

УДК 620: 60: 006: 004.9

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154999

Виявлення особливостей функціонування системи протикорозійного захисту підземних трубопроводів нафтогазових підприємств з використанням нейронних мереж

В. П. Лозован, Р. М. Джала, Р. М. Скриньковський, В. М. Юзевич

Проведено відбір інформації для впорядкування теоретичних положень та розробки практичних рекомендацій щодо діагностичних обстежень системи протикорозійного захисту підземних металевих нафтогазових трубопроводів.

Сформовано множину інформативних параметрів для моделювання функціональних зв'язків та визначення поляризаційного потенціалу у системі “підземна металоко́нструкція – установка катодного захисту”.

Для ділянки трубопроводу з урахуванням поляризаційного потенціалу на зовнішній поверхні запропоновано застосувати алгоритм прогнозування корозійного струму, підхід нелінійного програмування, а також нейронну мережу, що включає відповідні методи навчання. Сформовано тестуючу множину для оцінювання ефективності нейронної мережі.

Відзначена інформація є важливою для удосконалення апаратури дистанційного контролю металевих конструкцій нафтогазових підприємств, тобто методик коректного вимірювання та оцінювання постійних і змінних напруг та поляризаційного потенціалу на трубопроводі.

Розглянуто методи та алгоритми нейронних мереж, які застосовують для керування протикорозійним захистом підземних трубопроводів. Проведено дослідження ефективності штучних нейронних мереж, зокрема двошарової мережі прямого розповсюдження з функцією прогнозування ресурсу металевих труб. З використанням поляризаційного потенціалу виявлено здатність нейронних мереж виконувати недоступні для традиційної математики операції обробки, порівняння, класифікації образів, можливість самонавчання та самоорганізації стосовно підземних трубопроводів. Удосконалено кваліметричний критерій якості для ділянки трубопроводу з урахуванням оптимального діапазону поляризаційного потенціалу.

Розроблено метод прогнозування поляризаційного потенціалу установки катодного захисту і перехідного питомого опору ізоляційного покриття на поверхні підземної металоко́нструкції з використанням нейронної мережі. За результатами аналізу поляризаційного потенціалу і перехідного питомого опору конструкції розроблено методологію формування інформаційного забезпечення для методик деградації антикорозійного діелектричного покриття та металу на зовнішній поверхні підземної металоко́нструкції, а також для прогнозування її ресурсу

Ключові слова: нейронна мережа, підземні трубопроводи, поляризаційний потенціал, розподіл постійної напруги, нафтогазові підприємства

1. Вступ

Аналіз і моніторинг технічного стану підземних металевих трубопроводів (ПМТ) на нафтогазових підприємствах є важливим, оскільки пошкодження та руйнування елементів конструкцій в процесі функціонування може призвести до небезпечних і/або катастрофічних наслідків. Тому проводиться великий обсяг наукових досліджень і розробок щодо впровадження інтелектуальних систем моніторингу, які здатні контролювати життєвий цикл складних об'єктів (зокрема, ПМТ і установок катодного захисту (УКЗ)). У процесі комплексного аналізу поточного стану системи "ПМТ – УКЗ" доцільно враховувати експлуатаційні навантаження і параметри, які характеризують їх взаємодію з навколишнім середовищем.

В контексті складності об'єкту за оцінками експертів встановлено, що системи типу "ПМТ – УКЗ" доцільно аналізувати за допомогою нейронних мереж. Тут принцип використання штучних нейронних мереж (ШНМ) полягає в неперервному та автоматичному контролі дефектів і пошкоджень, які обумовлені несприятливими умовами під час експлуатації трубопроводів та металоконструкцій. Складні системи такого типу з великим обсягом пошкоджень (дефектів) доцільно аналізувати з допомогою ШНМ та враховувати елементи штучного інтелекту певного рівня [1] для того, щоб уникнути помилок в прогнозуванні умов експлуатації.

Актуальність досліджень системи "ПМТ – УКЗ" обумовлена трьома основними факторами. По-перше, систему "ПМТ – УКЗ" доцільно розглядати як складну комплексну систему з урахуванням множини енергетичних та кінетичних параметрів. Такий підхід є проблематичним. По-друге, ні до системи "ПМТ – УКЗ", ні до її складових не застосовували багатошарові ШНМ (хоча б з двома перцептронами). По-третє, проблематичним є вибір коректного оптимізаційного підходу для фізично обґрунтованого прогнозування ресурсу підземних та наземних елементів конструкцій, які контактують з агресивним середовищем.

Звідси очевидно, що актуальність дослідження обумовлена ще й тим, що під час розроблення алгоритмів діагностування ПМТ та проектування удосконалень для УКЗ на основі ШНМ доцільно провести вибір типу ШНМ.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В даний час у практичній площині гостро постає проблема контролю та діагностики об'єктів нафтогазового комплексу (як потенційно небезпечних об'єктів) за об'єктною спрямованістю та рівнем комплексності. Поряд з тим встановлено, що сьогодні дедалі більшого значення набувають діагностичні обстеження (або дослідження) системи протикорозійного захисту підземних металевих трубопроводів (ПМТ) нафтогазових підприємств, особливо з використанням нейронних мереж. Водночас виявлено, що інформаційну базу досліджень за проблемою прогнозування ресурсу підземних металоконструкцій (нафтогазопроводів, аміако-

проводів) формують недостатньо обґрунтовані результати рішень (висновків) щодо вибору методів оптимізації в процедурі навчання ШНМ [1, 2].

Так, в основі [1] підходи стохастичної оптимізації призводять до великих похибок прогнозу. У публікації [2] не висвітлено підхід до розгляду складних систем (типу “ПМТ – УКЗ”). Вказані недоліки [1, 2] призводять до суттєвих помилок прогнозу і часу навчання.

