

УДК 697.34

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ В ПІДЗЕМНИХ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖАХ

І. Р. Ващишак

Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано–Франківськ, 76019, тел. 50–47–08, e-mail: tdm@nung.edu.ua

Розглянуто проблеми, які виникають під час проведення контролю технічного стану підземних теплових мереж з трубопроводами в пінополіуретановій тепловій ізоляції прокладених безканальним способом. Наведено специфічні дефекти, які виникають в даних об'єктах контролю внаслідок наявності багатошарової структури. Складено електричну схему заміщення ділянки підземного трубопроводу з пінополіуретановою ізоляцією. Наведено розрахунок основних елементів електричної схеми заміщення. Виведено залежність зміни струму та напруги, що виникають в місці дефекту, від вхідних параметрів генератора (напруги та частоти). Розраховано електричні параметри елемента безпеки. На основі удосконаленого електромагнітного методу контролю розроблено інформаційно–вимірювальну систему для контролю підземних теплових мереж. Запропоновано методику проведення контролю ділянок підземних теплових мереж, розміщених між двома тепловими камерами, удосконаленим електромагнітним методом. Дослідження, проведені з використанням інформаційно–вимірювальної системи, показали високу ступінь кореляції між виявленими дефектами і їх реальною наявністю.

Ключові слова: метод, трубопровід, пінополіуретанова ізоляція, технічний стан, електрична схема заміщення.

Рассмотрены проблемы, возникающие во время проведения контроля технического состояния подземных тепловых сетей с трубопроводами в пенополиуретановой тепловой изоляции, проложенных бесканальным способом. Описаны специфические дефекты, возникающие в данных объектах контроля вследствие наличия многослойной структуры. Составлено электрическую схему замещения участка подземного трубопровода с пенополиуретановой изоляцией. Приведен расчет основных элементов электрической схемы замещения. Определена зависимость изменения тока и напряжения, возникающие в месте дефекта, от входных параметров генератора (напряжения и частоты). Рассчитаны электрические параметры элемента безопасности. На основе усовершенствованного электромагнитного метода контроля разработана информационно–измерительная система для контроля подземных тепловых сетей. Предложена методика проведения контроля участков подземных тепловых сетей, расположенных между двумя тепловыми камерами, усовершенствованным электромагнитным методом. Исследования, проведенные с использованием информационно–измерительной системы, показали высокую степень корреляции между выявленными дефектами и их реальной наличием.

Ключевые слова: метод, трубопровод, пенополиуретановой изоляции, техническое состояние, электрическая схема замещения.

Problems that occur during inspection of underground heat supply networks' technical state with urethane foam insulated and trenchless pipelines are considered. Specific defects that precipitate in the pipelines because of multilayer structure are pointed. Equivalent electrical schematic of underground pipeline section with urethane foam insulation is drawn. The calculation of main elements of equivalent electrical schematic is presented. The relationship between current and voltage change that occurs in the defect's place and input parameters of generator (current and voltage) is developed. Electrical parameters of safety element are calculated. Based on improved electromagnetic testing method the information and measuring system for inspection of underground heat supply networks are developed. It is proposed the testing technique of underground section of heat supply networks that are located between two heat chambers by use of improved electromagnetic method. Research carried out with information and measuring system demonstrated high correlative value of detected defects and their existence.

Key words: method, pipeline, urethane foam insulation, technical state, equivalent electrical schematic.

Теплопостачання більшості житлових будинків та промислових підприємств в Україні здійснюється підземними тепловими мережами, значна частина яких давно відслужила свій термін [1, 2]. Через незадовільний технічний стан кількість аварій у таких тепломережах поступово зростає. Економічні збитки від втрати енергоносіїв і ліквідації аварій тепломереж в межах держави сягають сотень мільйонів гривень. Для покращення ситуації останні кілька років здійснюється інтенсивна заміна старих трубопроводів тепломереж з мінераловатною ізоляцією новими, що мають пінополіуретанову (ППУ) теплову ізоляцію і захисну гідроізоляцію.

Нові тепломережі прокладаються тільки з використанням трубопроводів в ППУ-ізоляції, в основному безканальним способом. Ці трубопроводи мають значний термін експлуатації (25 років і більше) і теплоізоляційні характеристики, які у кілька разів перевищують характеристики трубопроводів з мінераловатною ізоляцією [3].

Однак, досвід експлуатації безканальних тепломереж з трубопроводами в ППУ-ізоляції показав, що в них, внаслідок наявності багатшарової структури, виникають специфічні дефекти, які не були властиві трубопроводам з мінераловатною ізоляцією, прокладених в каналах. При цьому ступінь впливу таких дефектів на працездатність трубопроводів є доволі значним.

Одним з небезпечних дефектів трубопроводів в ППУ-ізоляції є поява води у просторі між металевим трубопроводом та гідроізоляцією, спричинена цятковою короїзою (рис. 1, а). Цяткова короїза може виникнути як в тілі трубопроводу, так і у місцях зварних з'єднань через дефекти металу і порушення водно-хімічного режиму. При цьому здійснюється постійний витік незначної кількості гарячої води з трубопроводу, яка зволожуючи ППУ-ізоляцію, поступово її руйнує, поширюючись в просторі між металевим трубопроводом та шаром гідроізоляції на значні відстані. В результаті такого процесу утворюються хімічні сполуки, які спричиняють інтенсивну короїзу зовнішніх стінок трубопроводу. Оскільки швидкість короїзних явищ залежить від температури, то у працюючому трубопроводі тепломережі вони розвиваються за короткий час. Це може призвести до розгерметизації трубопроводу на значній площі і виникнення аварії на тій ділянці тепломережі, де не існує підозри на пошкодження.

