

УРАХУВАННЯ ЗМІННОЇ СКЛАДОВОЇ ПОТЕНЦІАЛУ ПІДЗЕМНИХ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ ПІД ЧАС РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ЇХНЬОГО ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ

О.О. Азюковський*, канд. техн. наук, Ю.А. Папайка**, докт. техн. наук, М.В. Бабенко***
НТУ «Дніпровська політехніка»,
пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, 49005, Україна, e-mail: azalex@nmu.one

Виконано огляд попередніх досліджень катодного захисту підземних сталевих трубопроводів від їхньої руйнації внаслідок виникаючих корозійних процесів. Приведено результати досліджень І.М. Францевича та його учнів і послідовників щодо впливу рівня катодної поляризації на інтенсивність реального руйнування сталевих трубопроводів. Додатково враховано вплив змінної складової потенціалу таких трубопроводів на інтенсивність корозії і надано оцінку критичних параметрів системи захисту підземних металевих трубопроводів за допомогою активних перетворювачів енергії. Досліджено можливі режими діючих комплексів захисту. Наведено аналітичні залежності визначення рівнів захисного потенціалу з урахуванням змінної складової в умовах неоднорідного середовища та різних варіацій топології прокладання системи трубопроводів. Отримані результати багатofакторного моделювання та моніторингу параметрів і характеристик системи катодного захисту дали змогу сформулювати енергетично і функціонально доцільні режими та забезпечити необхідну високую ефективність електротехнічного комплексу захисту підземних металевих трубопроводів. Бібл. 22, рис. 11.

Ключові слова: металеві підземні трубопроводи, електрохімічна корозія, катодний захист, моніторинг режимів захисту, аналітичні розрахунки рівня захисного потенціалу, змінна складова потенціалу.

Актуальність проблеми. Підземні металеві (у більшості випадків сталеві) трубопроводи та відповідні струмопровідні конструкції, які використовують для транспортування газу, нафти і води, з часом зазнають електрокорозійних руйнувань, пов'язаних з появою і розвитком так званих електрокорозійних процесів, які в Україні почали особливо інтенсивно досліджувати після будівництва і початку експлуатації в 1949 році газового трубопровода Дашава – Київ [1, 2]. Суттєвий позитивний внесок у вирішення складної науково-технічної проблеми захисту цього трубопроводу від електрокорозійних процесів його руйнації було внесено відомим фізхіміком і матеріалознавцем, академіком України І.М. Францевичем та його учнями і науковими послідовниками [1-4].

На даний час розрізняють ґрунтову електрокорозію струмопровідних поверхонь трубопроводів, зумовлену неоднорідністю металевих поверхонь і питомого опору ґрунту, що залежить від концентрації в ньому води, солей, кислот, лугів і навіть бактерій, які активізують розвиток процесів корозії; та корозію металевих поверхонь трубопроводів блукаючими струмами, які наводяться змінними струмами з металевих рельс електрифікованого транспорту через їхню недосконалу електроізоляцію від ґрунту та завдяки наявності порушень електричних контактів на рельсових стиках [5].

Критерієм небезпеки електрокорозії поверхні підземних металевих трубопроводів від блукаючих струмів є наявність позитивної або знакозмінної різниці потенціалів між трубопроводом і землею (тобто поява анодних і знакозмінних зон). Джерелами таких струмів у містах є рейкові шляхи електрифікованого транспорту (трамваїв, метро, електропоїздів) та промислові підприємства з потужним електрообладнанням, в якому виникають комутаційні, перехідні та інші нестаціонарні процеси. Особливо інтенсивні блукаючі струми можуть викликати електроімпульсні розрядні установки, що формують короткочасні уніполярні [6] та біполярні [7] розрядні імпульси великого струму (в тисячі ампер) [6, 7], величина якого може стохастично змінюватися [8]. Тому у разі прокладання підземного трубопроводу поблизу вказаних

© Азюковський О.О., Папайка Ю.А., Бабенко М.В., 2024

ORCID: *<https://orcid.org/0000-0003-1901-4333>; **<https://orcid.org/0000-0001-6953-1705> ;
***<https://orcid.org/0000-0003-2309-0291>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

типів джерел потужних електромагнітних впливів, які можуть суттєво посилювати корозійні процеси і руйнацію підземних металевих конструкцій, необхідно проводити оцінку їхнього технічного стану з урахуванням впливу блукаючих струмів на інтенсивність електрохімічної корозії [9, 10].

Зараз небезпека підвищення інтенсивності електрокорозії поверхні підземних металевих трубопроводів від блукаючих струмів зростає як в Україні, так і в інших країнах світу [11, 12]. Вона проявляється у виникненні позитивної або знакозмінної різниці потенціалів між трубопроводом і землею (тобто появою анодних і знакозмінних зон). Для захисту трубопроводів від такої руйнації найбільш доцільним є використання комбінованого методу створення ізоляційного покриття на їхній поверхні та здійснення катодної поляризації [13, 14]. Основним критерієм системи катодного захисту (СКЗ) вважається наявність поляризаційного потенціалу, який для сталі повинен знаходитись у межах від (-0,85) В до (-1,15) В відносно створеного анодного електроду [15]. Задля підтримання потенціалу металоконструкцій в слабо електропровідному середовищі використовують спеціалізоване електротехнічне обладнання. Це дає можливість контролювати та підтримувати електричний потенціал металевих поверхонь в необхідному діапазоні значень задля забезпечення захисту металу від корозії.