Варто зазначити, що руйнування підземних металокопункцій може бути спричинене багатьма факторами, такими як: закінчення терміну експлуатації, виникнення поверхневих дефектів у процесі виготовлення, установки та експлуатації, зміна діючих навантажень та вплив природних факторів, які супроводжуються корозією металу [3]. У вказаній праці [3] не враховано можливості розгляду в комплексі з ПМТ установки катодного захисту (УКЗ). Моделювання корозійних процесів у трубопроводі з урахуванням анодних струмів, електродних потенціалів та енергетичних характеристик міжфазних шарів можна проводити на основі співвідношень статті [4]. У праці [4] не враховано можливості розгляду в комплексі з ПМТ установки катодного захисту (УКЗ), зокрема, поляризаційного потенціалу.

Для оцінювання ресурсу нафтогазових трубопроводів необхідно враховувати загальні принципи оцінювання міцності та довговічності елементів конструкцій, відповідну апаратуру подано у монографії [5]. Але в ній не враховано методіку моделювання корозійних процесів [4] і підходи коректного вимірювання поляризаційного потенціалу [6]. Відповідні діагностичні дослідження дозволяють оцінити рівні економічних втрат, загибелі людей і забруднення довкілля [7]. Але в роботі [7] не відзначена інформація щодо метрологічних досліджень конкретних пристроїв. Частково інформація щодо метрологічних досліджень діагностичних систем, якість і можливість застосування для об’єктів нафтогазової промисловості, відображена у статті [8]. Але в ній не висвітлена методологія аналізу функціональних зв’язків для системи “ПМТ – УКЗ”.

Важливою проблемою прогнозування ресурсу системи “ПМТ – УКЗ” є її складність та великий обсяг функціональних параметрів, що може негативно вплинути на якість прогнозування ресурсу трубопроводних систем. Загальний підхід до формування мультиплікативного критерію якості подано у статті [9]. Але він застосований до іншого типу транспортних систем [9], не пов’язаних з транспортуванням газу та нафтопродуктів.

Застосування нейронних мереж [10] з урахуванням критеріїв типу [9] дозволяє розробити методологію аналізу функціональних зв’язків для системи “ПМТ – УКЗ”, підвищити якість УКЗ, але не дає підстав для прогнозувати ресурсу металевих конструкцій.

Методам контролю і моделювання, які мають відношення до систем типу “ПМТ – УКЗ”, властиві відхилення, похибки та неозначеності [11]. Для подолання неозначеностей під час формулювання оптимальних задач, які мають відношення до контролю корозії і оцінювання надійності трубопроводів, доцільно прогнозувати швидкість корозії металу на основі даних про корозійні дефекти [11], окрім

широко використовуваних детерміністичних та статистичних методів. Крім того, результати [11] можуть бути використані для оцінювання аспектів обслуговування, що можуть сприяти оптимізації майбутньої вартості обслуговування трубопроводів, а також формувати рекомендації для зменшення кількості аварій та катастроф на нафтогазових підприємствах.

В результаті за допомогою ШНМ з урахуванням інформації праць, приведених вище, можна вибрати оптимальний метод діагностики, запропонувати необхідні вимірювальні прилади, опрацювати великий обсяг інформації, отриманої в результаті моніторингу системи “ПМТ – УКЗ”, прогнозувати фізично обґрунтований ресурс відповідної системи (“ПМТ – УКЗ”).

Таким чином, результати аналізу літературних даних та існуючі практичні проблеми діагностування системи “ПМТ – УКЗ” визначають напрями досліджень, зокрема, обґрунтування ресурсу відповідної системи.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є формування теоретичних положень та розробка практичних рекомендацій щодо діагностичних обстежень системи протикорозійного захисту підземних металевих трубопроводів (ПМТ) нафтогазових підприємств з використанням нейронної мережі для встановлення фізично обґрунтованих термінів експлуатації (ресурсу) ПМТ.

Для досягнення поставленої мети дослідження визначено такі завдання:

- провести обстеження ділянок трубопроводу (ПМТ) за допомогою апаратури неруйнівного контролю ВПП-М (прилад контролює параметри стану протикорозійного захисту ділянок трубопроводу);

- на основі результатів діагностування системи “ПМТ – УКЗ” і моделювання процесів поширення дефектів у металі труби визначити потенціали між металом і електродом порівняння (ЕПОР), які відповідають постійному та змінному струмам, а також розподіл поляризаційного потенціалу вздовж ділянки елемента конструкції;

- з використанням критерію якості та нейронної мережі описати процес зміни поляризаційного потенціалу УКЗ та перехідного питомого опору ізоляційного покриття на поверхні підземної металоконструкції і на цій основі визначити фізико-хімічні параметри, які характеризують фізично обґрунтовані терміни експлуатації (ресурсу) ПМТ.

4. Матеріали та методи дослідження впливу середовища на стан підземних трубопроводів

Задачі прогнозування станів металу та діелектричного покриття в останній час набули особливої актуальності у сфері діагностування підземних металевих трубопроводів (ПМТ) нафтогазових підприємств. Недоліками “класичних” методів прогнозування трубопроводів є:

– відсутність у моделі об’єктів та процесів уявлень щодо структури й системи зв’язків реального об’єкта, що вносить суб’єктивізм у вибір як самої моделі, так і її структури;

– труднощі побудови моделей об’єктів та процесів за умови, що дані зберігаються в різних часових рядах та (або) мають тимчасові зрушення стосовно один одного;

– недостатня точність прогнозу;

– значна чутливість отриманих результатів стосовно інформації та (або) її зашумленість;

– суттєві непевності оцінювання параметрів під час опрацювання значного обсягу інформації;

– залежність результату прогнозу від кваліфікації аналітика в конкретній предметній області.

У даній ситуації для ділянки трубопроводу з урахуванням поляризаційного потенціалу доцільно застосувати нейронні мережі з алгоритмом прогнозування, що включає в себе розвинену методологію структурного моделювання постійних і змінних напруг та методи навчання, які ґрунтуються на добре розвиненій теорії нелінійного програмування [11, 12]. Основним критерієм захисту ПМТ вважають різницю потенціалів між металом і середовищем, яку називають поляризаційним потенціалом (ПП) [6].