Ще одним дефектом трубопроводів з ППУ-

ізоляцією є руйнування захисного шару гідроізоляції, яке може виникнути внаслідок механічного пошкодження її як в період виконання монтажних робіт, так і в період експлуатації від надмірного тиску ґрунту на окремих ділянках (рис. 1, б). Через пошкоджену гідроізоляцію ґрунтовий електроліт поступово просочується у шар ППУ-ізоляції, руйнуючи його і створюючи контакт зовнішньої стінки металевого трубопроводу з ґрунтом. Це, у свою чергу, викликає короїзу стінок трубопроводу, швидкість розвитку якої залежить від площі контакту металу з ґрунтом, його вологості, наявності солей у ґрунті тощо [4].

Основною проблемою контролю дефектів трубопроводів з ППУ-ізоляцією залишається можливість проведення досліджень тільки у опалювальний період, тобто, коли по трубопроводах циркулює теплоносіє. Однак, у опалювальний період змодельовати той чи інший вид дефекту на реально діючій тепломережі, через яку здійснюється теплопостачання споживачів, для проведення досліджень і налаштування засобів контролю практично неможливо.

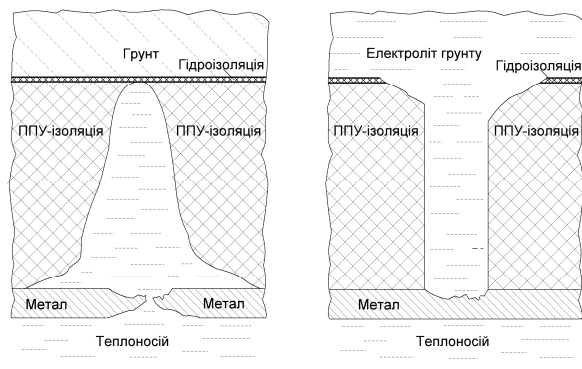
Тому задача удосконалення існуючих методів безконтактного контролю стану підземних теплових мереж з ППУ ізоляцією є надзвичайно актуальною, вирішення якої дозволить більш своєчасно визначати місця існування дефектів та встановлювати їх види.

Питанням контролю підземних теплових мереж присвячена значна кількість робіт [4÷9]. Здебільшого пошкодженнями теплових мереж в процесі експлуатації є руйнування металу трубопроводів внаслідок дії внутрішньої і зовнішньої короїзи, а також погіршення характеристик теплової та гідроізоляції.

Основними дефектами металу трубопроводів тепломереж усіх типів є: потоншення стінки, тріщина та розрив металу, зумовлені дією короїзи або розшарування.

До дефектів теплової ізоляції можна віднести: зволоження ізоляції, зменшення ступеня адгезії та часткове і повне її руйнування.

Для визначення технічного стану підземних теплових мереж в процесі їх експлуатації використовується багато видів контролю та значна кількість контактних і безконтактних методів [10]. Однак, проведений аналіз показав, що в даний час немає універсального методу контролю стану трубопроводів безканальних підземних теплових мереж з ППУ-ізоляцією, який би давав змогу виявляти місця небезпечних дефектів і повністю оцінити їх технічний стан. Наприклад, застосування



а) б)

а) – дефект виду “мігруюча вода”; б) – дефект виду “руйнування теплової та гідроізоляції”

Рисунок 1 – Специфічні дефекти, що виникають у трубопроводах з пінополіуретановою тепловою ізоляцією

акустичних методів обмежується значними звукоізолюючими властивостями ППУ-ізоляції, її сильною адгезією до трубопроводу, а також значною звуковідбиваючою здатністю гідроізоляції. Теплові методи внаслідок значної теплоізоляції ППУ-трубопроводів, у більшості випадків, не дають змоги виявити навіть трасу пролягання трубопроводів, оскільки зовнішні теплові завади практично повністю маскують корисний сигнал. Електромагнітні методи дозволяють визначати місця розривів та трасу пролягання трубопроводів, але їх застосування обмежується питаннями безпеки споживачів тепла в будівлях. Також недоліком електромагнітних методів є застосування доволі низьких частот, які не можуть проникнути з трубопроводу в ґрунт через товсті шари його ізоляцій [11÷15].

З аналізу можна зробити висновок, що для виявлення дефектів підземних теплових мереж безканальної прокладки з трубопроводами в ППУ-ізоляції перспективним є застосування саме електромагнітного методу, який повинен бути певним чином вдосконалений.

Дана стаття присвячена удосконаленню електромагнітного методу контролю для застосування його при виявленні дефектів трубопроводів з ППУ-ізоляцією, які прокладені безканальним способом. До останнього часу електромагнітний метод для контролю теплових мереж не застосовувався через те, що робочі частоти генераторів (в більшості випадків до 1500 Гц) давали змогу поширюватись струмові по тілу трубопроводу на значні відстані, що створювало можливість ураження споживачів тепла змінним струмом.

Особливо небезпечною така ситуація є для відкритих мереж, де споживачі мають безпосередній контакт з гарячою водою, що подається трубопроводами тепломережі в будівлі.