Наукові роботи з дослідження систем катодного захисту у більшості випадків розглядали електрохімічні та електрофізичні процеси у замкненій системі «трубопровід-СКЗ-анод» [15]. Окремі наукові школи займалися дослідженнями в області органічної хімії для розробки ефективних ізоляційних матеріалів ізоляції трубопроводів [15]. Достовірних моделей визначення залежностей захисного потенціалу сталевих трубопроводів, які враховують різноманітність режимів і схемних реалізацій катодних станцій, топології прокладки і геології ґрунтів, на жаль, поки що не існує. Особливо складні процеси корозії протікають в результаті дії змінної складової захисного потенціалу. Це виявили результати практичного моніторингу. Тому актуальною є задача врахування змінної складової сигналів на виході станцій катодного захисту, яка створює суперечливі залежності потенціалу у координаті відстані та ускладнює корозійну ситуацію.

Тому **метою даної роботи** було обґрунтування необхідності врахування змінної полігармонічної складової захисного потенціалу задля створення ефективних електротехнічних комплексів електрохімічного захисту.

Аналіз проблематики дослідження. Сучасні СКЗ створено за високочастотним принципом перетворення сигналу. На рис. 1 наведено інверторний високочастотний перетворювач. Головною їхньою перевагою є масо-габаритні характеристики, ККД та регульовальні характеристики, що дають змогу інтегрувати елементи комплексу до систем автоматичного керування процесами захисту від електрохімічної корозії. Високовольтний випрямляч (ВВ) здійснює перетворення напруги силовим частотним перетворювачем (СЧП) до змінної. Високочастотний трансформатор (ТВ) перетворює рівень напруги до потрібного значення. Низьковольтний випрямляч (ВН) приєднується до підземного сталевих трубопроводу та анодного заземлювача, створюючи захисний потенціал (полігармонічний) [16]. Змінна складова захисного потенціалу проявляється при комплексному захисті дистанції трубопроводу групою СКЗ з вентильними перетворювачами та наявності неоднорідностей на трасі прокладки. У деяких режимних точках вплив змінної складової виражається у неприпустимому рівні підвищення рівня захисного потенціалу, що призводить до стрімкої деградації металоконструкцій.

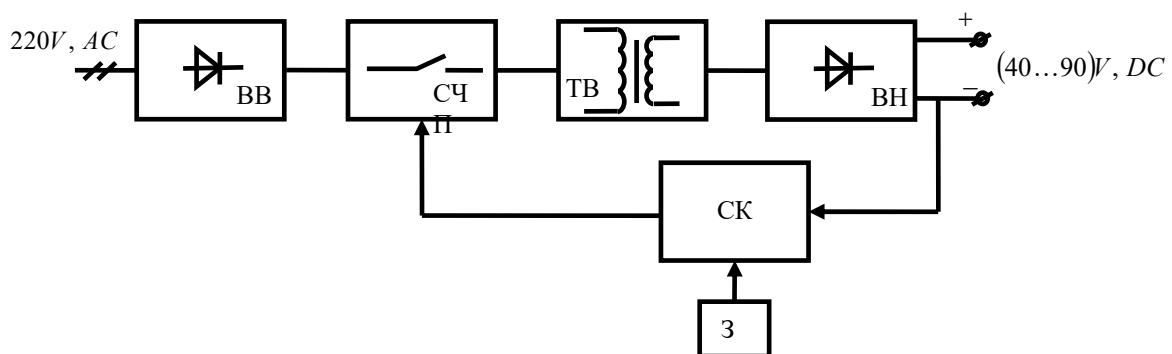


Рис. 1

Система керування (СК) відпрацьовує сигнал блока завдання (3) шляхом зміни параметрів комутації силових ключів у СЧП [17, 18].

Потенціал захисту вздовж трубопроводу характеризується експоненціальною залежністю [12]. Вона змінюється в межах мінімального значення у точці підключення станції катодного захисту сталевих підземних трубопроводів та максимального (природного) значення. Прийнято вважати: у зонах, де потенціал підземного сталевих трубопроводів дорівнює природному значенню, закінчується межа впливу станції катодного захисту, й сповільнення корозійних процесів не відбувається [12]. За цих умов інша частина трубопроводу лишається без захисту від електрохімічної корозії.

Відповідно до визнаних підходів у випадку, коли станції катодного захисту містять трансформаторну схему з діодним випрямлячем, на виході якого існують пульсації 100 Гц, вважають: у кожній точці за координатою "X" значення потенціалу за часом є незмінним [19].

Значне поширення отримали станції, що мають високочастотні перетворювачі. Це обумовлює