Задача прогнозування ресурсу підземного металевого трубопроводу відноситься до класу задач прогнозування часових рядів типу (1):

$$|(t_1, \dots, t_{i+k-1}) - t_{i+k}|, \quad (1)$$

тобто існує часовий ряд $\{t_1, t_2, t_n\}$ статистичних даних (параметрів системи “ПМТ – УКЗ”), безпосередньо пов’язаних з поляризаційним потенціалом [6]. З множини даних вибирається початкове і кінцеве значення t_1, \dots, t_n .

Складається функція $f(t_1, \dots, t_n)$, $k \leq n$, для виконання умови (1).

Функція f (тобто низка її значень) є “вдалим” (у деякому змісті) прогнозом значення t_{i+k} за значенням часового вікна $\{t_1, \dots, t_{i+k-1}\}$. Оскільки критерій якості прогнозу може бути різним, то в даному випадку він не обговорюється. Кінцевою метою оптимізаційної задачі впорядкування інформації для системи “ПМТ – УКЗ” є її використання для прогнозу невідомих значень t_{n+1}, t_{n+2}, \dots . У цьому випадку передбачається, що якщо для великої кількості часових вікон знайдено “вдалим” прогноз, то він залишається частково “вдалим” і для невеликої кількості часових вікон, що виходять за границі відомих значень.

На рис. 1 проілюстровано алгоритм обчислення значень прогнозованої функції. Кожний вузол мережі приймає на вхід множину вихідних значень попереднього шару мережі та передає результат обчислень на наступний шар таким чином,

що: a_k^t – коефіцієнт зв'язку між i -м вузлом $(L-1)$ і-го шару чи з k -м вузлом i -го шару, а $y^{L-1} = f(a_i^{L-1})$ – результат обчислення у вузлі номер i шару номер $L-1$.

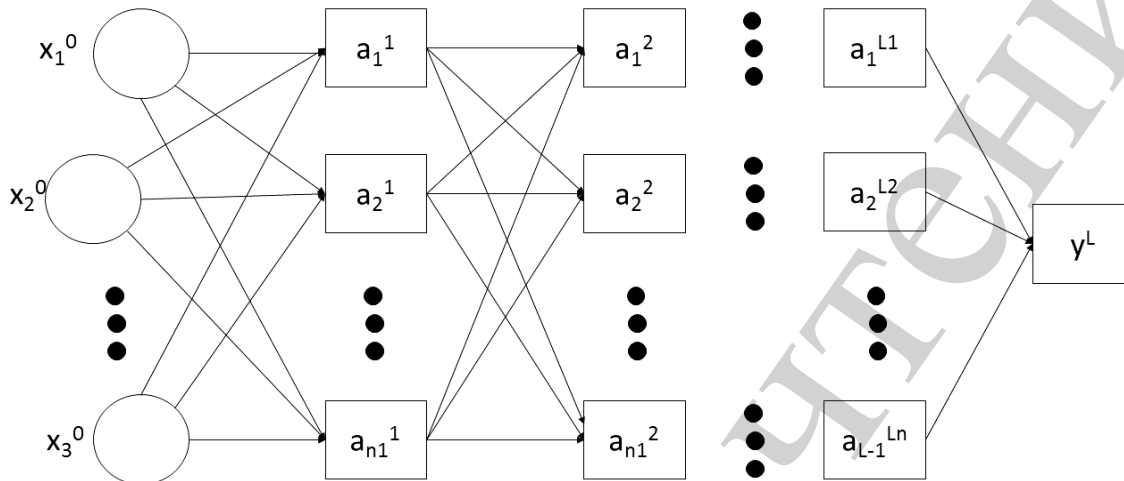


Рис. 1. Блок – схема функції прогнозу для розрахунку параметрів системи “ПМТ – УКЗ” за допомогою нейронної мережі

Нейронна мережа – однорідна композиція шарів елементарних обчислювачів [13]. З боку тільки функції прогнозу абсолютно все одно, з якого інтервалу брати значення: $[0; 1]$ чи $[-1; 1]$. Зазвичай прийнято брати відрізок $[0; 1]$, але за результатами обчислювального експерименту встановлено, що в деяких випадках вибір діапазону $[-1; 1]$ є більш доцільним [14].

Оскільки числові значення елементів часового ряду можуть змінюватися неперервно (на відрізку), тоді й вся мережа повинна постійно знаходитися в неперервному режимі, щоб реалізувати неперервну за всіма аргументами функцію f_0 . Тому вважається небажаним входження вузла (елементарного обчислювача) до режиму “насичення”, тобто потрапляння a_i^L до такої точки, де $f'(a_i^L)$ – перша похідна – досить мала.

Оскільки розглядаються цілком визначені функції, які характеризують систему ПМП – УКЗ, то це означає, що a_i^L не повинні сильно відхилитися від початкових значень.

Розглянемо обмеження $a^- \leq a_i^L \leq a^+$, $|a^-| = |a^+|$. Якщо $|a^+|$ досить мале значення, то $f(x)$ досить точно апроксимується лінійною функцією.

Навчання нейронної мережі – це процес пошуку таких коефіцієнтів зв'язку, відповідно до яких нейронна мережа реалізує “вдалу” функцію прогнозу [15].

Оскільки мережа реалізує неперервну функцію, то з її допомогою можна прогнозувати значення $f(x)$ з використанням нормованого ряду, а також і перетворе-

ного, наприклад, коли всі значення зменшені в k разів [15, 16].

5. Критерій якості підземного трубопроводу

Розглянемо добуток типу $k_P = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$ [3, 9]:

k_1 – коефіцієнт комерційного виграшу;

k_2 – коефіцієнт рівня конкурентоспроможності (конкурентоздатності) ПМТ;

k_3 – коефіцієнт надійності ПМТ.

Аналогічно як у працях [3, 9] мультиплікативний кваліметричний критерій якості для ділянки ПМТ подамо у вигляді:

$$Z_1 = \prod_{i=1}^m k_i = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7 \cdot k_8 \cdot k_9 \Rightarrow \max, \quad (2)$$

де $k_4(D_f)$, $k_5(p_S)$, $k_6(\square_{ve})$, $k_7(K_S)$, $k_8(T_S)$, $k_9(U_P)$ – коефіцієнти, які характеризують дефектність D_f , міцність p_S , границю корозійної втоми $\square_{ve}(N_P)$, вплив покриття на корозійну стійкість K_S , термін безаварійної роботи T_S (ресурс) конструкції (труби); дотримання оптимального діапазону поляризаційного потенціалу U_P .

Уведемо також критерій якості Z_2 у адитивній формі аналогічно [3]:

$$Z_2 = a_1 \cdot k_1 + a_2 \cdot k_2 + a_3 \cdot k_3 + a_4 \cdot k_4 + a_5 \cdot k_5 + a_6 \cdot k_6 + a_7 \cdot k_7 + a_8 \cdot k_8 + a_9 \cdot k_9 \Rightarrow \max, \quad (3)$$

де a_j ($j=1, 2, \dots, 9$) – коефіцієнти вагомості, які визначаємо експертним методом.

На відміну від праці [3], тут враховано $k_9(U_P)$ і відповідно поляризаційний потенціал U_P .

За сучасними нормативами для сталеві труби у ґрунті поляризаційний потенціал (ПП) U_P повинен знаходитись у межах від $-0,85$ В до $-1,15$ В відносно мідносульфатного електрода порівняння [6]. Важливою проблемою електрохімічного захисту є контроль ПП на зовнішній поверхні трубопроводу, яка може контактувати з ґрунтовим електролітом, а також впорядкування системи інвестицій [7].

6. Результати досліджень трубопроводу на певній ділянці за допомогою апаратури ВПП-М

Проведено контроль стану протикорозійного захисту ділянок трубопроводів за допомогою апаратури (приладів) БВС-К та ВПП-М [6]. Безконтактні вимірювання струмів (БВС) використовують під час обстежень струмопровідних комунікацій (підземних металевих трубопроводів, кабелів тощо) для визначення розподілу струму в мережах комунікацій. На основі таких вимірювань виявляємо пошкодження ізоляційних покриттів, несанкціоновані під'єднання та проводимо контроль стану протикорозійного захисту з метою запобігання аваріям та забезпечення

надійності експлуатації [6].

З допомогою цифрових приладів ВПП вимірюють постійні та змінні електричні напруги і визначають U_p , а ВПП-М удосконалений порівняно з ВПП і дозволяє визначати для трубопроводів географічні координати на основі GPS з пам'яттю та інтерфейсом [6].

Одночасні вимірювання постійної різниці потенціалів та змінної електричної напруги на поверхні ґрунту дають змогу проводити пошук пошкоджень ізоляції ПМТ за відомими методами поперечного градієнта та Пірсона [6]. За вимірами поляризаційного потенціалу контролюють стан електрохімічного захисту та виявляють місця корозії на поверхні металевих конструкцій.

Апаратура ВПП-М дає можливість також визначати перехідний питомий опір ізоляційного покриття R_{in} для кожного інтервалу довжини Δl_n між точками вимірювань струмів ПМТ [6]:

$$R_{in} = \frac{U_{in}}{i_n}, \quad (4)$$

де густина постійної складової струму катодного захисту i_n на n -ому інтервалі довжини з площею поверхні S_n (перерізу) має значення:

$$i_n = \frac{\Delta I_n}{S_n} = \frac{\Delta J_n}{\pi D \times \Delta l_n \times k_n}, \quad (5)$$

де ΔJ_n – різниця вимірів змінної компоненти струму на кінцях ділянки підземного трубопроводу (ПМТ); D – діаметр трубопроводу; k_n – кількість експериментів дослідження.

Падіння потенціалу на ізоляційному покритті ПМТ [6]:

$$U_i = U_{MG} - U_{GG} - U_p = V_{MG} / k_p - U_{GG},$$

$$k_p = V_{GG} / U_{GG}, \quad (6)$$

де k_p – коефіцієнт гармоніки змінного струму, що натікає у трубопровід на даній ділянці, визначається відношенням змінної V_{GG} і постійної U_{GG} напруг у ґрунті впоперек траси; U_{MG} і V_{MG} – напруги між металом і електродом порівняння (ЕПОР), виміряні при постійному і змінному струмах відповідно.

Падіння напруги в ґрунті U_G буде рівне вимірній різниці потенціалів U_{GG} між електродом порівняння та допоміжним електродом, якщо відстань x між електродами вибрана з урахуванням глибини h залягання і діаметра D трубопроводу:

$$x = h \sqrt{\left(\frac{4h}{D} - 2\right)}. \quad (7)$$

З використанням формул (1)–(7) було проведено комплексні обстеження ділянки трубопроводу (ПМТ) за методиками праці [6] і результати вимірювань проілюстровано на рис. 2. Під час опрацювання результатів вимірів струмів і потенціалів використовували рівномірні відрізки між точками вимірювання (рис. 2–5).

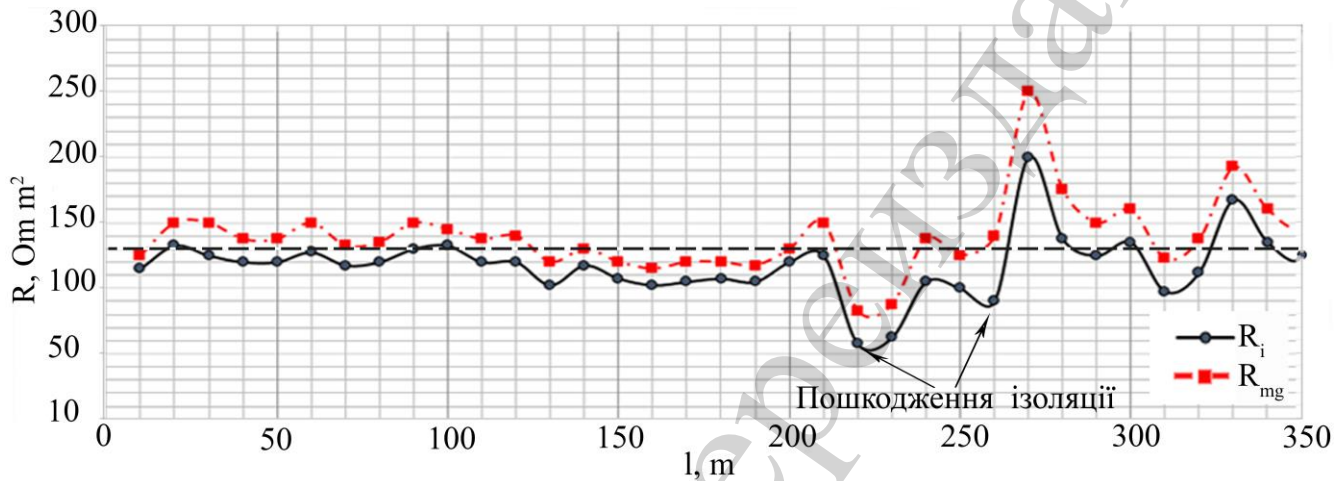


Рис. 2. Розподіл перехідного опору “труба-земля” $R_{MG}(l)$ та опору ізоляції $R_i(2)$

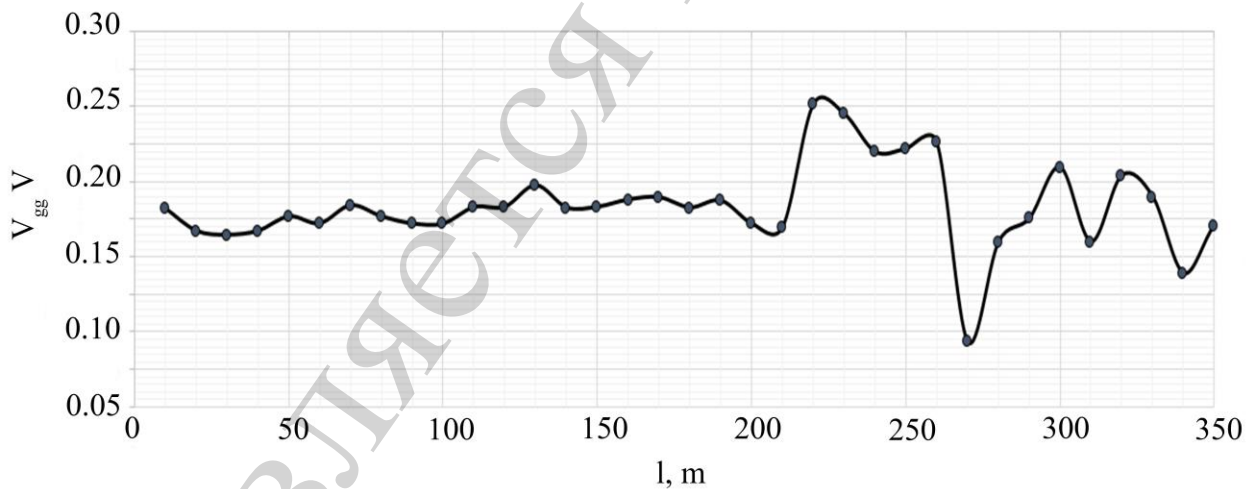


Рис. 3. Розподіл змінної напруги “земля-земля” $V_{GG}(l)$

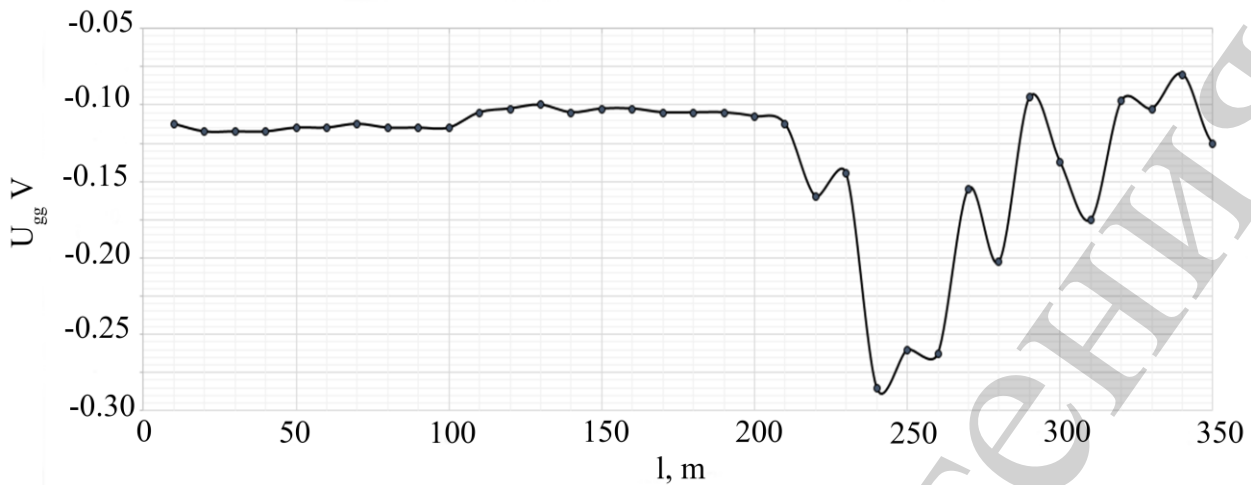


Рис. 4. Розподіл постійної напруги “земля-земля” U_{GG} (1) – градієнта потенціалу

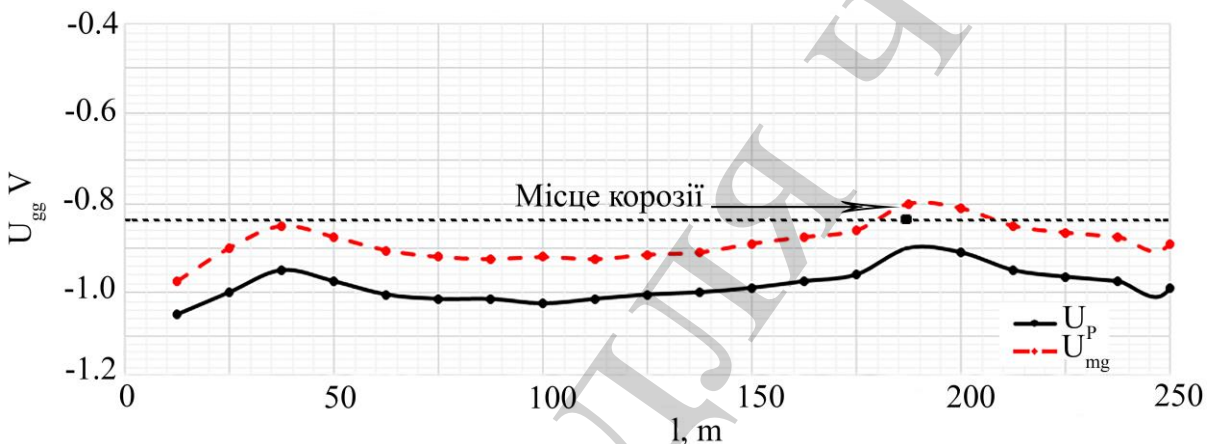


Рис. 5. Розподіл постійної напруги “труба-земля” U_{MG} та поляризаційного потенціалу U_p вздовж ПМТ

В даному варіанті досліджень інформація на рис. 2–4 допоміжна і дозволяє оптимізувати методику експерименту. Варіант вихідних експериментальних даних приведено у праці [17]. Після року експлуатації трубопроводу проведено аналогічний експеримент, виходячи з [17], і отримано розподіл постійної напруги “труба-земля” U_{MG} (рис. 5). Розподіл поляризаційного потенціалу U_p вздовж ПМТ визначено з урахуванням (6) і методик праць [1–11, 17, 18]. На графіку (рис. 5) горизонтальна пряма ($U=0,85$ В) дозволяє оцінити граничні потенціали U_{MG} і виділити область труби $l=177 \square 212$ м, на якій проходить корозійне розчинення. Відповідна інформація є тестовою для проведення оптимізаційних розрахунків з допомогою нейронної мережі.

Для більш наглядного показу продемонстровано карти з виглядом 3d рельєфу і карта з виглядом з космосу (рис. 6).

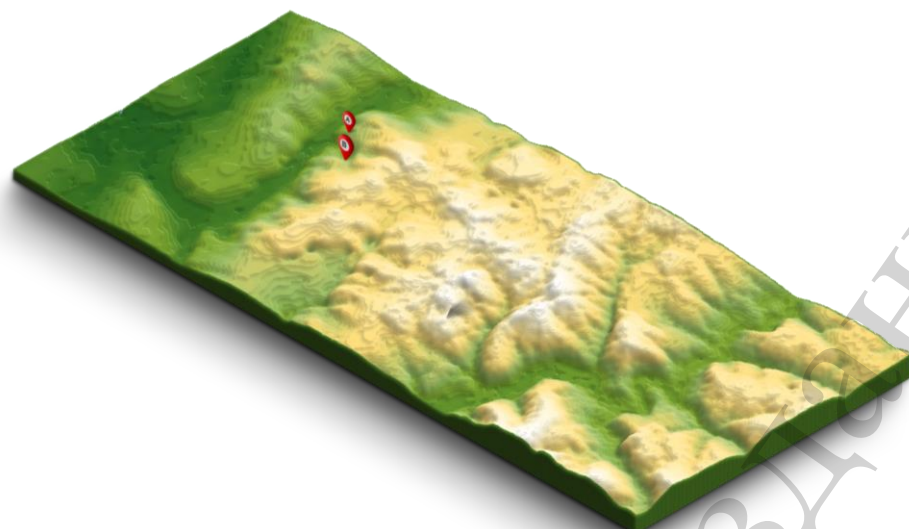


Рис. 6. Розміщення ділянки обстеження ПМТ на 3d рельєфі



Рис. 7. Розміщення ділянки обстеження ПМТ на фотографії з космосу

Під час проведення досліджень щодо контролю стану трубопроводів можливі помилкові рішення, такі як хибна відмова (коли об'єкт справний, а контроль показує відхилення від норми, тобто дефект). Такі помилки (першого роду) зазвичай не особливо важливі, бо наявність дефекту можна перевірити. На відміну від цього, невизначена відмова, невиявлений дефект (помилка другого роду) може призвести до пошкодження і аварії, що дуже важливо для експлуатації "ПМТ – УКЗ". Такі помилки для контактного методу можливі за пропуску результатів вимірів потенціалів у точках траси (внаслідок локального характеру цього контролю). Комплексні використання ВПП-М дають змогу зменшити імовірність помилок і підвищують вірогідність результатів контролю. Для більш детальних підтверджень і було запропоновано метод прогнозування за допомогою нейронної мережі.

7. Результати прогнозування за допомогою нейронної мережі для ділянки трубопроводу

За допомогою нейронної мережі з функцією прогнозування $f(x_1, \dots, x_n)$ було спрогнозовано ситуацію щодо потенціалів типу U_{MG} та поляризаційного потенціалу U_P вздовж підземного трубопроводу (ПТ) на ділянці трубопроводу, довжиною 250 м (рис. 8). На наявному відрізку знайдено місце ($l \approx 190$ м, прогнозування № 1, тобто прогнозування через рік), де може відбуватися процес корозії (рис. 8).

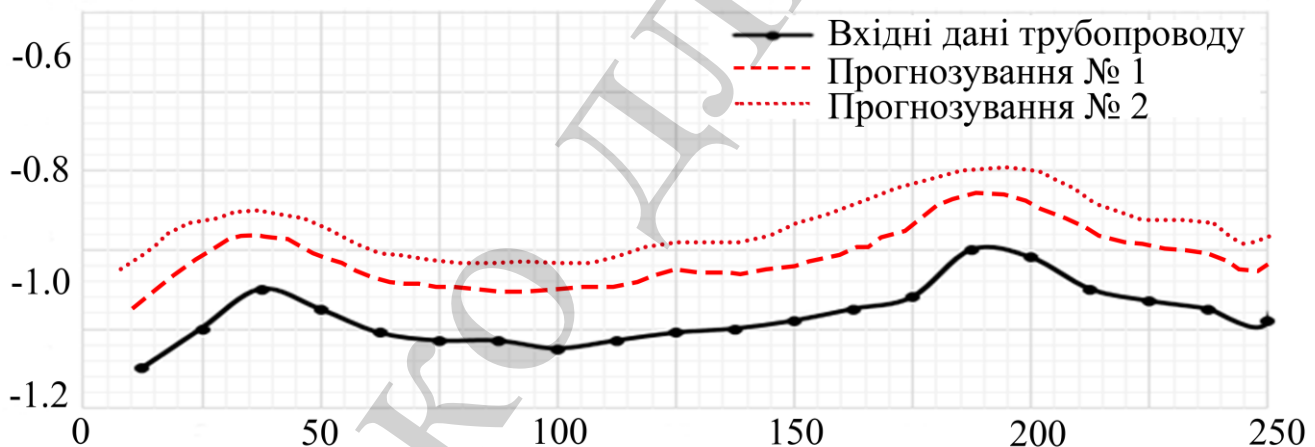


Рис. 8. Графік прогнозування потенціалів типу U_{MG} вздовж ПТ за допомогою нейронної мережі з урахуванням процесу корозії

Якщо перша прогнозна залежність для U_{MG} (прогноз № 1, перший рік прогнозу) зміщена в середньому на 0,06 В, то друга – (прогноз № 2, другий рік прогнозу) зміщена в середньому на 0,05 В) порівняно з результатом першого прогнозу. Таким чином, прогноз № 2 свідчить про нерівномірний характер корозійної швидкості.

8. Обговорення результатів дослідження системи протикорозійного захисту підземних трубопроводів нафтогазових підприємств з використанням нейронних мереж

На основі аналізу графічних залежностей і результатів моделювання, отриманих на основі аналізу літературних даних, встановлено, що з часом корозійна швидкість зменшується (в даному випадку приблизно на 17 %).

Виходячи з результатів дослідження, можна констатувати, що швидкість корозії під час прогнозування з допомогою нейронної мережі відповідає досить “вдалому” результату. Прогноз нейронної мережі стосувався ділянки експлуатації трубопроводу, довжиною $L=250$ м з місцем, де відбувається корозія. Перший прогноз (№ 1) ілюструє потенціали U_{MG} для першого року і, відповідно, другий прогноз (№ 2) ілюструє потенціали U_{MG} для другого року. Нейронна мережа дозволила встановити, що середнє значення швидкості корозії металу (сталі) на поверхні підземної труби у дефектах покриття відбувається орієнтовно в діапазоні 0,13 – 0,15 мм/рік (на відміну від стандартних методик за інформацією монографії [5], для яких в аналогічному випадку є характерний більш широкий діапазон 0,12 – 0,16 мм/рік (mm/year)).

Запропонований кваліметричний критерій (2) має переваги над існуючими [3, 9], оскільки враховує поляризаційний потенціал і дозволяє більш коректно формулювати оптимізаційні задачі для установки катодного захисту (УКЗ).

На основі інформації про контроль протикорозійного захисту підземного металевого трубопроводу (ПМТ) апаратурою (приладами) БВС-К та ВПП-М [6, 17] була сформована тестуюча множина для оцінювання ефективності нейронної мережі.

Недоліком тестуючої множини є те, що вона недостатньо об’ємна. Крім того, під час навчання нейронна мережа з урахуванням цієї початкової тестуючої множини функціонує як “чорний ящик”, що накладає певні обмеження на відповідні результати щодо прогнозу ресурсу труби.

Проведені дослідження є продовженням попередніх, зокрема [6, 17, 19], і мають перспективу удосконалення метрологічних методик для коректного визначення струмів і напруг у сфері діагностичних досліджень і неруйнівного дистанційного контролю системи “ПМТ – УКЗ” апаратурою БВС-К та ВПП-М.

Поряд з тим варто зазначити, що у працях [20, 21] відзначено необхідність та перспективи неруйнівного діагностування підземних металевих трубопроводів з допомогою акустичних сигналів. Перевага методології та приладів, в яких використовується принцип електромагнітних хвиль [6, 17, 19], очевидна, оскільки вона пов’язана з довжиною зондувальних хвиль та геометричними розмірами дефектів (тріщин) на зовнішній поверхні підземної металоконструкції. Вказана методологія експрес контролю [6, 17, 19] дозволяє виявляти дефекти на поверхні підземної металеві труби менших розмірів.

Запропонований кваліметричний критерій типу (2), (3) може бути використаний також для впорядкування інформації щодо підвищення ефективності взаємодії між системою катодного захисту (УКЗ) і компресорними станціями.

9. Висновки

1. Проведено аналіз результатів безконтактних вимірювань струмів і напруг, отриманих в результаті моніторингу ділянок трубопроводу за допомогою приладів неруйнівного контролю БВС-К і ВПП-М. Завдяки приладам визначено перехідний опір ізоляційного покриття і сформовано відповідну тестуючу множину для оцінювання ефективності нейронної мережі.

2. Сформовано множину інформативних фізико-хімічних параметрів для визначення поляризаційного потенціалу у системі “підземний металевий трубопровід (ПМТ) – установка катодного захисту (УКЗ)”. Інформативні параметри, в основі яких енергетичні характеристики міжфазних шарів, напруги та корозійні струми, відповідають методу зондування металевих конструкцій за допомогою електромагнітних хвиль.

3. Розроблено метод прогнозування поляризаційного потенціалу УКЗ і перехідного питомого опору ізоляційного покриття на поверхні підземної металоконструкції з використанням критерію оптимізації та нейронної мережі. За результатами аналізу поляризаційного потенціалу УКЗ і перехідного питомого опору розроблено інформаційне забезпечення для методик опису деградації антикорозійного діелектричного покриття та металу на зовнішній поверхні підземної металоконструкції, а також для прогнозування ресурсу системи “ПМТ – УКЗ”. Відповідні метод і методики оцінювання фізико-хімічних параметрів дозволяють фізично обґрунтовано та математично більш коректно на відміну від стандартних описати процедуру поширення корозійних дефектів у глибину труби, а також, зокрема, звузити діапазон оцінювання середнього значення корозійного струму у дефектах покриття орієнтовно на 50 %.

Література

1. Duchi J., Hazan E., Singer Y. Adaptive Subgradient Methods for Online Learning and Stochastic Optimization // Journal of Machine Learning Research. 2011. Issue 12. P. 2121–2159. URL: <http://www.jmlr.org/papers/volume12/duchi11a/duchi11a.pdf>

2. Efficient and robust automated machine learning / Feurer M., Klein A., Eggenberger K., Springenberg J., Blum M., Hutter F. // In Advances in Neural Information Processing Systems. 2015. URL: <https://papers.nips.cc/paper/5872-efficient-and-robust-automated-machine-learning.pdf>

3. Yuzevych L., Skrynkovskyy R., Koman B. Development of information support of quality management of underground pipelines // EUREKA: Physics and Engineering. 2017. Issue 4. P. 49–60. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00392>

4. Yuzevych V. M., Dzhala R. M., Koman B. P. Analysis of Metal Corrosion under Conditions of Mechanical Impacts and Aggressive Environments // METALLOFIZIKA I NOVEISHIE TEKHNologii. 2018. Vol. 39, Issue 12. P. 1655–1667. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.12.1655>
5. Механіка руйнування та міцність матеріалів. Т. 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів: пос. / Никифорчин Г. М., Поляков С. Г., Черватюк В. А., Ориняк І. В., Слободян З. В., Джала Р. М. Львів: “Споллом”, 2009. 504 с.
6. Dzhala R. M., Verbenets' B. Y., Melnyk M. I. Measuring of Electric Potentials for the Diagnostics of Corrosion Protection of the Metal Structures // Materials Science. 2016. Vol. 52, Issue 1. P. 140–145. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9936-y>
7. Yuzevych V., Klyuvak O., Skrynkovskyy R. Diagnostics of the system of interaction between the government and business in terms of public e-procurement // Economic Annals-XXI. 2016. Vol. 160, Issue 7-8. P. 39–44. doi: <https://doi.org/10.21003/ea.v160-08>
8. Hinton G. E., Osindero S., Teh Y.-W. A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets // Neural Computation. 2006. Vol. 18, Issue 7. P. 1527–1554. doi: <https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.7.1527>
9. Panchenko S., Lavrukhin O., Shapatina O. Creating a qualimetric criterion for the generalized level of vehicle // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 1, Issue 3 (85). P. 39–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92203>
10. Zhang W. Y. Artificial Neural Networks in Materials Science Application // Applied Mechanics and Materials. 2010. Vol. 20-23. P. 1211–1216. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.20-23.1211>
11. An artificial neural network modeling for pipeline corrosion growth prediction / Din M. M., Ithnin N., Zain A. M., Noor N. M., Siraj M. M., Rasol R. // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10, Issue 2. P. 512–519. URL: http://www.arnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2015/jeas_0215_1484.pdf
12. Struchenkov V. I. Nonlinear Programming Algorithms for CAD Systems of Line Structure Routing // World Journal of Computer Application and Technology. 2014. Vol. 2, Issue 5. P. 114–120. URL: <http://www.hrpub.org/download/20140525/WJCAT3-13702226.pdf>
13. Hornik K., Stinchcombe M., White H. Multilayer feedforward networks are universal approximators // Neural Networks. 1989. Vol. 2. P. 359–366. URL: https://www.cs.cmu.edu/~epxing/Class/10715/reading/Kornick_et_al.pdf
14. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting / Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. // Journal of Machine Learning Research. 2014. Vol. 15. P. 1929–1958. URL: <http://jmlr.org/papers/volume15/srivastava14a.old/srivastava14a.pdf>
15. Galushkin A. I. The Theory of Neural Networks. Moscow, 2000. 416 p.

16. Khaled K. F., Abdel-Shafi N. S. Corrosion inhibition of mild steel by some sulfur containing compounds: Artificial neural network modeling // J. Mater. Environ. Sci. 2014. Vol. 5, Issue 4. P. 1288–1297. URL: https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol5/vol5_N4/158-JMES-887-2014-Khaled.pdf
17. Мельник М. І. Розробка засобів контролю електрохімічного захисту підземних металевих споруд // *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Матеріали IV науково-практичної конференції студентів і молодих учених. Івано-Франківськ, 2013. С. 320–323.*
18. Lidén P., Adl-Zarrabi B. Non-destructive methods for assessment of district heating pipes: a pre-study for selection of proper methods // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 116. P. 374–380. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.084>
19. Yuzevych V., Skrynkovsky R., Koman B. Intelligent Analysis of Data Systems for Defects in Underground Gas Pipeline // *2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*. 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/dsmp.2018.8478560>
20. Pipeline Monitoring System by Using Wireless Sensor Network / Golshan M., Ghavamian A., Moohammed A., Abdulshaheed A. // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2016. Vol. 13, Issue 3. P. 43–53. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Pipeline-Monitoring-System-by-Using-Wireless-Sensor-Golshan-Ghavamian/6c78c4ebfea665fefcfd4bfb80fa956b1feec73c>
21. Saifullin E. R., Izmailova E. V., Ziganshin S. G. Methods of Leak Search from Pipeline for Acoustic Signal Analysis // *Indian Journal of Science and Technology*. 2017. Vol. 10, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i1/109953>