Розглянений удосконалений електромагнітний метод для контролю технічного стану підземних теплових мереж з ППУ-ізоляцією прокладених безканальним способом. Суть удосконалення полягає у застосуванні елемента безпеки, який приєднується на кінці ділянки контролю між трубопроводом та ґрунтом і служить для запобігання ураження струмом споживачів тепла, а також для створення необхідного активного чи реактивного опору в електричній ланці контролю на різних частотах, що підвищує імовірність виявлення дефектів виду “мігруюча вода” і “руйнування теплової та гідроізоляції” (рис. 1).

Метою досліджень є удосконалення електромагнітного методу контролю шляхом введення додаткових пасивних елементів безпеки та розрахунку параметрів електричних ланок, що несуть інформацію про дефекти трубопроводів з ППУ-ізоляцією.

Для того, щоб застосувати удосконалений електромагнітний метод для контролю трубопроводів з ППУ-ізоляцією які прокладені безканально, необхідно розглянути специфіку об'єкта контролю. На відміну від нафтогазопроводів, які мають суцільну ізоляцію на значній довжині, тепломережа з трубопроводами в ППУ-ізоляції складається з певної кількості коротких ділянок, які розділені між собою тепловими камерами. Приклад ділянки тепломережі з трубопроводами в ППУ-ізоляції наведено на рис.2. В теплових камерах 1 і 2 розміщена запірна арматура 3, яка за допомогою фланців 4 з'єднує між собою ділянки трубопроводів 5, прокладених в ґрунті. Теплова 6 та гідроізоляція 7 цих ділянок у теплових камерах відсутня для створення в них відповідного температурного режиму, при якому з настанням морозів не замерзатиме вода і комфортно працюватиметься персоналу. Через теплоносій 8 та фланцеві з'єднання 4 існує електричний контакт між ділянками тепломережі. Наявність відкритих ділянок металевих трубопроводів 5 у теплових камерах 1 та 2 дозволяє здійснювати приєднання засобів вимірювань безпосередньо до поверхонь трубопроводів, не руйнуючи ізоляцію. Це дає змогу розділити тепломережу на окремі ділянки контролю з довжинами $L, L1, L2$.

Розглянемо застосування удосконаленого електромагнітного методу контролю на прикладі ділянки довжиною L , розміщеної між

двома тепловими камерами (рис. 2). Оскільки між ділянками трубопроводу знаходиться запірні арматура 3, то електричний контакт між ними внаслідок наявності фланцевих з'єднань 4 погіршується. Однак, теплоносій, який циркулює трубопроводами, через вміст у ньому домішок і солей проводить змінний струм, особливо в області низьких частот. Якщо до такого трубопроводу приєднати генератор змінного струму, що використовується при контролі для створення електромагнітного поля у трубопроводі, це може стати причиною ураження струмом споживачів тепла.

Суть удосконалення електромагнітного методу полягає у застосуванні елемента безпеки, який складається з прецизійного резистора 9, котушки індуктивності 10 та перемикача 11 і приєднується в кінці ділянки контролю в тепловій камері 1 до поверхні металевого трубопроводу 5 та до заземлювача 12 (рис. 2). Завданням елемента безпеки є створення рівня змінної напруги, яка є безпечною для людини.

Виходи генератора змінної напруги 13 під'єднуються до поверхні металевого трубопроводу 5 в тепловій камері 2 та до заземлювача 14. Оскільки струм від генератора 12 по трубопроводу може потекти у обидва боки від точки приєднання, то розглянемо схему заміщення (рис. 3) зображених на рис. 2 ділянок підземного трубопроводу з ППУ-ізоляцією.

Елемент безпеки та генератор змінної напруги на рис. 3 позначені пунктирними лініями. Всі ланки схеми заміщення представлені як комплексні опори Z з відповідними індексами. Елемент безпеки на

схемі заміщення зображений спрощено (одна ланка I_4 та I_5). Генератор має ЕРС E та внутрішній опір $Z_{\text{ГЕН}}$. Точками A, B і C, D позначено початок та кінець ділянки контролю з довжиною L (рис. 3).

Розглянемо класичний випадок, коли ізоляція трубопроводу не пошкоджена і елемент безпеки відсутній ($Z_6 \approx \infty$). При ввімкненні генератора струм $I_{\text{ГЕН}}$ теоретично потече в усіх ділянках трубопроводу і поділиться на струми $I_1 \div I_5$ (рис. 3). При цьому струм $I_3 \approx 0$. Оскільки ділянки тепломережі між тепловими камерами є доволі короткими (середня довжина в зоні міст не перевищує 120 м), це може призвести до виникнення значного рівня змінної напруги у споживачів тепла по обидва боки від досліджуваної ділянки. Для запобігання ураження споживачів тепла струмом генератора в кінці ділянки контролю (між точками C та D на рис. 3) вмикається елемент безпеки. Необхідність введення елемента безпеки також полягає в тому, що він повинен певним чином впливати на розподіл струмів та напруг в трубопроводі. Реактивний опір Z_6 елемента безпеки повинен бути таким, щоб змінна напруга у споживачів зменшилась до допустимого рівня. При цьому струм I_3 суттєво зростає, а струми I_4 та I_5 відповідно зменшуються. Також на зменшення струмів I_4 та I_5 впливають контактні опори, що виникають на фланцевих з'єднаннях Z_{K1} і Z_{K2} ,

