

3. Papaika Yu. Power Quality and Resonances in Power Supply Systems with non-sinusoidal Loads / Yu. Papaika, G. Kosobudzki, A. Lysenko // Advanced engineering forum, Trans Tech Publication, Switzerland, 2017, pp. 143-150.
4. Пивняк Г.Г. Расчеты показателей электромагнитной совместимости: учеб. Пособие / Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В., Папаика Ю.А.; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 113 с.
5. Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В., Папаика Ю.А., Лысенко О.И. Интергармоники в системах электроснабжения – Научный словарь НГУ, 2017 – №6.
6. Pivnyak G. G. Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise electric power supply / G. G. Pivnyak, I. V. Zhezhelenko, Yu. A. Papaika // Науковий вісник НГУ. - 2016. - № 5. - С. 62 - 66.
7. Pivnyak G.G. Transients in Electric Power Supply Systems: textbook for students of higher educational institutions / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Y.A. Papaika; under the editorship of Academician of National Academy of Sciences of Ukraine Professor G.G. Pivnyak. – Switzerland: TTP. – 2016 – 382 p.p.
8. Жежеленко И.В. Оценочные методы определения экономического эквивалента реактивной мощности / И.В. Жежеленко, Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 98. – С. 3-6.
9. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк, Ю.С. Саенко, Н.А. Нойбергер. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
10. G. Pivnyak, M. Rogoza, Yu. Papaika A. Lysenko. Traction and energy characteristics of no-contact electric mining locomotives with AC current thyristor converters. - CRC Press/Balcema – Taylor & Francis Group: Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. - Leiden, The Netherlands, 2015 annual publication. – p. 1-6.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

УДК 652.1:586.24

О.О. Азюковський, канд. техн. наук

(Україна, м. Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

ЗАХИСНИЙ ПОЛІГАРМОНІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПІДЗЕМНИХ МЕТАЛЕВИХ КОМУНІКАЦІЙ

Анотація. В роботі виконано аналіз захисного потенціалу підземного сталевих трубопроводу. Звернута увага, що зміна в часі захисного потенціалу за умови одночасної роботи декількох станцій катодного захисту відрізняється від очікуваного. Наведені осцилограми свідчать про наявність значних збурень, що впливають на електротехнічні процеси в електротехнічній системі «станція катодного захисту - підземний трубопровід - ґрунт». Доведено, що середнє значення захисного потенціалу не є вичерпною характеристикою корозійної ситуації. Зроблено висновок, що покращення корозійної ситуації забезпечується шляхом мінімізації коливань значень потенціалу за довжиною трубопроводу й, одночасно, за часом в наслідок встановлення залежностей між електротехнічними параметрами системи «станція катодного захисту – підземний металевий трубопровід – ґрунт» і її режимами роботи.

Ключові слова: електрохімічна корозія, електрохімічний захист, підземний сталевий трубопровід; полігармонійний сигнал.

Аннотация. В работе выполнен анализ защитного потенциала подземного стального трубопровода. Обращено внимание, что изменение во времени защитного потенциала при условии одновременной работы нескольких станций катодной защиты отличается от ожидаемого. Приведенные осциллограммы свидетельствуют о значительных возмущающих воздействиях, влияющих на электротехнические процессы в электротехнической системе «станция катодной защиты – подземный трубопровод – ґрунт». Доказано, что среднее значение защитного потенциала не является исчерпывающей характеристикой коррозионной ситуации. Сделан вывод, что улучшение коррозионной ситуации возможно путем минимизации колебаний значений потенциала по длине трубопровода и, одновременно, по времени на основе установления зависимостей между электротехническими параметрами системы «станция катодной защиты - подземный металлический трубопровод - почва» и ее режимами работы.

Ключевые слова: электрохимическая коррозия, электрохимическая защита; подземный стальной трубопровод; полигармонический сигнал.

Abstract. In the paper the analysis of protective potential of the underground steel pipeline is executed. It is noted, that the law of change in the protective potential in the time under the condition of simultaneous operation of several cathodic protection stations is different from the expected one. The given oscillograms testify to significant disturbing influences affecting the electrical processes in the electrotechnical system “cathodic protection station - underground pipeline - ground”. It is proved that the average value of the protective potential is not an exhaustive characteristic of the corrosion situation. It was concluded that improvement of the corrosion

situation is possible by minimizing fluctuations of the potential values both: along the pipeline length and in the time, on the basis of the establishment of dependencies between the electrical parameters of the "cathodic protection station - underground metal pipeline - soil" system and its operating modes.