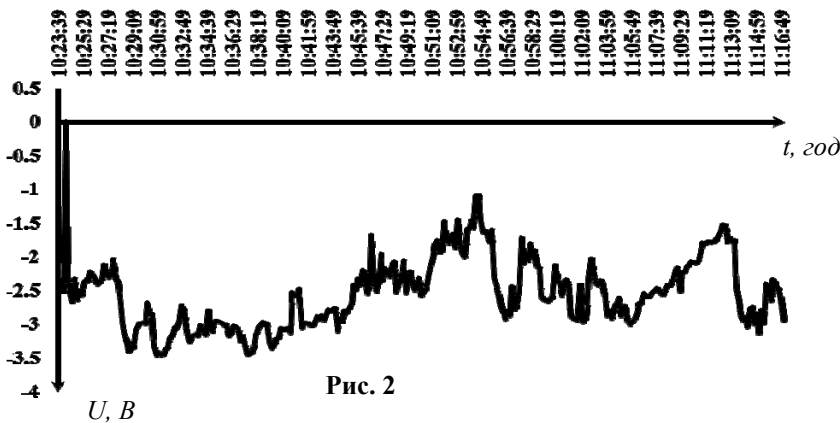


Рис. 2

дещо іншу залежність зміни потенціалу за часом на виході станції. На рис. 2 наведено потенціал підземного трубопроводу як результат сумісної роботи декількох станцій катодного захисту. У фіксованій за координатою "X" точці значення потенціалу має складну залежність, яка містить достатньо широкий спектр сигналу (рис. 3). Враховують, що струми під час протікання корозійних процесів досягають рівня мілі/мікро ампер, для виносу 1 г металу потрібен струм 0,1 мА протягом одного року. Тому амплітудне значення високочастотної складової сигналу СКЗ достатньо для значного погіршення корозійної ситуації. Виявляючи та оцінюючи вплив змінної (високочастотної) складової сигналу на виході станції, помітно покращується корозійна ситуація та подовжується термін експлуатації підземних сталевих трубопроводів. Без урахування змінної складової неможливо налаштувати сумісну роботу декількох СКЗ за наявності неоднорідностей у зоні прокладки.

Результати практичного моніторингу. Протягом кількох років науковці Дніпровської політехніки проводили експериментальні дослідження та реєстрували часові та координатні еволюції захисного потенціалу в різних умовах прокладки підземних газопроводів у Дніпропетровській області. Захисний потенціал підземного трубопроводу (рис. 2) має складну форму і є результатом одночасної сумісної діяльності декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем (без впливу блукаючих струмів). Досягають значення потенціалу: мінімальне (-3,46) В, максимальне (+0,001) В, середнє (-2,54) В. За умов забезпечення раціонального режиму захисту приймається середнє значення потенціалу. Такий рівень потенціалу прийнятний задля здійснення ефективного захисту від корозії, що підтверджують результати моделювання та багатфакторного моніторингу.

За умов врахування мінімального значення потенціалу досягаються надлишкова перекомпенсація та нераціональна витрата електричної енергії і матеріалу анодного заземлювача. Нерівномірність розподілення потенціалу за часом досить значна, містить як перевищення рівня (-0,55) В, так і позитивні значення. На рис. 3 показано критичні межі зміни захисного потенціалу підземного трубопроводу.

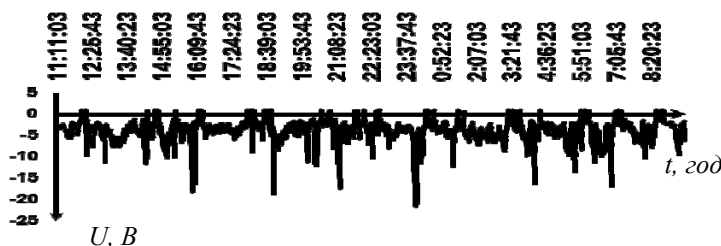


Рис. 3

Частота зміни потенціалу за часом знаходиться у діапазоні від низькочастотно-модульованого сигналу (10 Гц) до високочастотної складової (18 кГц) [14]. За результатами моніторингу отримано: амплітуда коливань потенціалу незначна (рис. 4), а частота зміни значень висока. Напряга на виході випрямляча пульсуюча. За активного навантаження форма зміни струму повторює форму напруги. Сучасні підземні трубопроводи з ізоля-

ційною оболонкою мають іншу схему заміщення, що містить реактивні елементи [19, 20]. Електромагнітні перехідні процеси обумовлюють відхилення сигналу, що сягає позитивного значення. На рис. 4, час 14:05:08 показано потенціал підземного трубопроводу, сформований сумісною роботою декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем.

У проміжки часу, коли захисний потенціал перевищує мінімально припустиме значення, підземний трубопровід лишається захищеною, а металева споруда є джерелом блукаючих струмів та активно руйнується. Тому, навіть за відсутності широкоамплітудних коливань потенціалу, фактичний корозійний стан відрізняється від очікуваного і запланованого.

Станція катодного захисту, що має керований тиристорний перетворювач, генерує періодичні сигнали (рис. 5 – сигнал на виході СКЗ з керованим тиристорним перетворювачем). Спектр такого сигналу містить частоти, що перевищують значення 4 кГц (рис. 6).

