

УДК 53.088.22

І.Р. Ващишак

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДЗЕМНИХ ТЕПЛОМЕРЕЖ

Проведено метрологічний аналіз інформаційно-вимірвальної системи для контролю технічного стану підземних теплових мереж безканальної прокладки на основі теорії невизначеностей. Невизначеність інформаційно-вимірвальної системи обчислено на основі аналізу складових блоків системи та основних факторів впливу на їх функціонування з урахуванням рівномірного закону розподілу ймовірностей появи будь-якого значення параметру зі встановленого діапазону меж його зміни.

Ключові слова: метрологічний аналіз, невизначеність, інформаційно-вимірвальна система, тепломережа.

Вступ

Постановка проблеми. Останнім часом широко обговорюються аспекти експлуатації та діагностики підземних інженерних споруд. Проведення достовірного контролю технічного стану трубопроводів теплових мереж, прихованих від візуального спостереження шарами ґрунту, асфальту, щебеню, а в ряді випадків і шаром будівельного сміття – це болюче питання для всіх підприємств, що займаються транспортуванням теплової енергії. Часто, місця пошкоджень на ділянках теплових мереж виявляються не відразу, а на другий чи третій раз шурфування ґрунту. Використовування для шурфування важкої техніки, відновлення будівельних конструкцій і проведення відповідних заходів з відновлення благоустрою території обходяться не дешево. Крім того, відсутність апріорної інформації про вид виявленого дефекту не дає можливості спланувати об'єми ремонтних робіт.

Тому на сьогодні є актуальним проведення неруйнівного контролю підземних теплових мереж з високою точністю локалізації місця виявленого дефекту та з можливістю прогнозування його виду.

Аналіз літературних джерел та нормативної документації [1] показав, що відомі методи та засоби контролю тепломереж дають доволі точні результати для виявлення витоків у каналних мережах. Контроль безканальних теплових мереж з трубопроводами в пінополіуретановій ізоляції представляє інтерес як з точки зору виявлення дефектів, так і розрізнення їх за видами.

Розроблена нами інформаційно-вимірвальна система (ІВС) для контролю технічного стану підземних теплових мереж [2] базується на удосконаленні індукційного та акустичного методів неруйнівного контролю і дає змогу за вимірюванням трьох параметрів виявляти місця дефектів, а за рахунок розробленого методу ідентифікації [3] розрізняти дефекти за видами.

Мета статті. В статті наведено метрологічний аналіз розробленої ІВС для контролю технічного стану підземних теплових мереж, в якій вжито конструктивні заходи з метою зменшення сумарної невизначеності для підвищення достовірності контролю.

Виклад основного матеріалу

Достовірність контролю технічного стану підземних теплових мереж залежить від метрологічних характеристик засобів контролю та використаної методики проведення контролю.

Метрологічний аналіз проведено шляхом розрахунку невизначеності вимірювання інформативних параметрів. На основі аналізу складових блоків ІВС та основних факторів впливу на їх функціонування розроблено схему нагромадження сумарної невизначеності (рис. 1).

Всі складові невизначеності розраховано за типом В з урахуванням рівномірного закону розподілу ймовірностей появи будь-якого значення параметру зі встановленого діапазону меж його зміни. Для стандартних блоків і елементів ІВС межі зміни їх параметрів визначено на основі класів точності або відносної похибки, які вказані у технічній документації.

Розрахунок інструментальних складових невизначеності здійснено окремо по кожному каналу вузла збудження та вимірвального вузла з урахуванням точності складових елементів та стандартних засобів вимірювання, які містять дані вимірвальні канали.