Keywords: *electrochemical corrosion, electrochemical protection; underground steel pipeline; polyharmonic signal*

Постановка проблеми та її зв'язок з прикладними задачами

Електрохімічний захист підземних сталевих трубопроводів забезпечує їх цілісність. Трубопровідний транспорт є одним з найбільш ефективних транспортних систем. Єдиною особливістю такої системи є той фактор, що будь-яке порушення цілісності у будь-якому місці унеможливає транспортування речовини. Втрата речовини, що транспортується є неприйнятною не стільки через економічні збитки, скільки через шкоду, що наноситься навколишньому середовищу. Сталеві підземні трубопроводи мають багаторічний ресурс за умов належної роботи системи електрохімічного захисту. Саме електрохімічна корозія є тим фактором негативного впливу, що зумовлює надійність та термін роботи сталевих трубопроводів транспорту. В Україні трубопровідними системами транспортуються газ, вода, аміак тощо. Всі ці речовини є або агресивними по відношенню до навколишнього середовища та небезпечними для життя людини (аміак, природний газ), або такими, що формують потенційно небезпечні техногенні гідрологічні ситуації – зсуви ґрунту тощо. Сьогодні практично відсутні системи підземних сталевих газопроводів, що не мають протикорозійного захисту. У домінуючій кількості випадків це активні системи електрохімічного захисту. Ці системи складаються із джерела живлення постійного струму, анодного пристрою та контактної вузла, що з'єднує джерело живлення із підземним трубопроводом. Сьогодні підходи розрахунку системи протикорозійного захисту оперують струмами та напругами, що розглядаються як постійні. Водночас, системи високочастотних силових перетворювачів, що входять до складу систем катодного захисту мають на своєму виході сигнал, який відрізняється від постійного. Визначення ступеню впливу сучасних схемотехнічних підходів до створення станцій катодного захисту на формування потенціалу захисту підземного сталевих трубопроводів є важливою на актуальною задачею.

Результати досліджень. Газопровідна система як цілісна мережа трубопроводів підземного та надземного розташування складається із ділянок з різним віком експлуатації – від понад 50 років до сьогоденних. За тиском класифікують газопроводи:

- низького тиску – до 0,05 кг/см²;
- середнього тиску – від 0,05 до 3 кг/см²;
- високого тиску – від 3 до 6 кг/см².

Газопроводи низького тиску є найбільш поширеними. Живлення переважної більшості споживачів невеликих домогосподарств здійснюється саме газом низького тиску. Середній тиск використовується для газопостачання багатоквартирних високоповерхових будинків та промислових об'єктів. Високий тиск переважною більшістю використовується у магістральних газогонях для транспортування знаних об'ємів газу. Для магістральних газопроводів високого тиску окрім здатності витримувати тиск газу, що транспортується є важливим забезпечення механічних вимог щодо міцності та стійкості до можливих рухів середовища закладання трубопроводу. Для мережі середнього тиску газу також є актуальним подібні вимоги. Мережа низького тиску, як зазвичай складається із тонкостінних сталевих трубопроводів. Вимоги до механічних характеристик подібних систем транспортування не є високими. Це зумовлюється тією обставиною, що топологія газогонів низького тиску складається ділянок, довжина яких від однієї точки розгалуження до іншої є від декількох десятків метрів до декількох кілометрів кожна. Головним матеріалом для виготовлення труб є сталь. Сталеві трубопроводи є більш стійкими до механічних та температурних навантажень, на них значно меншою мірою впливає сонячне світло (ультрафіолет). Для систем високого тиску та трубопроводів, що розташовані на поверхні землі сталеві труби є практично безальтернативними. Головні недоліки сталевих трубопроводів це складність їх монтажу, низька корозійна стійкість та невисока гнучкість (останнє компенсується здатністю витримувати високі механічні навантаження).