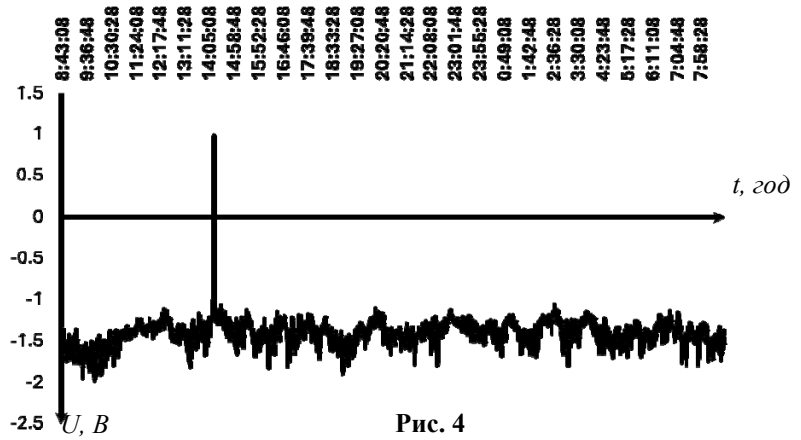


Рис. 4

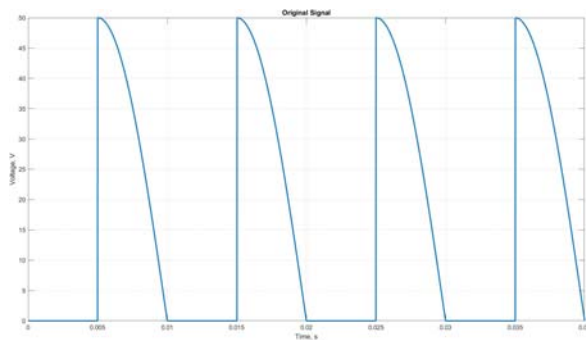


Рис. 5

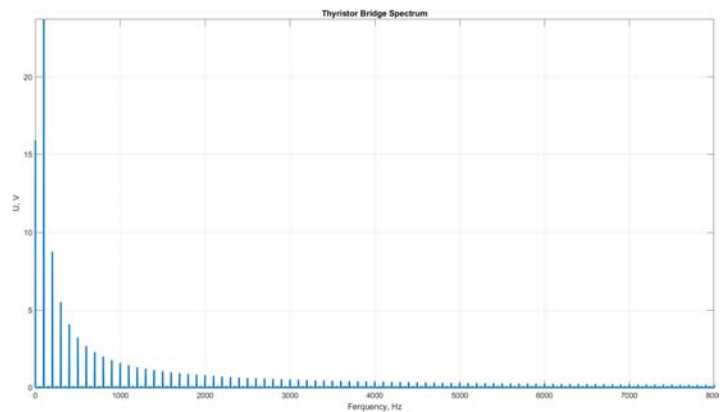


Рис. 6

Враховуючи стрімкий розвиток сучасної елементної бази, сьогодні активно використовуються СКЗ з більш складними алгоритмами перетворення енергії. Сигнал на виході таких станцій має інший вигляд (рис. 7) у порівнянні з тиристорними схемами. Спектр такого сигналу містить частоти, що перевищують 45 кГц (рис. 8). Доведено, що навіть незначні корозійні струми призводять до помітних втрат металу та викликають наскрізні корозійні пошкодження трубопроводів [21]. Наявність незначних, у порівнянні з основною амплітудою, змінних складових сигналу потребує їх врахування під час аналізу корозійної ситуації і розрахунку необхідної системи захисту.

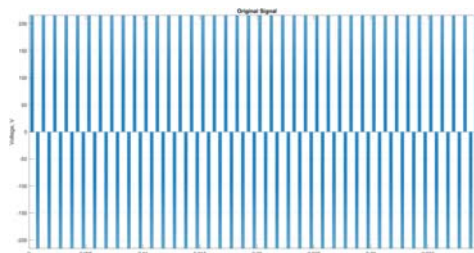


Рис. 7

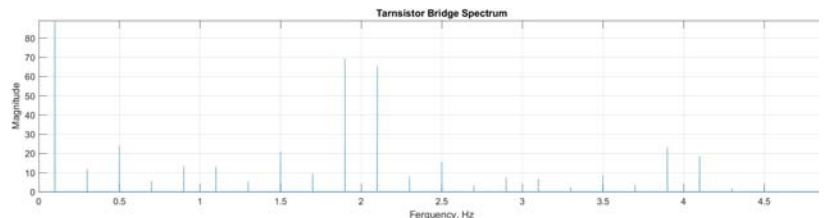


Рис. 8

Модельовання змінної складової захисного потенціалу. Розглянуто підземний трубопровід, що побудований на основі сталеві труби великої протяжності та розташований в слабкому

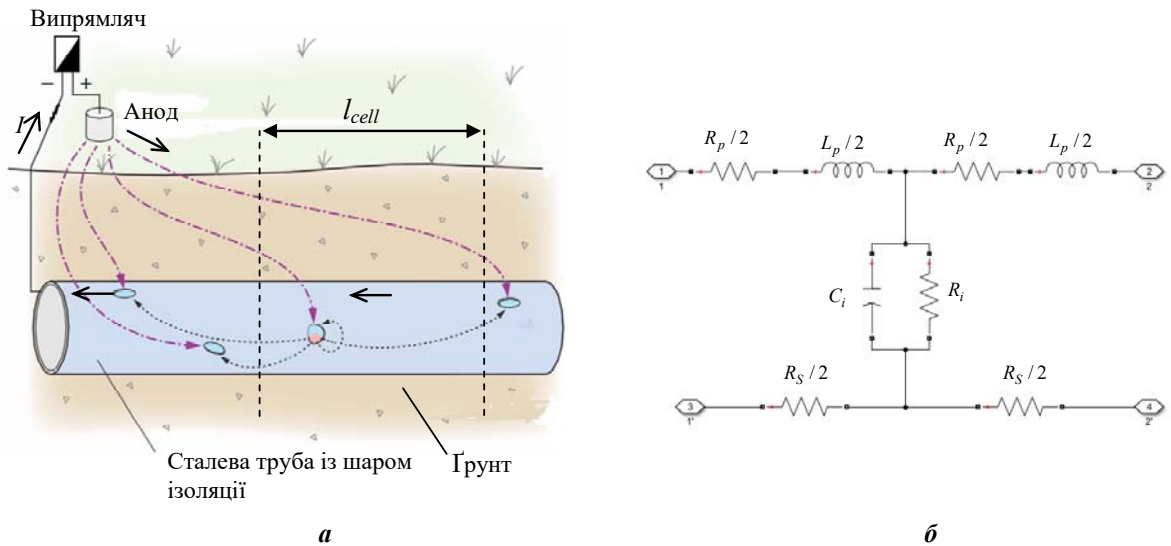


Рис. 9

електропровідному середовищі – ґрунті (рис. 9, а). Труба покрита шаром бітумної ізоляції для зменшення струмів в системі "труба – ґрунт" при застосуванні катодного захисту. На рис. 9, б – його розрахункова схема.

