$  нерухомого електрода 3 викликає стікання заряду  $q$  через опір вхідного підсилювача і зумовлює на ньому постійну напругу

$$U \sim dq/dt.$$

Знак цієї напруги залежить від того, заряджається чи розряджається електрод 3. Її амплітуда пропорційна напруженості вимірюваного поля, а частота відповідає швидкості обертання рухомого електрода. Крім того, амплітуда також пропорційна частоті обертання, оскільки похідна береться від гармонійної функції. Зміни заряду рухомого електрода в часі та напруги на ньому показано на рис. 5.

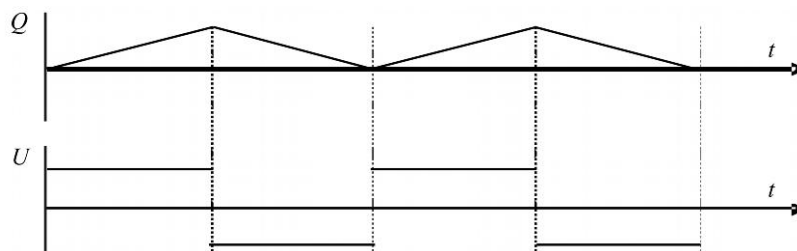


Рис. 5. Графіки зміни заряду та напруги на нерухомому електроді.

Реалізація функціональної схеми сенсора (див. рис. 4) забезпечує на виході попереднього підсилювача 5 прямокутні коливання, частота яких рівна частоті обертання рухомого електрода 1. Підсилена підсилювачем 6 напруга цих коливань подається на вхід синхронного детектора 7, на другий вхід якого подається напруга від оптопари індикатора коливань 4, яка має прямокутні коливання з частотою рівною частоті обертання електрода 1, а отже, частоті коливань на виході підсилювача 6. Внаслідок рівності частот напруг на обох входах синхронного детектора на його виході постійна [7] і пропорційна до напруженості вимірюваного електричного поля  $E$ , значення якого несе інформацію про стан протикорозійного захисту. Одержаний від оптопари сигнал має форму меандра, що спрощує перемноження сигналів [7].

**Реалізація вимірювача постійного поля.** У розробленій схемі вхідний підсилювач виконано на мікросхемі LT6013, синхронний детектор – на мікросхемі MAX453DESE, решта підсилювачів – AD630JAD.

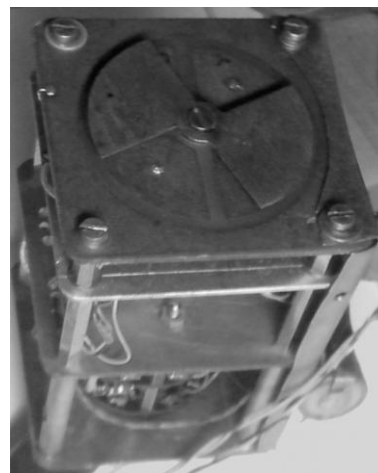


Рис. 6. Макетний зразок сенсора постійного електричного поля.

Описаний вимірювач (рис. 6) випробувано у лабораторних та польових умовах. Отримано чіткі сигнали від електричного поля катодного захисту вільні від завад, побудовано профіль горизонтальної складової постійного електричного поля катодного захисту над трубопроводом (рис. 7). Нульова напруженість поля катодного захисту виявлена над віссю трубопроводу для всіх профілів, знятих на різних висотах.

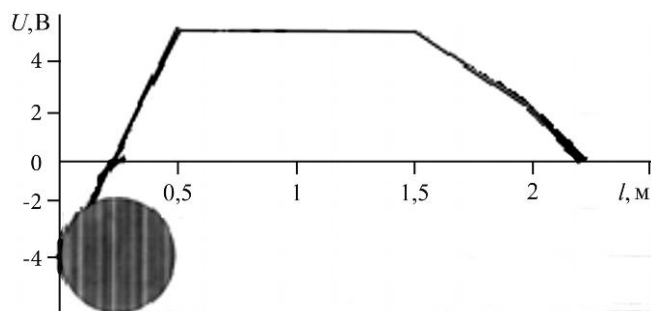


Рис. 7. Профіль горизонтальної складової електричного поля катодного захисту підземного трубопроводу над поверхнею землі.

Вимірювання постійної складової електричного поля катодного захисту дає змогу виявляти пошкодження ізоляції металоконструкцій та місця проникнення агресивного середовища до поверхні металу, що призводить до збільшення витрат струму катодного захисту, зменшує захищеність трубопроводу та термін його експлуатації.

#### ВИСНОВКИ

Запропоновано метод і засоби вимірювання постійного та змінного електричних полів у повітрі, які дають змогу розширити можливості контролю протикорозійного захисту магістральних трубопроводів, профілактики їх пошкоджень та аварій, продовжити термін безпечної експлуатації. У вимірювачах електричного поля обґрунтовано застосування синхронного детектування досліджуваного сигналу. Розроблені вимірювачі поля мають високу завадостійкість і можуть працювати за високого рівня промислових завад. Випробування пристрою у лабораторних і натурних умовах дали надійні, повторювані результати. Завдяки вимірюванню електричного поля відкрито нові можливості для діагностики стану протикорозійного захисту підземних трубопроводів.

1. Джала Р. М. Электромагнитные обтежения и контроль коррозии трубопроводов // Механика 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. – С. 263–330.
2. Кочанов Э. С., Зимин Е. Ф. Измерение электрического поля токов проводимости в сверхнизкочастотном диапазоне (Обзор) // Радиотехника и электроника. – 1982. – XXVII, вып. 7. – 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. – 512 с.
5. Плаксин И. И., Астахов Ю. А., Собисевич А. А. Модуляционный датчик электрического поля в проводящей среде // Тез. докл. VIII Всесоюз. сем. “Фундаментальные проблемы морских электромагнитных исследований”. – Звенигород, 1990. – С. 27–31.
6. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. – М.: Мир, 1983. – Т. 2. – 256 с.
7. Петин Г. Ключевой синхронный детектор // Схемотехника. – 2003. – № 3. – С. 1–6.

Одержано 26.10.2015