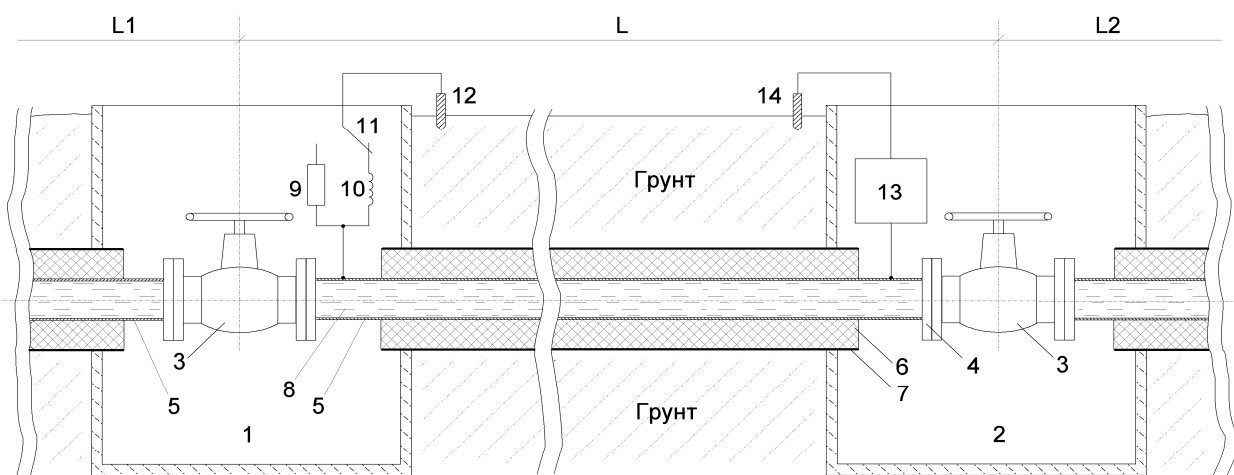


Рисунок 2 – Застосування удосконаленого електромагнітного методу для контролю ділянки тепломережі з трубопроводами в пінополіуретановій ізоляції

величина яких зростає із ростом частоти сигналу генератора. Експериментально встановлено, що на частотах вище 3 кГц струмами, які поширюються у суміжні з контрольованим трубопроводом ділянки через фланцеві з'єднання, можна знехтувати.

Таким чином отримуємо одну ділянку контролю, в якій поширюються струми I_1 , I_2 та I_3 . Спрощена схема заміщення такої ділянки трубопроводу наведена на рис. 4. У цій схемі струм I_2 протікає через ізоляцію трубопроводу в ґрунт.

Від стану ізоляції трубопроводу залежить значення струму I_2 та напруги U_{CM} , яка поділяється на напруги U_{CD} і U_{DM} .

Враховуючи, що опір Z_3 характеризує стікання струму з трубопроводу як з довгого заземлювача [16], його можна вважати чисто активним і однаковим по всій довжині ділянки

контролю.

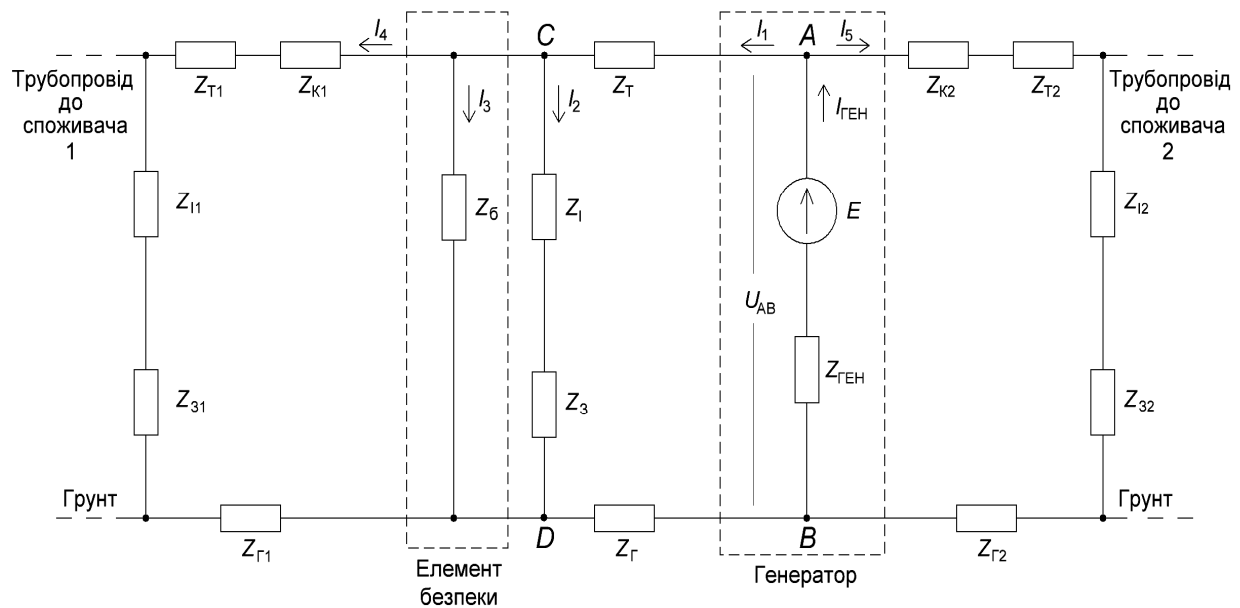
Ділянка CD (рис. 3) визначає параметри ізоляції трубопроводу, а точка D – зону контакту ізоляції трубопроводу з ґрунтом.

Із схеми заміщення зображеної на рис. 4 видно, що струм генератора I_1 згідно з законом Ома матиме значення:

$$I_1 = \frac{U_{AB} + E}{Z_{ГЕН}}, \quad (1)$$

де U_{AB} – вихідна напруга генератора, В; E – напруга генератора, В; $Z_{ГЕН}$ – комплексний опір генератора, Ом.

Розглянемо елементи схеми заміщення ділянки трубопроводу з ППУ–ізоляцією більш детально (рис. 5). При цьому застосуємо методику, наведену в [16].



Z_T, Z_{T1}, Z_{T2} – питомі лінійні опори ділянок трубопроводу, Ом/м; $Z_Г, Z_{Г1}, Z_{Г2}$ – питомі лінійні опори ґрунту на кожній ділянці, Ом/м; Z_1, Z_{11}, Z_{12} – опори ізоляції ділянок трубопроводу, Ом; Z_3, Z_{31}, Z_{32} – опори ґрунту струмам стікання на кожній ділянці, Ом; Z_K, Z_{K1}, Z_{K2} – контактні опори в зонах фланцевих з'єднань трубопроводів, Ом; Z_6 – опір елемента безпеки, Ом; $Z_{ГЕН}$ – внутрішній опір генератора, Ом; $I_{ГЕН}$ – вихідний струм генератора, А; U_{AB} – вихідна напруга генератора, В; E – е.р.с. генератора, В

Рисунок 3 – Схема заміщення ділянок підземного трубопроводу з пінополіуретановою ізоляцією

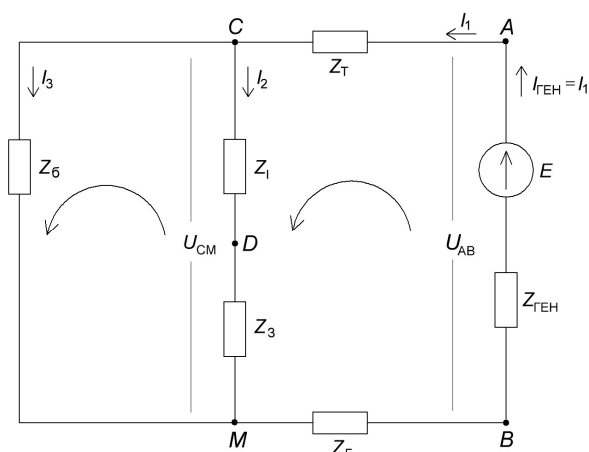


Рисунок 4 – Спрощена схема заміщення однієї ділянки підземного трубопроводу з пінополіуретановою ізоляцією

Питомий лінійний опір трубопроводу знаходиться з виразу:

$$Z_T = R_T + i \cdot \omega \cdot L_T, \quad (2)$$

де R_T – погонний активний опір трубопроводу, Ом / м; L_T – внутрішня індуктивність трубопроводу, Гн/м; ω – кругова (циклічна) частота змінного струму генератора, рад/с.

Активний опір трубопроводу розраховується за формулою:

$$R_T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_T \cdot \sigma_T \cdot \Delta}, \quad (3)$$

де r_T – зовнішній радіус трубопроводу, м; σ_T – питома електропровідність металу трубопроводу, Ом/м; Δ – глибина проникнення струму в метал трубопроводу, м.

Враховуючи залежність Δ від частоти f сигналу змінного струму генератора, значення R_T можна представити у виді:

$$R_T = \frac{\pi^2}{2r_T} \cdot \sqrt{\mu_T \cdot \rho_T \cdot f}, \quad (4)$$

де μ_T – магнітна проникність металу трубопроводу, Гн/м; ρ_T – питомий опір металу трубопроводу, Ом·м.

Враховуючи експериментальні дані, наведені в [16], шляхом апроксимації отримано залежність глибини проникнення струму в метал трубопроводу від частоти сигналу

(коефіцієнт кореляції 0,946), яка має вид:

$$\Delta = 2,812 - 0,314 \cdot \ln(f). \quad (5)$$

Внутрішня індуктивність трубопроводу визначається як відношення внутрішнього магнітного потоку у металі трубопроводу до струму, що проходить через трубопровід, з урахуванням поверхневого ефекту, який враховує магнітну енергію, зосереджену всередині провідника. Магнітна енергія провідника зменшує внутрішню індуктивність трубопроводу. Внутрішня індуктивність трубопроводу знаходиться з виразу:

$$L_T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_T \cdot \sigma_T \cdot \omega \cdot \Delta} = \frac{\pi}{2 \cdot r_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_T \cdot \rho_T}{f}}. \quad (6)$$

Лінійний опір ґрунту вздовж трубопроводу можна представити як суму опору ґрунту вздовж трубопроводу $Z_{ГЛ}$ і опору струмам зміщення, зумовленим магнітним потоком між трубопроводом і ґрунтом $Z_{ГМ}$:

$$Z_G = Z_{ГЛ} + Z_{ГМ}. \quad (7)$$

Лінійний опір ґрунту вздовж трубопроводу розраховується з формули:

$$Z_{ГЛ} = R_{ГЛ} + j \cdot \omega \cdot L_{ГЛ}, \quad (8)$$

де $R_{ГЛ}$ – питомий активний опір ґрунту вздовж трубопроводу, Ом·м; $L_{ГЛ}$ – внутрішня індуктивність ґрунту навколо трубопроводу, Гн/м.

Враховуючи, що для переважної кількості ґрунтів відносна магнітна проникність практично рівна одиниці ($\mu_r = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$), значення питомого активного опору ґрунту $R_{ГЛ}$ знаходимо з виразу:

$$R_{ГЛ} = \frac{\mu_r \cdot \omega}{8} = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-7}, \quad (9)$$

де μ_r – відносна магнітна проникність ґрунту, Гн/м.