Внаслідок наявності дефектів в ізоляції електричний струм, що протікає між ґрунтом та трубою, має складну структуру з наявністю вищих гармонік. Катодний захист здійснюється за допомогою джерела постійного струму, від'ємний потенціал якого приєднується до поверхні труби, а позитивний – до спеціально створеного анода. Як результат, на трубі утворюється електричний потенціал, що змінюється від (-0,85) В до (-1,15) В та значно гальмує протікання корозійних процесів.

Задля отримання розрахункової схеми протяжного трубопроводу доцільно виділити елементарну комірку довжиною l_{cell} , для якої еквівалентне електричне коло має відповідну схему (рис. 9, б). Еквівалентна модель трубопроводу складається як послідовно з'єднані комірочки. Тоді загальна довжина трубопроводу $l_p = N l_{cell}$, де N – загальне число комірок. Схема містить наступні елементи, що відповідають довжині елементарної комірочки l_{cell} : R_p, L_p – активний опір та індуктивність труби, R_i, C_i – еквівалентний активний опір і ємність ізоляції труби, R_s – активний опір ґрунту.

Результати розрахунку розподілу електричного потенціалу вздовж трубопроводу (падіння напруги на ізоляції), з яким пов'язана координатна вісь x_p , демонструє рис. 10, а. Як видно, через розтікання електричного струму по трубі, електричний потенціал спадає у разі віддалені від точки

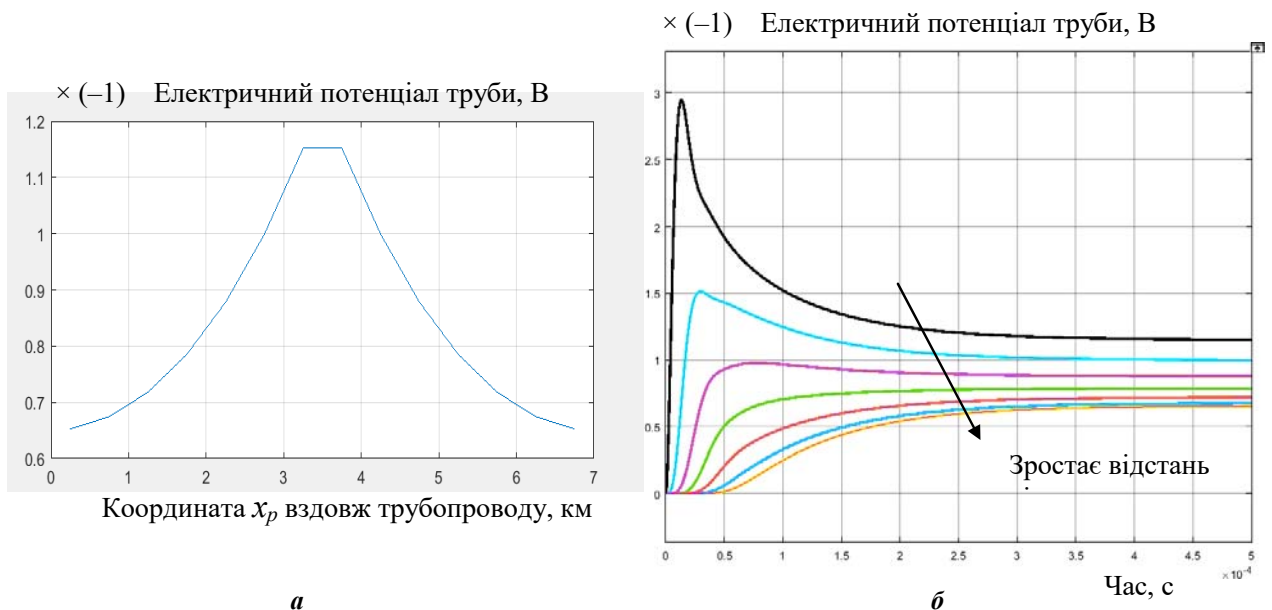


Рис. 10

підключення джерела живлення, на початку та в кінці трубопроводу має значення (-0,65) В. Необхідне значення потенціалу (-0,85) В.

Важливо оцінити електричний потенціал на різних ділянках труби при перехідному процесі та підключенні до труби джерела постійного струму (рис. 10, б). Максимальний стрибок потенціалу досягається у точці приєднання джерела до труби. Перехідний процес затухає майже за 0,4 мс. Це необхідно враховувати під час побудови системи керування пристроєм катодного захисту.

Визначено умови прокладки трубопроводу поблизу повітряної лінії електропередачі. У трубі будуть протікати одночасно два струми – постійний від пристрою катодного захисту та змінний із частотою 50 Гц (вплив повітряної лінії). Від співвідношення струмів, що змінюється на різних ділянках трубопроводу, залежать корозійні процеси в сталевій трубі. Наявність таких струмів доцільно враховувати на етапі проектування трубопроводу [22].

Аналітичні моделі визначення розподілу захисного потенціалу. Розглянуто порожню нескінченну підземну сталеву циліндричну трубу із зовнішнім радіусом $r=30$ мм і товщиною стінки $h_p=4$ мм, центр якої розташовано на глибині $H=1,5$ см. Труба знаходиться в однорідному ґрунті з електропровідністю $\sigma_s=2 \cdot 10^{-2}$ Ом⁻¹·м⁻¹. Досліджено монохроматичний випадок, коли параметри системи змінюються з частотою $f=25$ кГц. Ізоляція вважається достатньо якісною з питомим опором $R_i=10^6$ Ом·м. Константи загасання сталі та ґрунту розраховуються наступним чином [15]:

$$\gamma_{st} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_{st} \sigma_{st}}{2}}; \quad \gamma_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma_s}{2}}, \quad (1)$$

де $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м – константа; $\omega=2\pi f$ – кутова частота; $\mu_{st}=200$ – магнітна провідність сталі; σ_{st} – провідність сталі; $\sigma_{st}=1/\rho_{st}$, $\rho_{st}=1.3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м – питомий опір сталі.