Вузол збудження містить пристрій акустичного збудження, який згідно з паспортними даними має нерівномірність АЧХ у робочій області частот $H\delta_{АЧХ} = 6$ дБ. Враховуючи, що діапазон зміни інтенсивності звуку пристрою при середньому значенні становить $D_1 = 94$ дБ, відносна похибка від нерівномірності АЧХ розраховується як:

$$\delta_{АЧХ} = \frac{H\delta_{АЧХ} \cdot 100}{D_1} = \frac{6 \cdot 100}{94} = 6,4(\%). \quad (1)$$

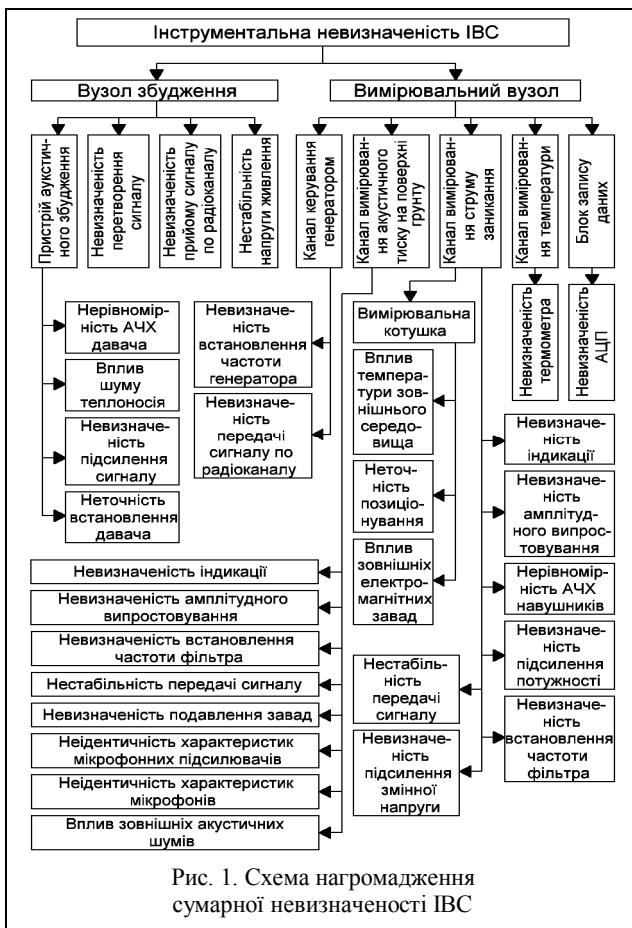


Рис. 1. Схема нагромадження сумарної невизначеності ІВС

Оскільки інтенсивності 94 дБ відповідає звуковий тиск $D_A = 1$ Па, його діапазон зміни, зумовлений нерівномірністю АЧХ, буде рівним:

$$\Delta_A = \frac{D_A \cdot \delta_{АЧХ}}{100} = \frac{1 \cdot 6,4}{100} = 64 \text{ (мПа)}. \quad (2)$$

Отже, невизначеність пристрою акустичного збудження становить:

$$u_{АЧХ} = \frac{\Delta_A}{\sqrt{3}} = \frac{64}{\sqrt{3}} = 36,9 \text{ (мПа)}. \quad (3)$$

Шум теплоносія у трубопроводі має різні значення, які залежать від швидкості його руху та діаметру труби. Так, для трубопроводу діаметром 250 мм середнє значення шуму теплоносія $\Delta_{Ш}$ знаходиться в межах 6 – 10 мПа. В цьому випадку невизначеність матиме значення:

$$u_{Ш} = \frac{\Delta_{Ш}}{\sqrt{3}} = 5,8 \text{ (мПа)}. \quad (4)$$

Оскільки вищевказані складові невизначеності акустичного випромінювача є в цілому некорельовані між собою, то їх сумарна невизначеність складає:

$$u_{\Sigma} = \sqrt{u_{АЧХ}^2 + u_{Ш}^2} = 37,4 \text{ (мПа)}. \quad (5)$$

Відносна невизначеність, приведена до діапазону збудження становить:

$$\delta_{\Sigma} = \frac{u_{\Sigma}}{D_A} \cdot 100\% = 3,7\%. \quad (6)$$

Похибка підсилення сигналу підсилювачем потужності в діапазоні частот 0,4 – 4 кГц згідно з його паспортними даними $\delta_{П}$ становить 1,2 % при вихідній напрузі 5 В. Тоді, розрахована аналогічно виразам (2), (3) та (6), невизначеність підсилення сигналу $\delta_{П}$ становить 0,7 %.