Широке використання отримують поліетиленові труби, особливо у мережі газопроводів низького тиску. Головними перевагами таких трубопроводів є висока корозійна стійкість, гнучкість, здатність витримувати високодинамічні зміни тиску (але не механічні навантаження вздовж осі лінії газогону), вища (до 30 відсотків) пропускна здатність внаслідок більш гладкої внутрішньої поверхні труб. Головним недоліком, що значно обмежує їх використання являється низька резистентність до впливу ультрафіолету – це ускладнює перехід поверхнею землі. Крім того, для підземних газопроводів є необхідним контроль цілісності газопровідної системи. Це важливо зважаючи на безпеку повітряно-газової суміші, що здатна до горіння та вибуху. Системи комплексного приладного обстеження розраховані на використання засад теоретичних основ електротехніки й спираються на результати вимірювання електричних величин. Результати вимірювання цих значень характеризують корозійну безпеку.

Результати досліджень. Формування захисного потенціалу забезпечується струмом, що натікає на трубопровід. Щільність струму обмежується задля уникнення процесів перекомпенсації, що супроводжуються руйнуванням ізоляційного покриття. Це у свою чергу зумовлює обмеженість зони впливу однієї стації катодного захисту (рис. 1). Під час розрахунку системи протикорозійного захисту прийнято

$$u(x) = u_0 e^{-\gamma x}$$

$$i(x) = i_0 e^{-\gamma x}, \text{ де } \gamma = \sqrt{rg}$$

вважати, що потенціал захисту є сталою величиною, яка змінюється за законом - потенціал по відношенню до віддаленої точки, i_0 - струм в підземній споруді в місці підключення катодної установки, $u_0 = i_0 \sqrt{\frac{r}{g}}$ - напруга безпосередньо на виході стації катодного захисту і яка є рішен-

ням системи рівнянь $-\frac{du}{dx} = ri$, де, у свою чергу r - повздовжній опір підземної споруди; g - провідність ізоляції зовнішнього покриття підземної споруди; u та i - потенціал відносно до віддаленої точки землі та струм споруди [1].

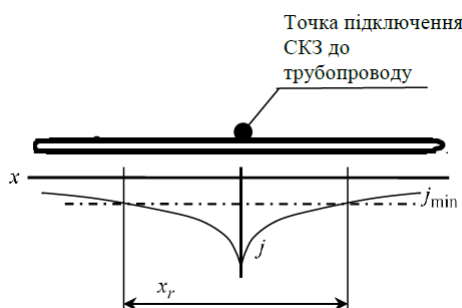


Рис. 1 Розподіл потенціалу за довжиною трубопроводу

Мінімальне значення щільності струму зумовлене необхідністю забезпечення зсуву потенціалу підземного трубопроводу по відношенню до потенціалу навколишнього середовища у негативному напрямку. Під час розрахунку системи протикорозійного захисту оперують зі сталими значеннями потенціалу або струму у будь якій точці вздовж трубопроводу. Під час розрахунку систем катодного захисту зважають на мінімальне припустиме значення захисного потенціалу $E_m = u_0 e^{-\gamma l_1}$, (l_1 = довжина ланки, що захищається в одну сторону від точки підключення стації катодного захисту, тобто вся довжина ланки, що захищається - $L = 2l_1$, $u_0 = E_m e^{\gamma l_1}$). Мінімальний струм захисту i_0 визначається

$$i_0 = \frac{E_m}{\sqrt{\frac{r}{g}}} e^{\gamma l_1} = \frac{\gamma}{r} E_m e^{\gamma l_1} \quad [1].$$

Однак, випадки, в яких для захисту підземної металевої споруди (особливо підземних трубопроводів) використовують тільки одну стацію катодного захисту (СКЗ) – є досить унікальними. Зазвичай, через значну довжину підземних комунікацій використовують декілька стацій катодного захисту (рис. 2).

Захисні величини в даному випадку розраховують як $i = i_0 \frac{sh[\gamma(l_2 - x)]}{sh\gamma l_2}$; $u = u_0 \frac{ch[\gamma(l_2 - x)]}{ch\gamma l_2}$. Величини напруги та струму прийнято розглядати як незмінними, постійними. Стала розповсюдження розраховується за виразом $\gamma = 0.0116 \sqrt{\frac{g_1}{T}}$, де g_1 - провідність покриття; T - товщина стінки труби [1].

У загальному випадку (рис. 2), при довільній кількості стацій катодного захисту зміна за довжиною підземної споруди захисного потенціалу, що сформований стаціями, носить більш складний характер, що повинно враховуватись під час розрахунку системи захисних заходів [1,2]. Сьогоднішній підхід спирається на розгляд струмів, що протікають та напруги СКЗ як сталих, незмінних за часом. Вважається, що потенціал трубопроводу змінюється за довжиною трубопроводу, але в кожній точці є незмінним за часом (рис. 3).