Внутрішня індуктивність ґрунту, розміщеного навколо трубопроводу розраховується за формулою:

$$L_{ГЛ} = \frac{\mu_3 \cdot M^2}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{r_3}{r_T + h_{13}} \right) - \frac{2 \cdot M - 1}{4M^2} \right], \quad (10)$$

де $M = \frac{r_3^2}{r_3^2 - (r_T + h_{I3})^2}$; μ_3 – магнітна проникність землі, Гн/м; r_3 – радіус землі, який оточує трубопровід, м; h_{I3} – товщина ізоляції трубопроводу, м.

Розглянемо втрати, пов'язані з струмом зміщення. Очевидно, що ці втрати пов'язані тільки з магнітним потоком і знаходяться з виразу:

$$Z_{ГМ} = 0 + j \cdot \omega \cdot L_{ГМ}, \quad (11)$$

де $L_{ГМ}$ – зовнішня індуктивність трубопроводу, Гн/м.

Зовнішня індуктивність трубопроводу $L_{ГМ}$ визначається величиною магнітного потоку між трубопроводом і оточуючим його ґрунтом та знаходиться за формулою:

$$L_{ГМ} = \frac{\mu_{I3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{1,85}{r_E \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_{I3}}{\rho_{I3}}}} \right), \quad (12)$$

де μ_{I3} – магнітна проникність ізоляції трубопроводу, Гн/м; ρ_{I3} – питомий опір ізоляції трубопроводу, Ом/м; $r_E = \sqrt{2r_T \cdot h_E}$ – еквівалентний радіус зосередженого струму в ґрунті, м; $h_E = \frac{1,85}{\sqrt{\omega \cdot \mu_r \cdot \sigma_r}}$ – еквівалентна глибина залягання зосередженого струму в ґрунті, м.

Значення опору ґрунту струмові стікання Z_3 отримується з формули Зуїде [16]:

$$R_3 = \frac{\rho_r}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{1,12}{|\gamma| \cdot \sqrt{2 \cdot r_T \cdot h_E}} \right), \quad (13)$$

де ρ_r – питомий опір ґрунту, Ом·м; $|\gamma|$ – модуль постійної розповсюдження струму у трубопроводі, м⁻¹;

Оскільки ізоляція трубопроводу має активну та реактивну складові, то значення її активного опору визначається з виразу:

$$R_{I3} = 1,2 \cdot \frac{\rho_{I3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_T + h_{I3}}{r_T} \right). \quad (14)$$

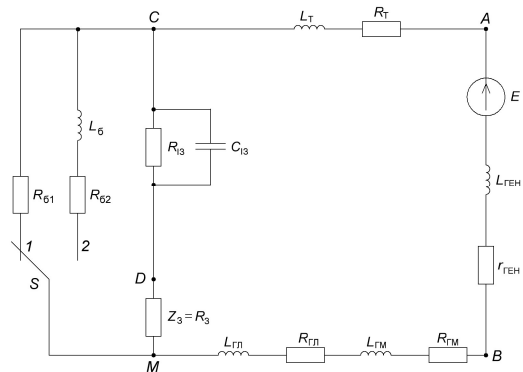


Рисунок 5 – Детальна схема заміщення ділянки підземного трубопроводу з пінополіуретановою ізоляцією

Ємнісна складова реактивного опору ізоляційного покриття підземного трубопроводу розраховується за формулою:

$$C_{I3} = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{l}{\ln \left(\frac{r_{I3}}{r_T} \right)}, \quad (15)$$

де ϵ_r – відносна діелектрична проникність, Ф/м; ϵ_0 – електрична стала (діелектрична проникність вакууму), Ф/м; r_{I3} – зовнішній радіус ізоляційного покриття трубопроводу, м; l – довжина ізоляційного покриття на ділянці контролю, м.

Оскільки внаслідок зміни ємності ізоляції виникає затримка сигналу, то вона впливає на зміну його фази, що можна зафіксувати з поверхні ґрунту [16].

Внутрішній опір генератора $r_{ГЕН}$ та його індуктивність $L_{ГЕН}$ задаються технічними характеристиками генератора та при необхідності змінюються.

Елемент безпеки складається з двох ланок: R_{61} та R_{62} і L_6 (рис. 5), кожна з яких приєднується до поверхні трубопроводу за допомогою перемикача S в залежності від того, який вид дефекту виявляється.

Для визначення траси трубопроводу застосовується чисто активний опір елемента безпеки R_{61} (положення 1 перемикача S). На низьких частотах контролю при дефекті наскрізного пошкодження ізоляції ємність C_{I3} має великі значення, а при дефекті “мігруюча вода” – малі. На високих частотах контролю при наскрізному пошкодженні ізоляції струм I_2

різко зростає, а при дефекті “мігруюча вода” змінюється плавно. Виявляти дефекти в трубопроводах з ППУ–ізоляцією можна шляхом фіксації резонансів, які виникають в коливальному контурі, утвореному ланкою елемента безпеки R_{62} і L_6 та параметрам дефекту C_{13} , R_{13} (положення 2 перемикача S).

Для визначення характеристик елемента безпеки застосуємо закони Кірхгофа. Згідно з рисунком 4 складемо систему рівнянь для визначення невідомих величин схеми заміщення:

$$\begin{cases} I_1 = I_2 + I_3, \\ I_1 \cdot (Z_{\Gamma} + Z_{\text{ГЕН}} + Z_{\text{Т}}) + I_2 \cdot (Z_1 + Z_3) = E, \\ I_3 \cdot Z_6 - I_2 \cdot (Z_1 + Z_3) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Розв'яжемо отриману систему рівнянь, здійснивши наступні підстановки:

$$I_1 = \frac{E + U_{\text{AB}}}{Z_{\text{ГЕН}}}, \quad Z_6 = \frac{U_{\text{CM}}}{I_3}. \quad (17)$$

Звідси отримаємо значення невідомих величин у схемі заміщення підземного трубопроводу (рис. 4):

$$I_2 = \frac{E - \frac{E + U_{\text{AB}}}{Z_{\text{ГЕН}}} \cdot (Z_{\Gamma} + Z_{\text{Т}} + Z_{\text{ГЕН}})}{(Z_1 + Z_3)}, \quad (18)$$

$$Z_6 = \frac{I_2 \cdot (Z_1 + Z_3)}{I_1 - I_2}, \quad (19)$$

$$U_{\text{DM}} = I_2 \cdot Z_3. \quad (20)$$

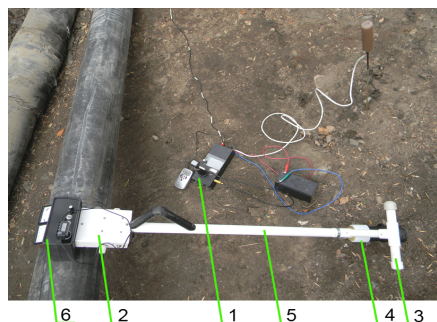
Розрахувавши всі ланки схеми заміщення, можна визначити як вплине зміна характеристик ізоляції трубопроводу на величину напруги U_{DM} та струму I_2 в електричному колі ділянки контролю.

Для виявлення дефектів у підземних теплових мережах безканальної прокладки з трубопроводами в ППУ–ізоляції розроблено інформаційно–вимірювальну систему (ІВС), в якій реалізовано удосконалений електромагнітний метод контролю [17].

Експериментальний візрєць розробленої ІВС наведено на рис. 6. Робочі частоти ІВС мають діапазон від 2 до 20 кГц. Вихідна потужність генератора змінюється від 1 до 50 Вт.

Для керування та передачі інформації між приймальним та передавальним вузлами ІВС застосовано дуплексний радіозв'язок в діапазоні частот $90 \div 108$ МГц. Дальність зв'язку сягає 300 м.

Методика контролю за допомогою розробленої ІВС полягає в наступному. Спочатку в мікропроцесор вводяться дані для розрахунку елементів схеми заміщення і напруги захисту на кінці ділянки контролю. З отриманих розрахунків визначаються параметри елемента безпеки. Після приєднання генератора 13 в тепловій камері 1 та елемента безпеки в тепловій камері 2 проводиться пошук траси трубопроводу 5 (рис. 2). При цьому перемикач 11 переводиться в положення, коли до трубопроводу приєднується резистивне навантаження 9. Далі на прийальному вузлі вмикається пошукова частота (1477 Гц) яка передається по радіоканалу на генератор. Генератор на пошуковій частоті випромінює у трубопровід визначену потужність. Оператор з приймальним вузлом рухається вздовж траси трубопроводу від теплової камери 1 до теплової камери 2, визначаючи місце його залягання і глибину за максимумом чи мінімумом сигналу. Далі до трубопроводу 5 перемикачем 11 приєднується індуктивне навантаження 10.



1 – передавальний вузол (генератор); 2 – приймальний вузол; 3 – магнітна антена; 4 – вузьконаправлений мікрофон; 5 – штанга; 6 – обчислювальний блок

Рисунок 6 – ІВС для виявлення дефектів у трубопроводах підземних теплових мереж з ППУ–ізоляцією

Приймальний вузол по радіоканалу передає частоти від 2000 до 20000 Гц на генератор, який випромінює їх у трубопровід. При цьому приймальний вузол знаходиться нерухомо над елементом безпеки і фіксує зміну його струму. При стрибкоподібній зміні струму на певній частоті її значення фіксується і далі на генератор передається сигнал тільки однієї частоти. Оператор з приймальним вузлом рухається вздовж траси трубопроводу від теплової камери 1 до теплової камери 2, фіксуючи зміну амплітуди і фази сигналу. У місці, де значення амплітуди різко зростає, а фази – зменшиться і буде знаходитись дефект.

Застосовувати дану методику можна як в опалювальний, так і в неопалювальний періоди.

За допомогою розробленої ІВС обстежено більше 10-ти кілометрів теплових мереж з трубопроводами в ППУ-ізоляції в містах Івано-Франківську, Тисмениці та Калуші. По всій довжині контрольованих ділянок виявлено 19 місць імовірного існування дефектів. На шістьох з них проведено шурфування з подальшим візуальним контролем наявності та розміру дефекту. У всіх випадках шурфування наявність дефектів підтвердилась (рис. 7), що зафіксовано у відповідних актах промислової апробації ІВС.



а



б

а – дефект виду “мігруюча вода” (частота 12,7 кГц); б – дефект виду “руйнування теплової та гідроізоляції” (частота 4,6 кГц)

Рисунок 7 – Виявлені дефекти трубопроводів підземних теплових мереж з ППУ-ізоляцією

ВИСНОВКИ

Таким чином специфічні дефекти, які виникають у трубопроводах з пінополіуретановою ізоляцією не дають змоги виявляти їх існуючими методами. Проблеми, які виникають під час проведення досліджень технічного стану підземних теплових мереж з трубопроводами в пінополіуретановій теплової ізоляції прокладених безканальним способом

вимагають удосконалення електромагнітних методів контролю. Суть удосконалення полягає у застосуванні елемента безпеки та підвищенні робочих частот при проведенні контролю.

Елемент безпеки складається з пасивних компонентів і приєднується в кінці ділянки контролю між ґрунтом та трубопроводом для захисту споживачів від ураження змінним струмом генераторів засобів вимірювань.

Застосування елемента безпеки і високих робочих частот дозволило розбити трубопровід тепломережі на окремі ділянки контролю та локалізувати їх електрично.

Це дало змогу розробити електричну схему заміщення ділянки трубопроводу та розрахувати її елементи, звідки шляхом моделювання встановлено вплив характеристик дефектів ізоляції трубопроводів тепломереж на електричні параметри елементів схеми заміщення.

Розроблено ІВС для виявлення дефектів підземних теплових мереж та методику досліджень, яка дозволяє проводити контроль як опалювальний, так і в неопалювальний періоди.

Дослідження, проведені з використанням ІВС показали високу ступінь кореляції між виявленими дефектами і їх реальною наявністю.

Застосування удосконаленого електромагнітного контролю дозволить завчасно виявляти потенційно небезпечні ділянки в трубопроводах тепломереж, запобігаючи виникненню аварійних ситуацій.

1. Євтухова Т.О. Сучасний стан комунальної енергетики України / Т.О.Євтухова, А.І. Симборський // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – №17. – С. 31–36.
2. Диагностика состояния трубопроводов тепловых сетей // Сборник Труды конференции «Тепловые сети. Современные решения», НП «Российское теплоснабжение», 2005.
3. Трубопроводы попередньо теплоізовані спінієм поліуретаном для мереж гарячого водопостачання та теплових мереж [Текст]: ДБН Б В.2.5–31:2007.– [Чинний від 2007–08–01].–К: Держстандарт України, 2007. – 88 с.
4. Безпрозваний А. Диагностика теплотрас: досвід і перспективи вдосконалення / А.Безпрозваний // Київенерго сьогодні. – 2006. – № 117.
5. Самойлов Е.В. Диагностика как элемент коррозионного мониторинга трубопроводов тепловых сетей / Е.В. Самойлов // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 4, (20). – С. 29 – 34.
6. Крылов Д.Н. Акустическая диагностика

- (томография) тепловых сетей. Приборы и программное обеспечение / Д.Н. Крылов // *Новости теплоснабжения*. – № 2, – 2008. 7. Гранкин И.В. Опыт применения метода акустической диагностики трубопроводов тепловых сетей / И.В. Гранкин, Д.Б. Домрачев // *Новости теплоснабжения*. – № 2, – 2008, – С. 42–48. 8. Синавчиан С.Н. Исследование возможности поиска мест повреждения изоляции теплопроводов канальной прокладки методом выносного электрода / С.Н.Синавчиан, С.Е. Теленков // *Новости теплоснабжения*. – №6, – 2003. 9. Дубсон М.И. Методы и способы контроля за техническим состоянием и эксплуатацией тепловых сетей и эффективной работой ИТП на опыте предприятия «Ригас Силтумс» / М.И.Дубсон // *Новости теплоснабжения*. – № 4, – 2008. 10. Вацшиак І.Р. Аналіз методів контролю технічного стану підземних теплових мереж/ І.Р. Вацшиак, С.П. Вацшиак, О.М. Карпаш, А.В. Яворський// *Нафтогазова енергетика*, 2010. – № 2 (13). – С. 64–69. 11. Джала Р.М. Аналіз інформативності коефіцієнта заникання струму у електромагнітному методі контролю ізоляції трубопроводів / Р.М. Джала, Л.П. Дікмарева // *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. – 1999. – №3. – С. 45–50. 12. Безконтактний метод і апаратура для оперативних обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Л.П. Дікмарева, Б.Я. Вербенець, П.М. Хлипняк // *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. наукових статей*. – К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, 2006. – С. 57–61. 13. Джала Р.М. Методи і засоби електромагнітних обстежень захисту від корозії підземних трубопроводів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.11.16 «Інформаційно-вимірювальні системи» / Джала Роман Михайлович; НАН України. Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. – Львів – 2002. – 36 с. 14. Джала Р.М. Електродинамічна модель трубопроводу з дефектом ізоляції / Р.М. Джала // *Відбір і обробка інформації*. – 2000. – №14 (90). – С. 25–30. 15. Дікмарева Л.П. Эквивалентные электрические схемы замещения подземных трубопроводов / Л.П. Дікмарева // *Радіоелектроніка і телекомунікації: Вісник ДУ «Львівська політехніка»*, 1998. – №352. – С. 26–30. 16. Сидоров Б.В. О расчете электрических параметров трубопроводов/ Б.В.Сидоров, Л.Ф.Щербаков // *Изоляция трубопроводов*, Тр. ВНИИСТа, 1982. – С 92 –109. 17. Вацшиак І.Р. Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для контролю підземних теплових мереж / І.Р. Вацшиак, С.П. Вацшиак, О.М. Карпаш // *Методи та прилади контролю якості*. – 2011. – №27. – С39–43.

Поступила в редакцію 24.05.2012 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук., проф. Костишин В. С.