Невизначеність відтворення точного значення акустичного тиску пристроєм акустичного збудження залежить від неточності його закріплення на металевому хомуті та від неточності встановлення хомути на трубопровід. Для зменшення цієї невизначеності в хомут вмонтоване “сідло” для давача, а сам хомут кріпиться на зачищений трубопровід. За експериментально вимірними значеннями звукового тиску встановлено, що відносна невизначеність від неточності встановлення пристрою акустичного збудження δ_B не перевищує 2,8 %.

Похибка перетворювача постійної напруги за номінальної напруги живлення 12 В становить 0,9 %. Відхилення опору елемента навантаження при використанні прецизійного резистора С5-5-10 з опором 100 Ом становить 1 %. Розраховані, аналогічно виразам (2), (3) та (6), невизначеності становлять $\delta_{ПЕРЕТВ} = 0,52\%$, $\delta_B = 0,58\%$.

Для нормальної роботи вузла збудження похибка від нестабільності напруги живлення не повинна перевищувати 5 %, при цьому невизначеність складає $\delta_{Ж} = 2,9\%$. Похибка прийому сигналу по радіоканалу залежить від впливу радіозавад і при стійкому радіозв’язку з приймальним вузлом для приймача RT-212 не перевищує 0,2 %. При $D_B = 0,5$ В невизначеність $\delta_P = 0,12\%$. Отже, сумарна відносна невизначеність вузла збудження розраховується як:

$$\delta_{ГЕН} = \sqrt{\delta_{\Sigma}^2 + \delta_{П}^2 + \delta_B^2 + \delta_{Ж}^2 + \delta_{ПЕРЕТВ}^2 + \delta_{Ж}^2 + \delta_P^2} = 5,57\%. \quad (7)$$

У блоці керування генератором приймального вузла невизначеність точності встановлення частоти генератора визначається властивостями кварцового резонатора і в діапазоні температур -20...+40 °С становить $\delta_{Г} = 0,03\%$ від максимальної частоти генерації (20 кГц). Невизначеність передачі сигналу по радіоканалу не має суттєвого значення, оскільки приймач генераторного вузла перетворює навіть сильно спотворені імпульси в цифрову форму зі стандартною амплітудою.

У каналах вимірювання акустичного тиску та струму у стінках трубопроводу використано індикатори М42100 з класом точності $\delta_{ІНД} = 1,5$ при діапазоні шкали $D_{ШК} = 0-0,4$ Па. Їх невизначеність становить $u_{ІНД} = 3,5$ мПа. Відносна невизначеність приведена до діапазону шкали згідно з (6) становить $\delta_{ІНД} = 0,88\%$.

Для зменшення невизначеностей електронних вузлів ІВС в них застосовано резистори типу С2-23 з допустимим відхиленням від номіналу 1 %. Похибка перетворення сигналу амплітудних випростовувачів на мікросхемах AD736 становить 0,15 %. Для зменшення похибок фільтрів їх використано спеціалізованих мікросхемах НА-2841 і конденсаторах типу К71-7 з допустимим відхиленням від номіналу 0,5 %. При цьому похибка встановлення центральної частоти фільтрів в діапазоні температур $-20...+35$ °С становить 1,2 %. Розгалужувачі сигналу, виконані на мікросхемах ОР-37, мають нестабільність передачі сигналу на частоті 1000 Гц не більше 0,02 %. Диференціальний підсилювач також зібрано на ОР-37. При умові рівності вхідних сигналів його похибка подавлення завад становить 0,06 %. Мікрофонні підсилювачі зібрано на прецизійних мікросхемах ОР-177, похибка коефіцієнта підсилення яких в діапазоні сигналу 0-5 В становить 0,008 %. При цьому експериментально встановлена неідентичність характеристик мікрофонних підсилювачів не перевищувала 0,5 %.

Розраховані, аналогічно виразам (2), (3), (6), невизначеності електронних вузлів становлять: $\delta_{\text{АМПЛ}} = 0,09$ %, $\delta_{\Phi} = 0,69$ %, $\delta_{\text{РОЗГ}} = 0,012$ %, $\delta_{\text{Д}} = 0,035$ %, $\delta_{\text{М}} = 0,3$ %.

Вимірювальний і компенсаційний мікрофони вибирались за подібністю характеристик за допомогою пістонафона RFT05001. Неідентичність їхніх АЧХ в діапазоні 0,5–4 кГц перевищувала 4 %.