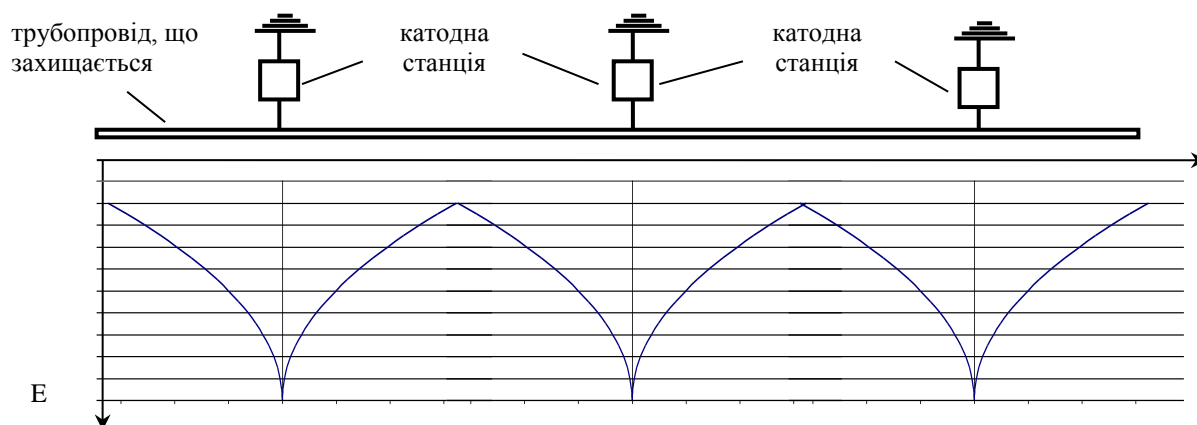


Рис. 2 Зміна захисного потенціалу вздовж лінійного металевго об'єкту, що захищається при наявності декількох станцій катодного захисту

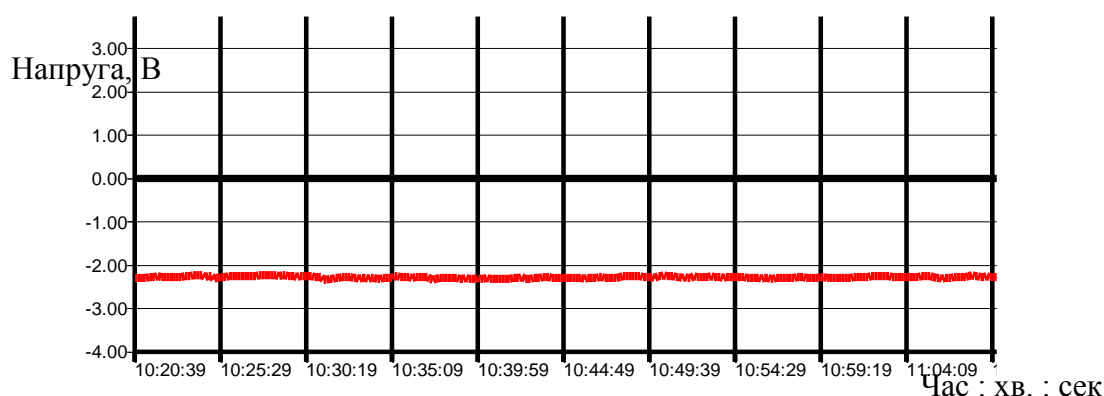


Рис. 3 Потенціал захисту трубопроводу сформований СКЗ за класичною схемою за умов відсутності впливів струмів, що блукають та суміжних СКЗ

Але випадки, коли підземний сталевий трубопровід не знаходиться під впливом струмів, що блукають та захищається однією станцією катодного захисту є досить рідкісними.