Імпеданс труби Z , перехідний опір R_t і постійна поширення α

$$Z = \frac{\omega \mu_0}{8} + i \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{1,3}{\gamma_s r} \right) + \frac{(1-i)\gamma_{st}}{2\pi r \sigma_{st}} \cot((1-i)\gamma_{st} h_p);$$

$$R_t = R_i + \frac{1}{\pi \sigma_s} \ln \left(\frac{1,12}{\gamma_s \sqrt{rH}} \right); \quad \alpha = \sqrt{\frac{Z}{R_t}}. \quad (2)$$

Враховуючи вимоги безперервності потенціалу очевидно, що експоненційне зростання неможливе за $z \rightarrow \pm\infty$. Тому комплексна амплітуда потенціалу

$$U(z, t) = \text{Re}(V(z) e^{i\omega t}) = \begin{cases} U_1(z, t), z < 0 \\ U_2(z, t), z \in [0, L], \\ U_3(z, t), z > L, \end{cases} \quad (3)$$

де маємо

$$U_1(z, t) = \frac{R_t}{R_{s-st1}} V_{a1} e^{\alpha_1 z} \cos[\omega t + \alpha_2 z + \varphi_1];$$

$$U_2(z, t) = V_{a1} \frac{R_t}{R_{st-s1}} \frac{h(L-z)}{h(L)} \cos[\omega t + g(L-z) - g(L) + \varphi_1] +$$

$$+ V_{a2} \frac{R_t}{R_{st-s2}} \frac{h(z)}{h(L)} \cos[\omega t + g(z) - g(L) + \varphi_2];$$

$$U_3(z, t) = \frac{R_t}{R_{s-st2}} V_{a2} e^{\alpha_1(L-z)} \cos[\omega t + \alpha_2(L-z) + \varphi_2],$$

де

$$h(z) = \sqrt{\cosh(2\alpha_1 z) - \cos(2\alpha_2 z)}, \quad g(z) = \text{atan}[\cosh(\alpha_1 z) \sin(\alpha_2 z), \sinh(\alpha_1 z) \cos(\alpha_2 z)].$$

Функція $U(z, t)$ істотно відрізняється у випадках, коли станції мають рівні або протилежні фази: рис. 11, а – залежність потенціалу для $\varphi_1=\varphi_2=0$, б – $\varphi_1=0$, $\varphi_2=\pi$. Залежності отримані за умов $u_1=u_2=0,1$ м, $L=3$ км.

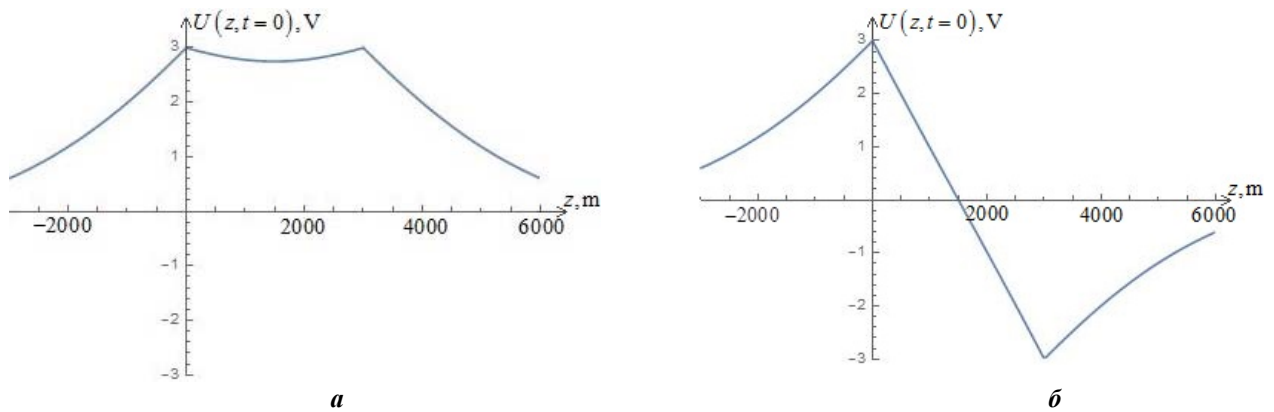


Рис. 11

Висновки.

1. Незважаючи на наявність багатьох досліджень у науковому напрямку розробки та створення електротехнічних комплексів та систем активного електрохімічного захисту підземних металевих трубопроводів, на даний час поки що відсутні адекватні методи і методики визначення та реалізації сукупності необхідних і достатніх параметрів та закономірностей їхнього керування (регулювання), здатних враховувати наявну сукупність детермінованих і стохастичних факторів прокладання та умов надійної і тривалої експлуатації таких трубопроводів.

2. Задля розробки і створення надійних і енергоефективних електротехнічних комплексів активного катодного захисту підземних металевих трубопроводів необхідно одночасно враховувати режимні особливості формування змінної складової захисного потенціалу, електрофізичні особливості таких трубопроводів та їхньої електроізоляції і складної топології приєднання станцій. Це дає змогу підвищувати точність прогнозування рівнів захисного потенціалу з точковими неоднорідностями середовища прокладання підземних металевих трубопроводів.

3. Результати практичного моніторингу рівнів захисного потенціалу на реальних об'єктах газотранспортної системи України зазвичай дозволяють виявляти амплітудні зони відхилення потенціалу від припустимих значень. Це обґрунтовує необхідність урахування полігармонічного спектру вихідного сигналу катодних станцій задля розробки методики вибору кількості, потужності та кроків приєднання захисних станцій до трубопроводу.

4. Запропонований підхід до розрахунку електричних процесів у підземному трубопроводі з використанням комп'ютерного моделювання за умов впливу повітряної лінії електропередачі забезпечує виявлення режимних зон з неприйнятними рівнями потенціалу, які призводять до передчасного витoku металу з трубопроводу.

5. Досягнення мети створення безпечних умов функціонування підземних сталевих трубопроводів можливо шляхом розробки нових принципів моделювання рівнів змінної складової полігармонічного сигналу на виході СКЗ. Адекватність отриманих математичних моделей доведено результатами комплексного моніторингу режимних параметрів електротехнічних комплексів захисту у польових умовах.

1. Францевич И.Н., Хрущева Е.В., Францевич-Заблудовская Т.Ф. Катодная защита магистральных газопроводов. Киев: Изд-во АН УССР. 1959. 80 с.

2. Францевич И.М., Горбачев Ю.А., Гримайловський В.О. Про деякі результати 20-річного комплексного захисту магістрального газопроводу Дашава – Київ від корозії. Вісник АН УРСР. 1975. № 10. С. 67–73.

3. Францевич И.Н., Остапенко В.Н., Лукович В.В. К расчету параметров электрозащиты трубопроводов от коррозии. Препринт №4. Институт проблем материаловедения АН УССР. Киев. 1985. 14 с.

4. Остапенко В.Н., Ягупольская Л.Н., Лукович В.В., Кохановский И.Н., Егоров Е.В., Кузьменко Ю.А., Калькутин Ю.Г. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии. Киев: Наукова думка, 1988. 192 с.

5. Ратушняк Г.С., Ободянська О.І. Оцінка технічного стану сталевих підземних газопроводів з врахуванням впливу блукаючих струмів на інтенсивність електрохімічної корозії. *Нова тема*. 2011. № 3(29). С. 42–43.

6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 3. С. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.043>

7. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the formation of multi-channel pulse currents and fast-migrating electric sparks in the layer of current-conducting granules of electric-discharge installations. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.003>
8. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Probabilistic properties of electrical characteristics of capacitor charge circuit with stochastic active resistance. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.014>
9. Ратушняк Г.С., Ободяньська О.І. Корозійно-діагностичний моніторинг підземної сталеві газотранспортної мережі. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. № 1 (5). С. 90–98.
10. Ободяньська О. І., Коваль О. І. Засоби захисту підземних газопроводів від корозії. Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/7051>. (дата звернення 21.03.2024)
11. Wang, Chengtao & Li, Wei & Wang, Yuqiao. A probabilistic-based model for dynamic predicting pitting corrosion rate of pipeline under stray current interference. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021. Vol. 1. Issue 3, Pp. 339-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.09.003>.
12. Стрілецький Ю. Й., Боднар Р. Т. Аналіз розподілу напруженості магнітного поля в результаті протікання струму в стінках підземних трубопроводів. *Методи та прилади контролю якості*. 2007. No. 1(18). Pp. 36–40.
13. Mujezinovic A., Turkovic I. Review on cathodic protection system modelling. *B&H Electrical Engineering*. 2017. No. 11. Pp. 81-91.
14. Alhaboubi, Naseer. Simulation of Cathodic Protection System Using Matlab. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. No 14. Pp. 25-37.
15. Mohamad Oghli, Hamed & Akhbari, Mahdi & Kalaki, Ali & Eskandarzade, Mehdi. Design and analysis of the cathodic protection system of oil and gas pipelines, using distributed equivalent circuit model.. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103701>
16. Angst, Ueli. A Critical Review of the Science and Engineering of Cathodic Protection of Steel in Soil and Concrete. *Corrosion*. 2019. Vol. 75. No 12. Pp. 1420–1433. DOI: <https://doi.org/10.5006/3355> .
17. Kosobudzki G., Rogoza, M., Lysenko O., Papaika Y. Frequency and Parametric Characteristics of Direct Current Pulse Conversion Filter of a Contactless Locomotive. *14 th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*, Szczecin, Poland, 2018. <https://doi.org/10.1109/WZEE.2018.8748987>.
18. Pivnyak G., Azukovskiy O., Papaika Yu., E. Careres Cabana, Olczak P., Dyczko A. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. *Rynek Energii*. 2021. No 4(155). Pp. 75-84.
19. Aziukovskyi O. O., Tsyplenkov D. V. Forming the current of underground metal pipelines by the high-frequency components of cathodic stations output signal. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2015. № 94. С. 123-129.
20. Aziukovskyi O.O., Papaika Yu.A., Gorev V.N., Babenko N.V. Regulations of the formation of protective potential of underground steel pipelines under conditions of heterogeneous environment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 2. Pp. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.023>
21. Underground pipeline corrosion detection, analysis and prevention. Ed. by Mark E. Orazem Elsevier, 2014, 343 p.
22. Ahmed N.E.I. Ayad, Wafa Krika, Houari Boudjella, Farid Benhamida, Abdessamad Horch. Simulation of the electromagnetic field in the vicinity of the overhead power transmission line. *European Journal of Electrical Engineering*. February. 2019. Vol. 21. No. 1. Pp. 49-53. DOI: <https://doi.org/10.18280/ejee.210108>.

CONSIDERATION OF THE VARIABLE STORAGE POTENTIAL OF UNDERGROUND STEEL PIPELINES IN THE DEVELOPMENT OF ELECTRICAL COMPLEXES FOR THEIR PROTECTION AGAINST ELECTROCHEMICAL CORROSION

O.O. Aziukovskyi, Yu.A. Papaika, M.V. Babenko

Dnipro University of Technology,

Dmytro Yavornytskyi ave., 19, Dnipro, 49005, Ukraine, E-mail: azalex@nmu.one

The paper analyzes the problem of protection of underground metal pipelines using active cathodic protection. Shortcomings and emergency situations of active defense complexes are given. Analytical dependences of determining the levels of the protective potential in the conditions of a heterogeneous environment, various variations of the topology of laying the pipeline system are generally presented. The results of comprehensive monitoring of the operation modes of electrotechnical complexes of electrochemical protection allowed to develop a universal methodology for creating energy-efficient and reliable systems of cathodic protection of pipelines. References 22, figures 11.

Key words: metal underground pipelines, electrochemical corrosion, cathodic protection, monitoring of protection modes, analytical calculations of the protective potential level.

1. Frantsevich I.N., Khrushcheva E.V., Frantsevich-Zabludovskaya T.F. Cathodic protection of main gas pipelines. Kyiv: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. 1959. 80 p. (Rus)
2. Frantsevich I.M., Gorbachev Yu.A., Hrymailovskiy V.O. About some results of the 20-year comprehensive protection of the main gas pipeline Dashava - Kyiv from corrosion. Bulletin of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. 1975. No. 10. Pp. 67–73. (Rus)
3. Frantsevich I.N., Ostapenko V.N., Lukovych V.V. To calculate the parameters of electrical protection of pipelines from corrosion. Preprint 4. Institute of Materials Science Problems of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Kiev. 1985. 14 p. (Rus)
4. Ostapenko V.N., Yagupolskaya L.N., Lukovych V.V., Kokhanovsky I.N., Egorov E.V., Kuzmenko Yu.A., Kalkutin Yu.G. Electrochemical protection of pipelines from corrosion. Kyiv: Naukova dumka, 1988. 192 p. (Rus)
5. Ratushnyak G.S., Obidyanska O.I. Assessment of the technical condition of steel underground gas pipelines, taking into account the influence of stray currents on the intensity of electrochemical corrosion. *Nova tema*. 2011. No. 3(29). Pp. 42–43. (Ukr)
6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 43–47. <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.043>
7. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the formation of multi-channel pulse currents and fast-migrating electric sparks in the layer of current-conducting granules of electric-discharge installations. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 3–9. <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.003>
8. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Probabilistic properties of electrical characteristics of capacitor charge circuit with stochastic active resistance. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 14–17. <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.014>
9. Ratushnyak G.S., Obidyanska O.I. Corrosion-diagnostic monitoring of the underground steel gas transport network. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. 2017. No. 1 (5). Pp. 90–98. (Ukr)
10. Obidyanska O. I., Koval O. I. Means of protection of underground gas pipelines against corrosion. Materials of the *XLVIII scientific and technical conference of VNTU divisions*, Vinnytsia, March 13-15, 2019. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/7051>. (available at 21.03.2024) (Ukr)
11. Wang, Chengtao & Li, Wei & Wang, Yuqiao. (2021). A probabilistic-based model for dynamic predicting pitting corrosion rate of pipeline under stray current interference. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021. Vol. 1. Issue 3, Pp. 339-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.09.003>.
12. Striletskyi Yu. Y. and Bodnar R. T. Analysis of magnetic field strength distribution as a result of current flow in the walls of underground pipelines. *Metody ta prylady kontroliu iakociti*. 2007. No. 1(18). Pp. 36–39. (Ukr)
13. Mujezinovic, Adnan & Turkovic, Irfan. Review on cathodic protection system modelling. *B&H Electrical Engineering*. 2017. Vol. 11. Pp. 81-91.
14. Alhaboubi, Naseer. Simulation of Cathodic Protection System Using Matlab. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. No 14. Pp. 25-37.
15. Mohamad Oghli, Hamed & Akhbari, Mahdi & Kalaki, Ali & Eskandarzade, Mehdi. Design and analysis of the cathodic protection system of oil and gas pipelines, using distributed equivalent circuit model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. Vol. 84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103701>
16. Angst, Ueli. A Critical Review of the Science and Engineering of Cathodic Protection of Steel in Soil and Concrete. *Corrosion*. 2019. Vol. 75. No 12. Pp. 1420–1433. DOI: <https://doi.org/10.5006/3355>.
17. Kosobudzki G., Rogoza, M., Lysenko O., Papaika Y. Frequency and Parametric Characteristics of Direct Current Pulse Conversion Filter of a Contactless Locomotive. *14 th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*, Szczecin, Poland, 2018. <https://doi.org/10.1109/WZEE.2018.8748987>.
18. Pivnyak G., Azukovskiy O., Papaika Yu., E. Careres Cabana, Olczak P., Dyczko A. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. *Rynek Energii*. 2021. No 4(155). Pp. 75-84.
19. Aziukovskiy O. O., Tsyplenkov D. V. Forming the current of underground metal pipelines by the high-frequency components of cathodic stations output signal. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka*. 2015. No 94. Pp. 123-129.
20. Aziukovskiy O.O., Papaika Yu.A., Gorev V.N., Babenko N.V. Regulations of the formation of protective potential of underground steel pipelines under conditions of heterogeneous environment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 2. Pp. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.023>
21. Underground pipeline corrosion detection, analysis and prevention. Ed. by Mark E. Orazem Elsevier, 2014, 343 p.
22. Ahmed N.E.I. Ayad, Wafa Krika, Houari Boudjella, Farid Benhamida, Abdessamad Horch. Simulation of the electromagnetic field in the vicinity of the overhead power transmission line. *European Journal of Electrical Engineering*. February. 2019. Vol. 21. No. 1. Pp. 49-53. DOI: <https://doi.org/10.18280/ejee.210108>.

Надійшла 30.04.2024
Остаточний варіант 29.07.2024