Вплив зовнішніх акустичних шумів на результати вимірювань перевірявся експериментально шляхом застосування акустичних систем (АС). Одночасно з роботою АС ІВС вимірювався звуковий тиск від трубопроводу, збудженого акустичним перетворювачем. При ввімкнених вимірювальному і компенсаційному мікрофонах у діапазоні частот завад від 0,4 до 5 кГц та звуковому тиску АС 0,1 Па зміна звукового тиску, вимірюного ІВС, становила 12 мПа. При цьому невизначеності становлять:

$\delta_{\text{МК}} = 2,31$ %, $\delta_{\text{ЗОВН}} = 1,73$ %.

Отже, сумарна відносна невизначеність каналу вимірювання акустичного тиску розраховується як:

$$\delta_{\text{АК}} = \sqrt{\delta_{\Gamma}^2 + \delta_{\text{ІНД}}^2 + \delta_{\text{АМПЛ}}^2 + \delta_{\Phi}^2 + \delta_{\text{РОЗГ}}^2 + \delta_{\text{Д}}^2 + \delta_{\text{М}}^2 + \delta_{\text{МК}}^2 + \delta_{\text{ЗОВН}}^2} = 3,11(\%) \quad (8)$$

Значну похибку у канал вимірювання струму у стінках трубопроводу вносить вимірювальна котушка. Для зменшення цього впливу при зміні температури було використано термостабільний резистор і застосовано підсилювач змінної напруги з високим коефіцієнтом підсилення згідно з наведеним в [4]. Після цього невизначеність, викликана впливом температури зовнішнього середовища $\delta_{\text{TЗ}}$ на коефіцієнт перетворення вимірювальної котушки, склала 0,3 %.

Неточність позиціонування виявляється у відхиленні осі штанги з вимірювальною котушкою від вертикальної осі контролюваного трубопроводу та горизонтального зміщення осі котушки. Застосування водяних рівнів значно зменшило вплив невірної позиціонування. В цьому випадку невизначеності позиціонування котушки в горизонтальній $\delta_{\text{ПОЗ.Г}}$ і вертикальній $\delta_{\text{ПОЗ.В}}$ площинах не перевищували 3 °.

Завдяки електромагнітному екрануванню котушки і блоків ІВС та застосуванню екранованого кабелю і фільтрів вдалося досягти подавлення електромагнітної завади з частотою 50 Гц на рівні 40 дБ, тобто вплив її на результати вимірювань не перевищує 1 %. Звідси невизначеність $\delta_{\text{ЗАВ}} = 0,7$ %.

У каналі вимірювання струму заникання у стінках трубопроводу застосовано підсилювач змінної напруги за схемою, аналогічною до схем мікрофонних підсилювачів, включених послідовно. Однак, за рахунок підвищення коефіцієнта підсилення до 10^5 невизначеність коефіцієнта передачі підсилювача змінної напруги $\delta_{\text{ЗМ}}$ зросла до 0,08 %. Розгалужувачі сигналів, індикатор і фільтр аналогічні використаним в каналі вимірювання акустичного тиску. Підсилювач низької частоти (ПНЧ) виконано на мікросхемі LM386. При цьому невизначеність його коефіцієнта підсилення потужності $\delta_{\text{ПНЧ}}$ за умови номінальної напруги живлення +12 В у діапазоні температур $-20...+40$ °С становить 0,14 %. Невизначеність від нерівномірності АЧХ навушників $\delta_{\text{Н}}$ в діапазоні 0,5–4 кГц не перевищує 2 %.

Отже, сумарна відносна невизначеність каналу вимірювання струму у стінках трубопроводу розраховується з виразу:

$$\delta_{\text{ЗАН}} = \sqrt{\delta_{\text{TЗ}}^2 + \delta_{\text{ПОЗ.Г}}^2 + \delta_{\text{ПОЗ.В}}^2 + \delta_{\text{ЗАВ}}^2 + 2 \cdot \delta_{\text{РОЗГ}} \cdot \delta_{\Phi} + \delta_{\text{ПНЧ}}^2 + \delta_{\text{Н}}^2 + \delta_{\text{АМПЛ}}^2 + \delta_{\text{ІНД}}^2} = 4,89(\%) \quad (9)$$

Невизначеність каналу вимірювання температури складається з похибки термометра, яка становить 0,5 % в діапазоні вимірювання температур $-50...+70$ °С, тобто $D_{\text{T}} = 50+70=120$ °С. Невизначеність термометра згідно з (3) складає $u_{\text{T}} = 0,35$ °С. Відносна невизначеність приведена до діапазону температур згідно з (6) становить $\delta_{\text{T}} = 0,29$ %.