У загальному вигляді потенціал підземного трубопроводу по відношенню до нескінченно віддаленої точки (1) та струм трубопроводу у цій точці (2) визначаються рівняннями, що надають у результаті фіксоване значення електротехнічних величин [1,2].

$$u = \frac{r}{\gamma \operatorname{sh}[\gamma(a+b)]} \left(\operatorname{ch} \gamma(b-x) \sum_{k=-p}^{k=s} I_k \operatorname{ch} \gamma(a+l_k) + \operatorname{ch} \gamma(a+x) \sum_{k=s+1}^q I_k \operatorname{ch} \gamma(b+l_k) \right) B \quad (1)$$

$$i = \frac{1}{\operatorname{sh} \gamma(a+b)} \left(\operatorname{sh} \gamma(b-x) \sum_{r=-p}^s I_r \operatorname{ch} \gamma(a+l_r) - \operatorname{sh} \gamma(a+x) \sum_{k=s+1}^q (b-l_k) \right) a \quad (2)$$

Однак вирази (1 – 2) та інші наведені вирази не враховують змінну складову сигналів сучасних СКЗ, які містять високочастотні перетворювачі [3]. Полігармонічний сигнал сучасних станцій катодного захисту зумовлює зміну потенціалу захисту як за часом так й за довжиною трубопроводу, який визначається струмами стікання з трубопроводу. Широке розповсюдження СКЗ із високочастотною перетворювальною ланкою зумовлене покращеними масо-габаритними характеристиками вузла живлення. Однак цей фактор впливу викликає зміни у характеристиках електротехнічних сигналів у системі «система протикорозійного захисту – підземний сталевий трубопровід – ґрунт».

Вимірний захисний потенціал підземного трубопроводу (рис. 4) має складну форму і є результатом одночасної сумісної діяльності декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем. Мінімальне значення потенціалу дорівнює -3,46 В., максимальне значення дорівнює 0,001 В. Середнє значення дорівнює -2,54 вольта. Саме середнє значення й приймається до уваги під час розрахунку системи протикорозійного захисту за загальноприйнятим підходом. Величина -2,54 В є цілком прийнятною та такою, що свідчить про наявність захисту проти корозії.

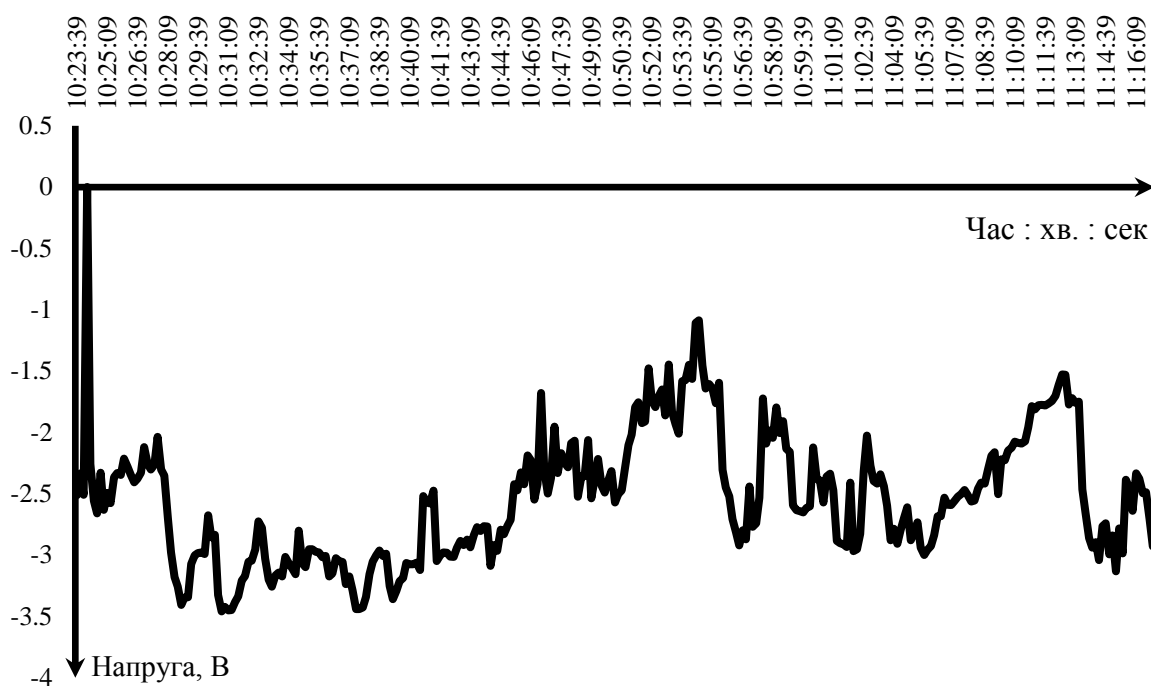


Рис. 4. Потенціал підземного трубопроводу, який є результатом сумісної роботи декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем

Але, якщо взяти до уваги мінімальне значення потенціалу (-3,46 В.) - то воно свідчить про надлишкову перекомпенсацію та нераціональну витрату електричної енергії і матеріалу анодного заземлювача. До того ж сам сигнал є полігармонійним, а не постійним. Нерівномірність розподілення значень потенціалу за часом сягає досить значних величин, й можуть містити не тільки перевищення рівня -0,55 В., а й навіть позитивні значення (рис. 5,6). Частота зміни потенціалу за часом належить діапазонаві від низькочастотно-модульованого сигналу у 10 Гц. до високочастотної складової, яка сягає 18 кГц. До того ж, як зазвичай на виході випрямляча є пульсуючою, та за умови активного навантаження форма струму повторює форму зміни за часом напруги. Але сучасні підземні трубопроводи, що покритий ізоляційною оболонкою має дещо іншу схему заміщення, яка містить реактивні елементи [4-6]. У такому випадку, електромагнітні процеси (перехідні процеси) обумовлюють відхилення сигналу, яке сягає позитивного значення. У ті проміжки часу, коли захисний потенціал перевищує мінімально припустиме значення підземний трубопровід лишається захисту та, навпаки, металева споруда є джерелом струмів, що блукають та руйнується. Таким чином навіть за відсутністю широкоамплітудних коливань фактичний корозійний стан відрізняється від очікуваного та запланованого.

Практика експлуатації сучасних систем протикорозійного захисту свідчить, що навіть за умови прийняттого середнього значення полігармонійного сигналу, наприклад -1,166 В., фактичний корозійний стан не є задовільним (рис. 5, 6). Спостерігаються не тільки коливання значної амплітуди в діапазоні від -3,379 В. до +0,951 В., а й значне за часом (до 15 відсотків від загального часу виміру) знаходження значення потенціалу захисту більше, ніж мінімально припустиме значення, що дорівнює -0,8В.

Зміна за часом потенціалу захисту від корозії підземного трубопроводу (рис. 6) свідчить не тільки про відсутність протикорозійного захисту, а й про наявність каталітичного фактору, що прискорює процеси електрохімічної корозії змінним струмом. Невраховування особливостей зміни потенціалу захисту за часом, особливо того факту, що певні проміжки часу підземний сталевий трубопровід лишається без протикорозійного захисту призводить до погіршення корозійного стану газопроводів. Наявність знакових потенціалів взагалі свідчить про те, що трубопроводи знаходяться у анодній зоні, тобто є джерелом виносу металу.

Криві напруги на підземному газопроводі (рис. 7), що сформовані СКЗ з класичною схемою із діодним випрямлячем свідчать про спотворення форми сигналу в наслідок як нерезистивного опору навантаження, так й в наслідок впливів збурень (крива 1 рис. 7). Захисний полігармонійний потенціал підземного трубопроводу (крива 2 рис. 7) має складну форму і є результатом одночасної сумісної діяльності декількох станцій катодного захисту, неідеального сигналу на газопроводі внаслідок подання до нього напруги декількох СКЗ (крива 1 рис. 7) тощо. Наведені осцилограми сигналів СКЗ, захисного потенціалу

трубопроводу, демонструють той факт, що розгляд тільки сталої складової електротехнічних процесів у системи електрохімічного захисту трубопроводів призводить до погіршення корозійної ситуації. Якщо

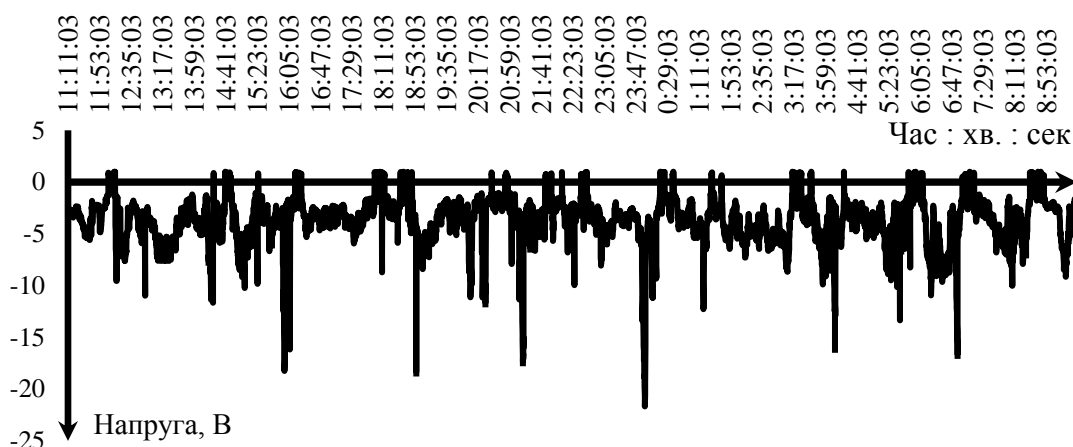


Рис. 5 Потенціал підземного трубопроводу сформований сумісною роботою декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем

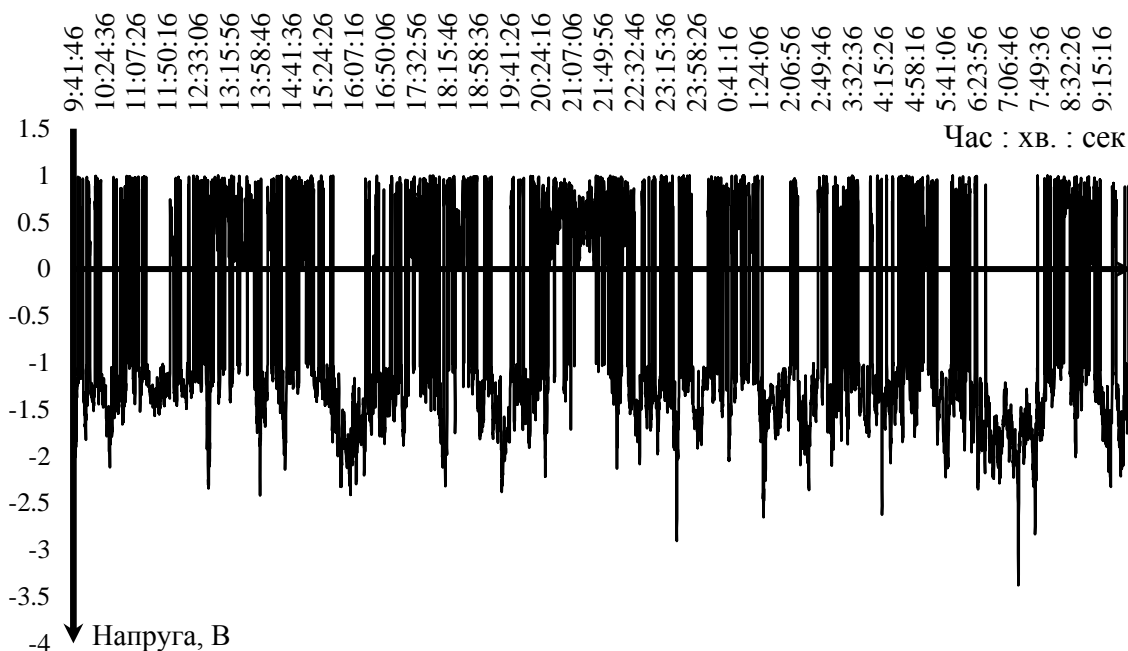


Рис. 6 Потенціал підземного трубопроводу сформований сумісною роботою декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем із явновраженими позитивними значеннями

Напряга, В

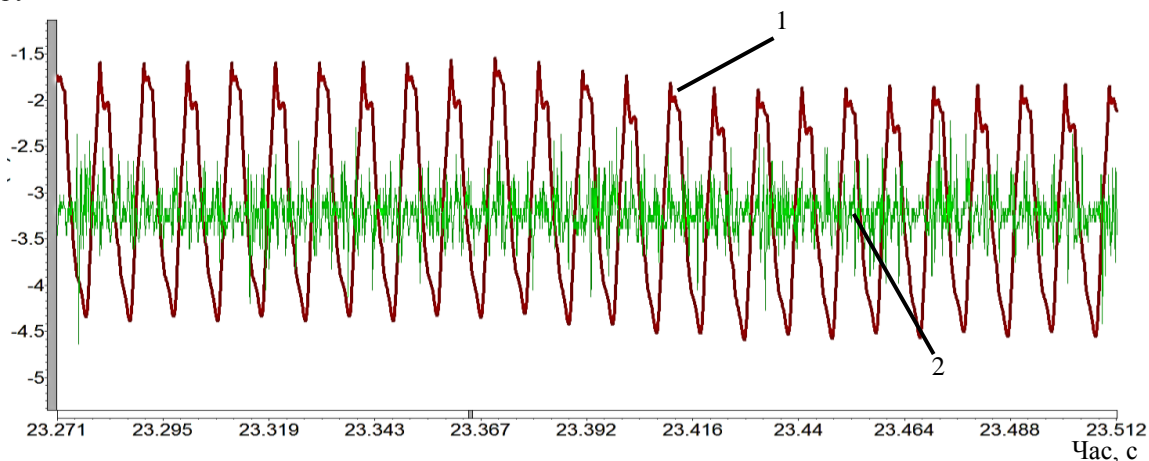


Рис. 7 Напряга у точці підключення СКЗ (крива 1) та захисний потенціал (крива 2)

звернути увагу на факт сумісної роботи декількох СКЗ з різними схемотехнічними рішеннями керування випрямлячів, то сповільнення корозійних процесів можливе тільки на основі сумісного керування станціями катодного захисту за певним законом керування на основі встановлення взаємозв'язку між параметрами електротехнічної системи «станція катодного захисту – підземний сталевий трубопровід – ґрунт» та режимами роботи станцій катодного захисту.

Висновки. Використання постійних значень струму та напруги у розрахунках та експлуатації системи протикорозійного захисту без врахування того, що:

- сигнал виході СКЗ та потенціал захисту є полігармонійними сигналами;
- реактивна складова опору під впливом полігармонійних струмів, що протікають трубопроводом є змінною;

призводить до некоректної оцінки протикорозійного стану, спотворення розподілення потенціалу захисту вздовж трубопроводу, що зумовлює надмірне використання електричної енергії та нераціональні витрати матеріалів анодного заземлювача.

Покращення корозійної ситуації можливо забезпечити шляхом мінімізації коливань значень потенціалу за довжиною трубопроводу й, одночасно, за часом в наслідок встановлення залежностей між електротехнічними параметрами системи «станції катодного захисту – підземний металевий трубопровід – ґрунт» і її режимами роботи.

Список використаних джерел

1. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения. / И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1967 – 227с.
2. Азюковський О.О. Потенціал підземного металевого трубопроводу сформований електротехнічною системою електрохімічного захисту. / О.О.Азюковський // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2014. – Вип. 92. – С. 18-22.
3. Азюковський О.О. Формування високочастотним інверторним випрямлячем захисного потенціалу підземного сталевого трубопроводу. / О.О.Азюковський // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – С. 37-41.
4. Aziukovskyi A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskyi // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013–P. 47 – 55.
5. Азюковський О.О. Зміна електротехнічних параметрів підземного металевого трубопроводу під впливом високочастотної складової напруги станцій катодного захисту. / О.О. Азюковський // Електрифікація транспорту. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. № 10, 2015. с. 98-106
6. Азюковський О. О. Визначення струму стікання з підземного трубопроводу з врахуванням основних джерел збурень для підземних металевих комунікацій / О.О. Азюковський // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2018. – Вип. 100. – С. 19 - 24.

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, проф. Казачковським М.М.

УДК 621.311.25: 621.311.29

*С. В. Плаксин, д-р физ.-мат. наук, Н. Е. Житник, Р. Ю. Левченко, С. Я. Остаповская
(Украина, Днепр, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины)*

НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИВОДА СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Анотація Запропоновано комбінований накопичувач енергії для гарантованого безперебійного електропостачання електроприводу системи орієнтації сонячних батарей фотоелектростанцій, що враховує особливості функціонування електроприводу в умовах нештатної експлуатації. Накопичувач являє собою комбінацію трьох видів взаємопов'язаних і функціонально узгоджених накопичувачів, а саме – електрохімічного накопичувача енергії на основі хімічних джерел струму, активного накопичувача кінетичної енергії і ємнісного накопичувача на основі суперконденсаторів, об'єднаних загальною системою управління. Розроблено його схемотехнічне рішення і наведені основні розрахункові співвідношення для визначення енергетичних параметрів активного накопичувача кінетичної енергії.

Ключові слова: комбінований накопичувач енергії, електропривід, фотоелектростанція, активний накопичувач кінетичної енергії.