Блок запису даних приймального вузла містить прецизійне АЦП, відносна невизначеність якого становить $\delta_{\text{АЦП}} = 0,18$ %.

Отже, інструментальна невизначеність ІВС при вимірюванні кожного з інформативних параметрів становить:

$$\delta_{\text{ІНСТР}} = \sqrt{\delta_{\text{ГЕН}}^2 + \delta_{\text{АК}}^2 + \delta_{\text{ЗАН}}^2 + \delta_{\text{АЦП}}^2 + \delta_{\text{T}}^2} = 8,04(\%) \quad (10)$$

Сумарна невизначеність контролю та ідентифікації виду дефекту складається із інструментальної невизначеності вимірювань трьох інформативних параметрів та методичних невизначеностей, пов'язаних з неадекватністю математичних моделей та з використанням сумарної бальної оцінки, розрахованої в [3]. Отже, значення сумарної невизначеності контролю складає:

$$\delta = \sqrt{8,04^2 + 17,9^2 + 7,93^2} = 21,2(\%). \quad (11)$$

Висновки

Отримане значення невизначеності для ІВС контролю трубопроводів характеризує достатню вірогідність контролю і відповідає вимогам, які пред'являються до систем, що є аналогами розробленої, оскільки при такій невизначеності майже 80% всіх дефектів будуть виявлені та ідентифіковані за видами. При цьому виявляються місця потенційних аварій, виникненню яких можна запобігти, раціонально спланувавши першочерговість ремонтних робіт.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ТЕПЛОСЕТЕЙ

И.Р. Ващишак

Проведен метрологический анализ информационно-измерительной системы для контроля состояния подземных тепловых сетей бесканальной прокладки на основе теории неопределенности. Неопределенность информационно-измерительной системы вычислена на основе анализа составляющих блоков системы и основных факторов влияния на их функционирование с учетом равномерного закона распределения вероятностей появления любого значения параметра из установленного диапазона границ его изменения.

Ключевые слова: метрологический анализ, неопределенность, информационно-измерительная система, теплосеть.

METROLOGICAL ANALYSIS OF THE INFORMATION AND MEASURING SYSTEM FOR THE CONTROL OF UNDERGROUND HEATING SYSTEMS

I.R. Vashchyshak

The metrological analysis of information-measuring system for the control of heating networks of underground trenchless laying based on the theory of uncertainty are conducted. Uncertainty of information-measuring system based on the analysis of constituent units of the system is calculated, the main factors influencing their operation based on a uniform distribution law of probabilities of any parameter of the set range limits of its changes are taken into account.

Keywords: metrological analysis, uncertainty, information-measuring system, heating system.

Список літератури

1. Аналіз методів контролю технічного стану підземних теплових мереж / І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, О.М. Карпаш, А.В. Яворський // *Нафтогазова енергетика*. – 2010. – № 2 (13). – С. 64-69.

2. Ващишак І.Р. Розроблення інформаційно-виміральної системи для контролю підземних теплових мереж / І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, О.М. Карпаш // *Методи та прилади контролю якості*. – 2011. – №27. – С. 39-43.

3. Метод ідентифікації видів дефектів трубопроводів підземних теплових мереж / І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, Л.А. Витвицька, П.М. Райтер // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2013. – № 1/34. – С. 162-171.

4. Яворський А.В. Розробка методу та системи для безконтактного контролю стану ізоляції промислових нафтогазопроводів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.13 „Прилади і методи контролю та визначення складу речовин” / А.В. Яворський. – Івано-Франківськ, 2005. – 22 с.

Надійшла до редколегії 1.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук. П.М. Райтер, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ.