



**Методи і прилади контролю
технологічних параметрів**

Прийнято 01.05.2025. Прорецензовано 12.06.2025. Опубліковано 27.06.2025.

УДК 534.8

DOI: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-65-77

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ****Лютак І. З.***

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8960-5871>
e-mail: ihor.liutak@nung.edu.ua

Лютак З. П.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
<https://orcid.org/0009-0000-8323-6980>
e-mail: ihorlt@gmail.com

Анотація. У роботі запропоновано концепцію автоматизованої системи контролю технічного стану магістральних газопроводів, що функціонує в умовах складного гірського рельєфу. Система базується на комплексному застосуванні тензометричних і ультразвукових методів діагностики напружено-деформованого стану (НДС) металу трубопроводів. Використано математичну модель акустопружності для розрахунку величин напружень на основі зміни швидкості поширення ультразвукових хвиль у матеріалі. Модель використовує узагальнений закон Гука для опису зв'язку між напруженнями та деформаціями, дозволяючи визначати компоненти тензора напружень через швидкості поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль. Для верифікації моделі проведено лабораторні дослідження зразків сталі марки Х60 на розривній машині з поетапним навантаженням і вимірюванням деформацій за допомогою тензодатчиків та ультразвукових перетворювачів. Експерименти із застосуванням розривної машини Р-50 підтвердили високу точність ультразвукового методу порівняно з тензометричним, особливо на початкових етапах деформування. Результати досліджень показали високу відповідність між розрахунковими та експериментальними даними, зокрема за ультразвуковим методом, що дозволило підтвердити його доцільність для використання в умовах експлуатації магістральних газопроводів. Представлено структурну схему автоматизованої системи, адаптованої до пунктів катодного захисту. Практична реалізація включає розробку системи з тензодатчиками та ультразвуковим пристроєм СІГМА, що працює за принципом автоциркуляції частоти, підвищуючи точність вимірювань. Система інтегрована з станціями катодного захисту, що дозволяє передавати дані в реальному часі на диспетчерський пункт. Запропонований підхід

Запропоноване посилання: Лютак, І., & Лютак, З. (2025). Автоматизована система контролю технічного стану магістральних газопроводів. *Методи та прилади контролю якості*, 1(54), 65-77. doi: 10.31471/1993-9981-2025-1(54)-65-77

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

дозволяє здійснювати безперервний контроль НДС у реальному часі та оперативно приймати рішення щодо технічного стану об'єктів трубопровідного транспорту. Отримані результати є основою для подальшого створення інтелектуальних систем моніторингу з адаптивною логікою, що враховує особливості навколишнього середовища та параметри навантаження.

Ключові слова: напружено-деформований стан, ультразвуковий контроль, тензометрія, сталь Х60, математична модель, магістральні газопроводи.

Вступ

Трубопровідний транспорт газу займає важливе місце в індустріальному комплексі транспортних систем нашої держави. Це пов'язано, по-перше, з ефективністю постачання великих об'ємів газу до споживача, а, по-друге, з економічністю цих поставок, що дає можливість ефективному розвитку багатьох галузей народного господарства. Безперебійне постачання газу визначається багатьма технічними і експлуатаційними факторами. Складність і різноманітність об'єктів, які входять до лінійної частини магістральних газопроводів, прокладених у складних гірських умовах Карпат, визначають багатоваріантну ітераційну процедуру контролю їх технічного стану. Внаслідок зсувів величезних масивів ґрунту окремі ділянки трубопроводів змінюють своє просторове положення. Це призводить до неможливості визначення їх первинних координат, а ще більше – до розмірів і швидкості їх зміни у складних гірських місцевостях. Зміна просторового положення трубопроводу призводить до перерозподілу міцнісних параметрів металу трубопроводів, зокрема, підвищення напружено-деформованого стану (НДС) трубопроводу і, в подальшому до можливих аварій з тяжкими наслідками – пожеж, забруднення навколишнього середовища, великих економічних втрат для відновлення їх роботоздатності. Незважаючи на ряд заходів, які запобігають завчасно безаварійній експлуатації магістральних газопроводів у зсувонебезпечних місцях, зокрема укріплення схилів гір, ця задача не вирішується до кінця.

Метою даної статті є розробка та впровадження автоматизованої системи контролю технічного стану магістральних

газопроводів, яка забезпечує оперативний моніторинг і діагностику напружено-деформованого стану металу трубопроводів в умовах складного гірського рельєфу. Це дозволяє своєчасно виявляти потенційно аварійні ситуації, які виникають внаслідок зміщення ґрунту, просідання фундаментів та інших геологічних і техногенних факторів, що характерні для Карпатського регіону. Запропонована система базується на комбінованому використанні тензометричних та ультразвукових методів контролю, що значно підвищує точність, надійність та оперативність оцінки технічного стану трубопроводів і забезпечує безпечну експлуатацію газотранспортної мережі у складних умовах експлуатації.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

У статті [1] розглянуто розробку та застосування автоматизованої локальної системи для екологічного моніторингу та управління сільським господарством. Авторами запропоновано нові методи автоматизації, що базуються на інноваційних технологіях збору та аналізу ґрунтових вод. Основна увага приділяється методам автоматизації реєстрації витоків та моніторингу екологічного стану навколишнього середовища. Водночас, у контексті нашого дослідження недоліком роботи є те, що вона не враховує дію сил гуртових мас на об'єкт контролю, яким є трубопровід, що приводить до зміни параметрів металу трубопроводу. Також у статті не наведено практичних результатів, які можна було б застосувати для контролю технічного стану магістральних газопроводів. Робота [2] присвячена аналізу інноваційних технологій у сфері глобального трубопровідного транспорту

нафти і газу. Автори досліджують сучасні підходи до підвищення ефективності та безпеки експлуатації трубопроводів, аналізують тенденції розвитку та інноваційні рішення в цій галузі. Наведено систематизацію технологій та інноваційних підходів до моніторингу й оцінки технічного стану газотранспортних мереж. Однак, хоча дослідження надає значну інформацію про сучасні інновації у сфері транспорту газу, воно не висвітлює детально специфічних технічних рішень для контролю напружено-деформованого стану трубопроводів в умовах гірської місцевості. Також не наведено реальних практичних результатів щодо впровадження автоматизованих систем моніторингу НДС. Автори [3] провели комплексний огляд сучасних методів і технологій контролю технічного стану резервуарів для зберігання нафтопродуктів. Вони докладно аналізують ультразвукові, акустичні, тензометричні та інші методи, що дозволяють ефективно оцінювати стан металу резервуарів. Значна увага приділена можливостям автоматизації контролю, а також способам підвищення надійності результатів діагностики. Разом з тим, об'єктами дослідження у цій статті виступають резервуари, а не трубопроводи, що створює певні обмеження щодо прямого перенесення результатів для використання у дослідженні магістральних газопроводів. Також відсутні конкретні приклади застосування описаних методів у складних гірських умовах. У статті [4] розглядаються інтелектуальні технології моніторингу й обслуговування муніципальних трубопроводів із застосуванням штучного інтелекту. Автори пропонують алгоритми та рішення для автоматичного аналізу стану трубопровідних мереж, прогнозування їхнього технічного стану та своєчасного попередження аварійних ситуацій. Використання штучного інтелекту дозволяє суттєво підвищити ефективність управління комунальними мережами. Водночас у роботі акцент зроблено на

муніципальних мережах і меншою мірою на магістральних трубопроводах, які мають інші параметри та особливості експлуатації. Також у статті недостатньо розглядається специфіка застосування технологій у важкодоступних місцевостях, таких як гірський рельєф Карпат, що обмежує практичну цінність її результатів для нашого дослідження. Стаття [5] присвячена дослідженню автоматизованих технологій зварювання трубопроводів із сталі марки L415 ME, що призначені для транспортування водню. Детально описано технології автоматизованого зварювання стикових з'єднань, проведено аналіз якості швів і механічних властивостей зварних з'єднань. Важливими є рекомендації щодо параметрів автоматизованого зварювання та впливу на міцність трубопроводів. Втім, дослідження має вузький напрямок на технології зварювання, саме для водневих трубопроводів, хоча результати мають значення для оцінки міцності металу. У дослідженні не розглядається методика діагностики напружено-деформованого стану металу під час експлуатації трубопроводів, особливо в умовах зміни рельєфу, що є актуальним для нашого дослідження. У статті [6] розглянуто метод контролю герметичності елементів ядерних реакторів, який спрямований на підвищення екологічної безпеки. Авторами запропоновано акустичні методи діагностики, що дозволяють виявляти навіть незначні дефекти у структурі обладнання. Основною перевагою запропонованого методу є висока чутливість та точність виявлення витоків на ранніх стадіях експлуатації обладнання. Проте дане дослідження спрямоване переважно на об'єкти ядерної енергетики, а саме, на контроль герметичності. Хоча використано акустичні технології, методика не повністю адаптована для оцінки напружено-деформованого стану трубопроводів в умовах, близьких до критичних, що ускладнює її безпосереднє застосування в нашому дослідженні. Також відсутні практичні приклади впровадження систем у сфері трубопровідного транспорту газу. Стаття

[7] присвячена внутрішньому контролю ризикованих підводних трубопроводів великої довжини з використанням технології акустичного резонансу. Автори демонструють, як акустичний метод дозволяє детально виявляти дефекти й корозійні пошкодження, забезпечуючи надійну діагностику на значній глибині під водою. Метод підтвердив свою ефективність у складних експлуатаційних умовах, де інші підходи є менш результативними. Водночас описаний метод розрахований переважно на підводні трубопроводи і має свою специфіку, пов'язану з акустичним середовищем (вода). В умовах наземних гірських газопроводів існують принципово інші особливості експлуатації, що потребують адаптації методики. Крім того, у дослідженні недостатньо уваги приділено визначенню напружено-деформованого стану металу досліджуваного об'єкта. У роботі [8] представлено огляд сучасних сенсорних технологій для структурного моніторингу технічного стану конструкцій. Автори систематизують критерії продуктивності сенсорних систем та розглядають новітні технології, такі як бездротові датчики, оптоволоконні сенсори, акустичні та тензометричні пристрої. Велика увага приділяється перевагам і недолікам кожної групи сенсорів та перспективам їхнього подальшого розвитку. Однак у статті надано загальний огляд без конкретних рекомендацій щодо практичного застосування цих технологій саме у складних умовах експлуатації магістральних газопроводів у гірських місцевостях. Це ускладнює пряме перенесення методів і результатів огляду до контролю НДС магістральних газопроводів. Також у роботі відсутні практичні приклади або експериментальні результати, що знижує її практичну цінність. Автори [9] досліджують методику вимірювання витрати трифазного потоку (нафта-газ-вода) із використанням ультразвукового доплерівського методу імпульсних хвиль. Основну увагу приділено точності й

стабільності результатів вимірювань у складних умовах багатоеlementного потоку. Важливим досягненням дослідження є підтвердження можливості застосування ультразвукового методу для визначення параметрів потоків різних фаз одночасно. Недоліком цього дослідження є його орієнтація на потоки речовин (нафта, газ, вода), а не на оцінку стану металевих конструкцій трубопроводу. Також методика потребує суттєвої адаптації, оскільки не містить рекомендацій щодо контролю напружено-деформованого стану металу трубопроводу, через який протікає нафтопродукт. Стаття [10] представляє роботизовану систему на основі комбінації візуальних та ультразвукових датчиків із застосуванням глибокого навчання для виявлення небезпек у виробничих умовах, таких як витоки газу та дугові розряди. Важливим є поєднання штучного інтелекту і ультразвукових методів для точного і своєчасного виявлення небезпечних ситуацій, що дозволяє суттєво підвищити безпеку виробничих процесів. Проте дослідження зосереджене на ідентифікації небезпечних ситуацій за допомогою штучного інтелекту та не включає методів діагностики технічного стану конструкцій трубопроводів. Крім того, описані в роботі підходи потребують складних обчислювальних ресурсів і програмного забезпечення, що робить їх застосування для систем моніторингу трубопроводів у важкодоступних гірських умовах складним і ресурсозатратним.

В основі даної роботи лежить використання сплайн-інтерполяції для опису сканлайну при пошуку точок контрастного переходу.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Попри значну кількість досліджень і розробок у сфері моніторингу технічного стану магістральних газопроводів, залишаються невирішеними питання оперативної та точної діагностики напружено-деформованого стану металу трубопроводів, особливо в складних

природно-кліматичних і геологічних умовах гірських районів Карпат. На сьогодні більшість існуючих систем моніторингу орієнтовані на рівнинні чи типові умови експлуатації і не враховують специфіку проявів деформацій трубопроводів під дією таких факторів, як зсуви ґрунтів, різкі зміни рельєфу та нестабільність положення фундаментів. Недостатньо опрацьованим залишається питання інтегрованого застосування різних методів контролю, таких як ультразвуковий та тензометричний, у рамках єдиної автоматизованої системи. Більшість досліджень пропонують застосування одного методу контролю, що суттєво обмежує можливості оперативної та комплексної оцінки технічного стану трубопроводів у реальному масштабі часу. Відсутність комплексних рішень призводить до обмеженого рівня надійності моніторингу та ускладнює прогнозування виникнення потенційних аварійних ситуацій. Також актуальною залишається проблема забезпечення безперервного та надійного функціонування систем моніторингу у важкодоступних районах. Існуючі технології часто потребують періодичного обслуговування та ручної перевірки результатів, що є проблематичним в умовах складного рельєфу та ускладнює їхнє практичне впровадження. Не вирішено питання автоматизованої передачі й обробки даних із високою точністю і мінімальними втратами, що критично важливо для оперативного прийняття рішень про технічний стан газопроводу. Враховуючи зазначене, важливим і невирішеним питанням залишається розробка і впровадження автоматизованих систем діагностики, які б інтегрували переваги різних методів, забезпечували ефективну роботу в складних умовах експлуатації та дозволяли своєчасно і точно визначати напружено-деформований стан металу трубопроводів, попереджаючи таким чином аварії з тяжкими економічними та екологічними наслідками.

Формулювання цілей статті

Основною метою даної статті є розроблення ефективної автоматизованої системи комплексного моніторингу та контролю напружено-деформованого стану магістральних газопроводів, що експлуатуються у складних гірських умовах. Для досягнення цієї мети поставлено ряд задач, зокрема: визначення найбільш інформативних і надійних методів контролю механічних напружень, удосконалення конструкторії п'єзоелектричних перетворювачів та методик ультразвукового і тензометричного контролю, а також розроблення алгоритмів автоматичної обробки й передачі даних для оперативного прийняття рішень про технічний стан трубопроводів. У рамках дослідження розглядається поєднання двох взаємодоповнювальних методів – тензометричного та ультразвукового. Тензометричний метод використовується для безперервного контролю поточних деформацій металу трубопроводу на ділянках підвищеного ризику, що дозволяє оперативно реагувати на небезпечні зміни напружень. Ультразвуковий луно-імпульсний метод застосовується як додатковий інструмент для початкової діагностики механічних напружень та виявлення прихованих дефектів структури металу до встановлення тензодатчиків. Окрему увагу в статті приділено питанням автоматизації процесу збору, передачі й обробки інформації, отриманої від різних типів датчиків. Для цього розглядається побудова відповідних блок-схем автоматизованої системи та алгоритмів обробки сигналів, що надходять до диспетчерських пунктів у реальному масштабі часу. Досліджуються можливості впровадження розроблених методик в існуючі системи катодного захисту газопроводів з метою інтеграції отриманих даних в єдину інформаційну платформу для оперативного моніторингу технічного стану магістральних газопроводів.

Теоретична база роботи

Практично неможливо у складних гірських умовах експлуатації газопроводів передбачити, а потім і попередити аварії

без застосування нових підходів до вирішення даної проблеми. У зв'язку з цим все більш актуальною стає задача розробки системних елементів, які були б встановлені на небезпечних ділянках газопроводу і становили складову частину технологічних систем з обробки і визначення поточних даних технічного стану, зокрема зміни НДС металу трубопроводів. За своєю структурою сам технологічний процес постачання газу є неоднорідним, і, відповідно, визначення надійності лінійної системи газопроводів, які експлуатуються тривалий час, включає ряд задач організаційного і технологічного характеру [11]. Дані задачі реалізуються у вигляді пакету прикладних програм (ППО). Оператор газової транспортної системи (ГТС) України у 2023 році ввів в експлуатацію цифрову систему управління технічним станом магістральних газопроводів ІАС "ІТТ-РІМС", що полегшує експертну оцінку залишкової міцності трубопроводів, але дана система не охоплює вирішення всіх задач.

Слід відзначити, що найбільш часто використовуваними для контролю НДС металу в даний час є тензометричний метод. Перевагою цього методу є його доступність, простота, можливість тривалого спостереження за зміною деформацій, використання для автоматизації процесу спостереження за зміною міцнісних характеристик металу труб, а також наявність математичного апарату для перетворення величини деформацій у параметри механічних напруг металу. Недоліком даного методу є те, що визначення зміни напруг при контролі через вимірювання деформацій тензодавачами можна здійснювати тільки з моменту їх встановлення на поверхню металу. Тобто використання тензометричного методу для контролю деформацій на небезпечних ділянках МГ, які утворюються при експлуатації внаслідок зсувів ґрунту, просідання фундаментів, а, особливо, у важкодоступних гірських місцевостях, можливе тільки після визначення початкових параметрів НДС досліджуваної ділянки. Найбільш перспективними методами для вирішення

даних задач є розробка і використання автоматизованих систем контролю, які дають можливість встановлювати реальні механічні параметри металу на небезпечних ділянках газопроводу і контролювати їх зміни в реальному масштабі часу з передачею даних на диспетчерський пункт. Для визначення НДС металу на небезпечній ділянці газопроводу до встановлення тензостанції найбільш перспективними є акустичні методи контролю із застосуванням ультразвуку. Найбільш ефективним є ультразвуковий луно-імпульсний метод контролю з визначення швидкості проходження сигналу через стінку металу трубопроводу у декількох площинах перерізу труби. Для цього вимірюються швидкості проходження поздовжніх хвиль C_1 і у двох ортогональних площинах поперечних хвиль C_{t1} C_{t2} , що дає можливість з високою достовірністю і найбільш повно і точно оцінити НДС металу МГ. Це зумовлено тим, що сталь німецького виробництва марки Х40-Х70, яка використана для будівництва магістральних газопроводів, має ортотропну структуру. Тому важливим завданням є визначення особливостей поширення ультразвуку в пружному середовищі і зв'язок пружних характеристик металу з акустичними параметрами.

Для ефективного застосування ультразвукових методів у системах автоматизованого контролю напружено-деформованого стану (НДС) трубопроводів критично важливим є використання надійних і точних математичних моделей, що враховують фізичні особливості поширення ультразвукових хвиль у пружному середовищі. Зокрема, для магістральних газопроводів характерною є наявність складних видів деформацій, які виникають під дією внутрішніх і зовнішніх факторів, таких як внутрішній тиск, зсуви ґрунтів та температурні зміни металу. У зв'язку з цим особливий інтерес викликає математична модель, яка дозволяє визначати компоненти тензора напружень на основі аналізу характеристик поширення поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль у напружено-деформованому

металевому середовищі трубопроводу. Запропонована у дослідженні модель базується на узагальненому законі Гука, що описує взаємозв'язок напружень і деформацій у пружному середовищі. При цьому враховується, що напружений стан трубопроводу визначається шістьма незалежними компонентами тензора напружень, які формуються під впливом внутрішніх і зовнішніх факторів експлуатації газопроводу. Розроблена математична модель дозволяє детально описати механізм зміни швидкості поширення поздовжньої ультразвукової хвилі залежно від існуючого напружено-деформованого стану, а також визначати акустопружні коефіцієнти, що є ключовими параметрами для практичної реалізації систем автоматизованого моніторингу. Визначені коефіцієнти встановлюються експериментально шляхом випробування зразків трубної сталі на розривній машині, що забезпечує високу точність і достовірність результатів контролю. Отже, поєднання ультразвукових і тензометричних методів на базі розробленої математичної моделі забезпечує комплексний підхід до оцінки НДС металу магістральних газопроводів, особливо у складних умовах експлуатації. Це дозволяє своєчасно виявляти критичні деформації та приймати ефективні рішення для запобігання аварійним ситуаціям і підвищення загальної надійності газотранспортної системи.

В основі акустопружного методу, який дозволяє визначати напружено-деформований стан металу трубопроводів, є залежність (1), яка визначає взаємозв'язок між швидкістю поширення поздовжньої ультразвукової хвилі у пружному середовищі та існуючим у ньому напруженим станом [12]. Ця залежність показує, як механічні напруження, що виникають у стінці трубопроводу, безпосередньо впливають на зміну швидкості ультразвуку. Для її отримання спочатку застосовується узагальнений закон Гука та здійснюється перехід від опису середовища в термінах деформацій до опису напружень через відповідні тензори пружності та податливості. В результаті вдається

отримати рівняння, яке встановлює чітку математичну залежність між акустичними параметрами та напруженнями, присутніми у досліджуваній конструкції.

$$\rho_0 v^2 = C_{33} + M_1 \sigma_{11} + M_2 \sigma_{22}, \quad (1)$$

де M_1 та M_2 – складні функції від пружних констант другого та третього порядків; v – швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в напружено-деформованому середовищі; ρ_0 – густина середовища у ненапруженому стані; σ_{11} , σ_{22} – компоненти тензора напружень; C_{33} – компонент пружних констант другого порядку.

За відсутності напружень у середовищі поширення поздовжньої ультразвукової хвилі рівняння (1) спрощується, тож отримаємо:

$$\rho_0 v^2 = C_{33}. \quad (2)$$

Рівняння (2) є окремим випадком попереднього рівняння для умов, коли трубопровід перебуває в ненапруженому стані. Воно описує швидкість поширення ультразвукової хвилі в середовищі, яке не зазнає впливу жодних додаткових зовнішніх або внутрішніх навантажень. Величина, отримана за цією формулою, використовується як базова або початкова швидкість, відносно якої здійснюється порівняння подальших вимірювань. Це дає змогу точно оцінити зміну швидкості ультразвуку через вплив додаткових напружень, що виникають у процесі експлуатації газопроводу. Різниця швидкостей поширення поздовжньої ультразвукової хвилі у середовищі із присутніми напруженнями та без них, враховуючи (1) та (2), буде такою [12]:

$$\frac{v - v_0}{v_0} = A_1 \sigma_{11} + A_2 \sigma_{22}, \quad (3)$$

де v_0 – швидкість поширення ультразвукової хвилі в середовищі без прикладених зовнішніх зусиль; A_1 та A_2 – акустопружні константи, які є складними функціями від пружних констант другого та третього порядків.

Рівняння (3) визначає відносну зміну швидкості поширення ультразвукової хвилі, яка виникає внаслідок накладання

напружень на метал трубопроводу у двох напрямках. Цей підхід є особливо цінним, оскільки вимірювання абсолютних швидкостей ультразвуку технічно складне, в той час як вимірювання відносної зміни швидкості є простішим і точнішим. Відповідно, саме цей методичний підхід дозволяє проводити практичні вимірювання напружень із високою точністю та надійністю. У (3) вводяться акустопружні коефіцієнти, які показують ступінь чутливості зміни швидкості до певних типів напружень у металі, забезпечуючи таким чином диференційований підхід до визначення виду і напрямку напружень. Іншою формою рівняння (3) є представлення відносної зміни швидкості поширення поздовжньої ультразвукової хвилі як суми та різниці головних напружень, а саме:

$$\frac{v - v_0}{v_0} = A(\sigma_{11} + \sigma_{22}) + B(\sigma_{11} - \sigma_{22}), \quad (4)$$

де $A = \frac{A_1 + A_2}{2}$, $B = \frac{A_1 - A_2}{2}$ – константи акустопружності.

Рівняння (4) є альтернативним попередньому рівнянню, де зміну швидкості ультразвукової хвилі виражено через суму і різницю головних напружень у середовищі. Це представлення має особливу практичну цінність, оскільки дозволяє безпосередньо оцінювати величину та характер напружень у конструкції. Завдяки цьому забезпечується можливість не лише визначення кількісних параметрів напруженого стану, але й оцінка характеру його розподілу, що критично важливо для аналізу стану безпеки і надійності експлуатації трубопроводу в реальних умовах. В результаті розрахунків можна стверджувати, що отримано рівняння акустопружності для проведення контролю напружено-деформованого стану металу стінки трубопроводу такого вигляду:

$$\left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\perp ij} = A_i \sigma_{ii} + A_j \sigma_{jj}, \quad (5)$$

де $\Delta v_{\text{вим}}$ – виміряна зміна швидкості поширення ультразвукової поздовжньої

хвилі в напружено-деформованому середовищі відносно швидкості поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в ненапруженому середовищі; A_i , A_j – акустопружні коефіцієнти, які визначаються експериментально для конкретної марки сталі методом одновісних випробувань на розтяг.

Залежність (5) є узагальненням акустопружного рівняння, що дозволяє проводити вимірювання напруженого стану в довільних напрямках поширення ультразвукових хвиль. Вона враховує виміряну зміну швидкості поширення ультразвукової хвилі в деформованому середовищі відносно початкового стану, що робить її особливо корисною у практичних застосуваннях. Застосування цього рівняння забезпечує можливість проведення моніторингу напруженого стану у будь-яких складних і просторово неоднорідних конструкціях, таких як газопроводи, дозволяючи отримати комплексну картину стану металу з урахуванням реальних умов експлуатації.

Визначення компонентів напружень у трьох головних взаємно перпендикулярних напрямках описується системою рівнянь (6), яка є практичним застосуванням рівняння (5) і дає змогу реалізувати повноцінний тривісний контроль напружень. Використання цієї системи дозволяє встановити величини напружень у кожному з напрямків, що особливо важливо для ділянок трубопроводів із складною конфігурацією напружень. Система рівнянь є ключовим елементом практичної методики акустопружного контролю, забезпечуючи найбільш повну і точну інформацію про напружений стан трубопроводу у реальних умовах експлуатації.

$$\left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\perp xz} = A_x \sigma_{xx} + A_z \sigma_{zz},$$

$$\left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\angle yx} = 1,4142 (A_x \sigma_{xx} + A_z \sigma_{zz}), \quad (6)$$

$$\left. \frac{\Delta v_{\text{вим}}}{v_0} \right|_{\angle yz} = 1,4142 (A_x \sigma_{xx} + A_y \sigma_{yy}).$$

Спосіб експериментального встановлення акустопружних коефіцієнтів, необхідних для практичної реалізації попередніх рівнянь, і описується залежністю (7):

$$A_i = \frac{1}{k \cdot v_0} \sum_{k=1}^k \left[\frac{\Delta v_{вим}}{\sigma_{ij}} \right]_k, \quad (7)$$

де k - кількість кроків навантажень.

Ці коефіцієнти отримуються через одновісні випробування зразків матеріалу трубопроводу на розривній машині шляхом покрокового навантаження та вимірювання відповідних змін швидкості ультразвукових хвиль. Саме цей експериментальний етап дозволяє пов'язати теоретичну модель із реальними властивостями металу, що забезпечує високу точність практичного застосування акустопружних методів контролю НДС трубопроводів. Використання експериментально визначених коефіцієнтів забезпечує максимально достовірні та адаптовані до конкретних умов експлуатації результати контролю, що значно підвищує ефективність та надійність моніторингу технічного стану магістральних газопроводів.

Для високоточного визначення швидкості ультразвуку використовується ультразвуковий пристрій СІГМА, який розроблений в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу. Даний пристрій побудований на принципі автоциркуляції частоти, що дало можливість підвищити точність контролю швидкості поширення ультразвуку. Основним блоком ультразвукового пристрою СІГМА є первинні п'єзоперетворювачі. Блок первинних п'єзоперетворювачів зображено на рис. 1 [12].

У даному блоці розміщені ультразвуковий первинний перетворювач поздовжніх хвиль і два перетворювачі поперечних хвиль, які дають можливість визначати швидкості поперечних хвиль у двох ортогональних площинах. Практика показує, що можна використовувати один п'єзоперетворювач поперечних хвиль з поворотом його на 90 градусів, але при цьому зменшується чутливість контролю. Ультразвукові п'єзоперетворювачі вибирають на частоту 5 МГц.

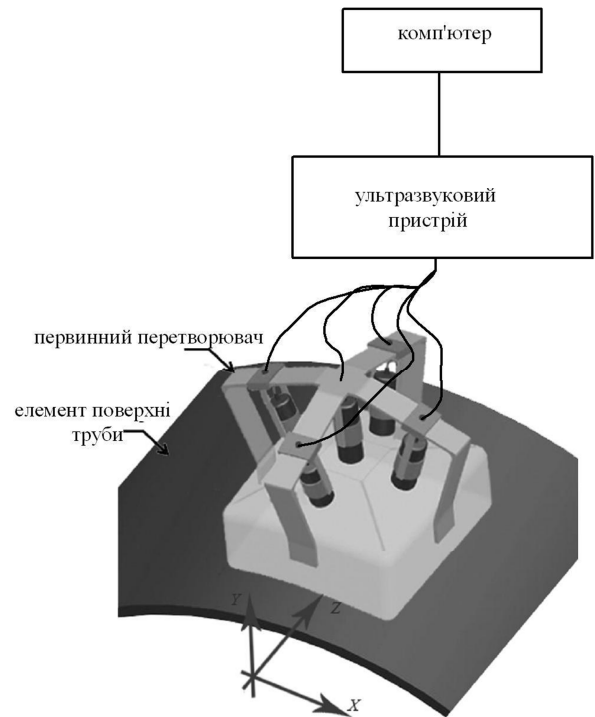
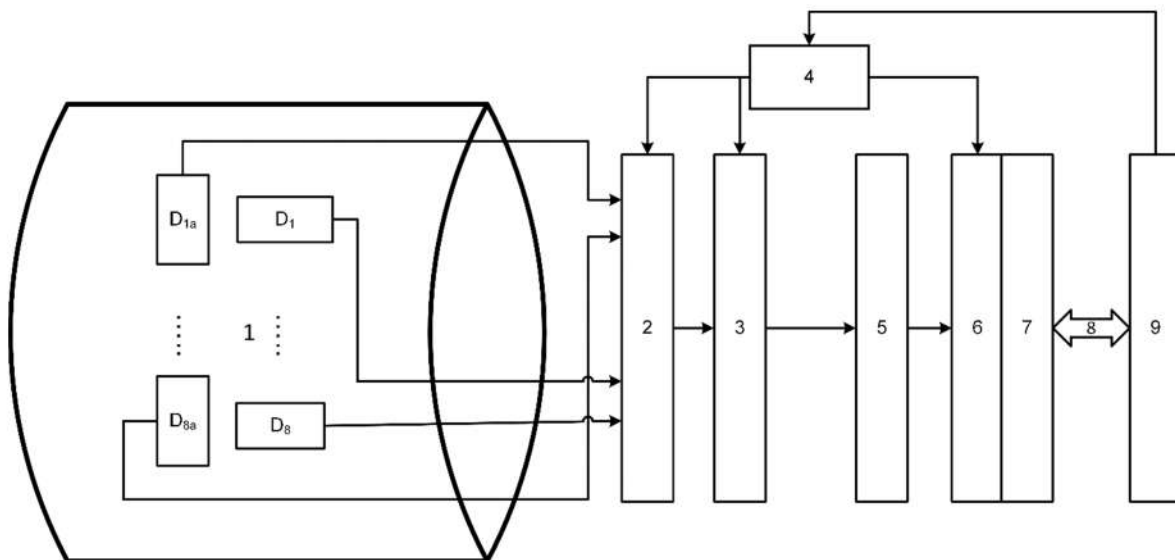


Рисунок 1 – Блок первинних п'єзоперетворювачів

Використовуючи математичну модель визначення механічних напруг через швидкість ультразвуку у металі досліджуваної ділянки, можна зробити висновок про її технічний стан для прийняття подальших рішень. За умови, що сумарні напруги металу небезпечної досліджуваної ділянки не перевищують граничних даних, доцільно використовувати автоматизовану систему контролю зміни НДС металу даної ділянки газопроводу. Блок-схема пристрою зображена на рис. 2.

Суть цього методу полягає в тому, що на трубопроводі в небезпечних перерізах 1 наклеюють тензодавачі $D_1 \dots D_8$ та $D_{1a} \dots D_{8a}$ у двох ортогональних напрямках, якщо відомо, що вони співпадають з напрямком головних напружень. Сигнал з тензодавачів поступає на програмований таймер 2, який опитує по чергові кожен тензодавач. Зміна часу опитування тензодавачів відбувається шляхом зміни тактової частоти. Дані блоки входять у блок комутації, який включає електричне живлення тільки під час опитування тензодавачів. З блоку комутації 2 сигнал через формувач 3 поступає на АЦП 5.



1 – досліджувана ділянка газопроводу, $D_1 \dots D_8$ – тензодавачі, встановлені вздовж твірної труби, $D_{1a} \dots D_{8a}$ – тензодавачі, встановлені перпендикулярно до твірної труби, 2 – комутатор з програмованим електронним таймером, 3 – формувач сигналу, 4 – блок управління, 5 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП), 6 – приймач-передавач, 7 – станція катодного захисту, 8 – лінія зв'язку; 9 – диспетчерський пункт

Рисунок 2 – Автоматизована система контролю

Перетворений у цифрову форму сигнал з АЦП 5 передається на адитивну телемеханізовану станцію катодного захисту "АСКГ-ТМ" 7, якими оснащені магістральні газопроводи, а далі через лінію зв'язку 8 – на комп'ютер 9. У випадку, коли напрямки головних напружень не співпадають з ортогональними напрямками структури металу, то використовують і наклеюють тензодавачі у трьох або більше напрямках по колу в одному або більше перерізах.

За допомогою тензодавачів визначається зміна деформацій.

Результати досліджень

Для лабораторного контролю стану металу трубопроводів було організовано серію експериментів із використанням розривної машини моделі Р-50. Ця машина дозволяє точно дозувати навантаження на дослідні зразки, вимірювати силу й деформації під час розтягування металу, що дає змогу дослідити механічні характеристики матеріалу в умовах, близьких до експлуатаційних. Вона обладнана пультом управління і має функцію фіксації навантаження та відповідної деформації. Зразки для

випробувань виготовлялися відповідно до вимог чинного стандарту. Вони вирізалися із трубної сталі марки Х60, причому особливу увагу надавалось дотриманню умов, які виключають зміну фізичних властивостей металу при механічній обробці. Орієнтація зразків відповідала осі труби, щоб максимально наблизити умови випробування до реальних умов експлуатації. Для забезпечення точного вимірювання деформацій на поверхню зразків монтувалися тензометричні давачі. Застосовувалися фольгові тензодавачі типу КФ5П1, які мають хорошу температурну стабільність і високу чутливість. Це дозволило зафіксувати зміни пружного стану металу в поздовжньому та поперечному напрямках. Крім того, було забезпечено температурну компенсацію показників, що забезпечило стабільність результатів при проведенні вимірювань.

Перед початком кожного дослідження перевіряли справність розривної машини, а також шліфування зразків для забезпечення щільного прилягання ультразвукових перетворювачів. Однією з ключових умов успішного вимірювання є правильне центрування давачів і надійне кріплення, оскільки навіть незначне відхилення може

призвести до суттєвої похибки результатів. Під час дослідження зразки поступово навантажувалися з кроком у 3 кН при постійній швидкості деформування. Одночасно з навантаженням проводилися тензометричні вимірювання, ультразвукове зондування та фіксація всіх параметрів. Ультразвукові перетворювачі були розташовані так, щоб фіксувати напруження у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, що дозволяє отримати повну картину напружено-деформованого стану. Зняття показів здійснювалося на кожному кроці навантаження, що дозволило побудувати повні залежності напруження від прикладеної сили для кожного методу контролю. Завершенням кожного циклу випробувань ставало руйнування зразка, що дозволяло визначити граничні значення міцності. Усі результати були зафіксовані для подальшого порівняльного аналізу з іншими методами оцінювання НДС. Таким чином, розроблена методика лабораторних випробувань дозволила не лише верифікувати теоретичні моделі, але й надати реальні підтвердження ефективності ультразвукового методу контролю в умовах поступового зростання механічного навантаження.

У процесі випробувань використовувалися такі методи визначення напруженого стану: тензометричний (σ_δ) та ультразвуковий (σ_y). Крім того, виконувалися розрахунки теоретичних напружень σ_m за формулами на основі прикладеної сили та площі перерізу. Також було враховано деформаційні характеристики матеріалу через модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона. Для тензометричного методу спостерігалася помітна нестабільність на початку шкали вимірювань через інерційність тензодавачів. Найвищу точність показав ультразвуковий метод, який дозволяв детально фіксувати зміни в пружному стані металу, навіть на початкових етапах навантаження. Результати, отримані за допомогою цього методу, найближчі до теоретичних розрахунків, що свідчить про високу надійність та перспективність його використання в польових умовах для безперервного контролю (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати визначення напружень зразка використаними методами

Навантаження, кН	σ_m (МПа)	σ_δ (МПа)	σ_y (МПа)
0	0	0	0
3	44.1	17.3	36.5
6	94.8	51.9	87.4
9	139	89.7	136.1
12	188.2	127.8	157.3
15	241.5	191.9	272.3
18	282.3	268.6	336
21	326.7	337.1	385.9
24	378.3	412.6	454.2
27	425.4	495.1	492.6
30	478.5	609.3	561

В той же час алгоритм на базі сплайну є більш повільним, іноді до 3-4 разів, виконуючи обробку кадру 1024x1024 протягом 3-4 секунд проти 0,7-1 секунди для брутфорс-алгоритму, хоча на дані результати може додатково впливати щільність сканування та ряд інших параметрів, урахування яких не входило у задачу роботи.

Висновки

Автоматизована система контролю технічного стану магістральних газопроводів, запропонована у статті, базується на інтеграції тензометричних і ультразвукових методів у єдину функціональну схему з високою достовірністю та оперативністю визначення напружено-деформованого стану (НДС) металу. Результати експериментів підтвердили високу точність вимірювання ультразвуковим методом, який найближче відповідав теоретичним розрахункам у широкому діапазоні навантажень. Наукова новизна полягає в застосуванні математичної моделі акустопружності у поєднанні з реальними даними, отриманими в реальних умовах роботи трубопроводу, що дозволяє визначати як абсолютні значення механічних напружень, так і їх зміну в реальному часі. Доведено ефективність використання луно-імпульсного ультразвукового методу в умовах складного гірського рельєфу з урахуванням ортотропності сталі марки Х60, яка використовується для будівництва трубопроводів.

Теоретичне значення роботи полягає у поглибленні моделей деформування трубної сталі під дією комплексного навантаження з урахуванням пружних і акустичних параметрів. Практичне значення підтверджено створенням структурної схеми системи моніторингу, адаптованої до існуючих телемеханізованих пунктів катодного захисту, що дозволяє легко інтегрувати нові методи в інфраструктуру газотранспортної системи. Отримані результати відкривають перспективи для розробки інтелектуальних адаптивних систем, здатних до самонавчання на основі зібраних даних, що

забезпечить ще вищий рівень надійності. У роботі продемонстровано відповідність результатів раніше сформульованим гіпотезам, а також узгодження з тенденціями розвитку світових систем контролю трубопровідної інфраструктури.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Geng K., et al. Development and applications of on-site soil leachate collection system for environmental monitoring and agricultural management. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. Vol. 233. doi: [10.1016/j.compag.2025.110148](https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110148)
2. Sun M., Zhu J. X., Hao S. Analyzing the Innovation Progress in Global Oil and Gas Pipeline Transportation. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2025. Vol. 16. No. 2. doi: [10.1061/JPSEA2.PSENG-1792](https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1792)
3. Stoicescu A.-A., et al. Current Methods and Technologies for Storage Tank Condition Assessment: A Comprehensive Review. *Materials*. 2025. Vol. 18. No. 5. doi: [10.3390/ma18051074](https://doi.org/10.3390/ma18051074)
4. Wu Q., Han Y., Wu J. Research on Intelligent Monitoring and Maintenance Technology of Municipal Pipelines Based on Artificial Intelligence. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*. 2025. doi: [10.1142/S0129156425404012](https://doi.org/10.1142/S0129156425404012)
5. Poor A., Lange A., Widomski P. A study of welding technology for butt joints of L415 ME steel pipes designed for hydrogen transmission using high-performance automated welding engineering. *Advances in Science and Technology - Research Journal*. 2025. Vol. 19. No. 5. P. 84–95. doi: [10.12913/22998624/200723](https://doi.org/10.12913/22998624/200723)
6. Khomiak E., et al. Method of Quality Control of Nuclear Reactor Element Tightness to Improve Environmental Safety. *Energies*. 2025. Vol. 18. No. 9. doi: [10.3390/en18092172](https://doi.org/10.3390/en18092172)
7. Chen L., Mou L., Geng G. Internal inspection of high-risk long-distance subsea pipelines using acoustic resonance technology. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2025. P. 1–36. doi: [10.1080/10589759.2025.2489591](https://doi.org/10.1080/10589759.2025.2489591)
8. Mardanshahi A., et al. Sensing Techniques for Structural Health Monitoring: A State-of-the-Art Review on Performance Criteria and New-Generation Technologies. *Sensors*. 2025. Vol. 25. No. 5. doi: [10.3390/s25051424](https://doi.org/10.3390/s25051424)
9. Shi X., et al. Flowrate Measurement of Oil-Gas-Water Three-Phase Slug Flow Using Pulse Wave Ultrasonic Doppler Technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2025. Vol. 74. doi: [10.1109/TIM.2025.3561390](https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3561390)
10. Lee J.-H., et al. Vision-Ultrasound Robotic System based on Deep Learning for Gas and Arc Hazard Detection in Manufacturing. arXiv preprint arXiv:2502.05500. 2025. doi: [10.48550/arXiv.2502.05500](https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.05500)
11. ISO 13623:2017. Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems. Geneva: International Organization for Standardization. 2017. 118 p. URL: <https://www.iso.org/standard/61251.html>
12. Semegen M. M. Improvement of ultrasonic control of the stress-strain state of repair sections of main pipelines: dissertation ... candidate of technical sciences: special. 05.11.13 "Devices and methods of control and determination of the composition of substances": Date of defense 18.06.10. Ivano-Frankivsk. 2010. 180 p. P.156-164. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0410U005335> [in Ukrainian]

AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF GAS MAIN PIPES

Liutak I. Z.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska Street, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8960-5871>
e-mail: ihor.liutak@nuing.edu.ua

Liutak Z. P.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, 15 Karpatska Street, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-8323-6980>
e-mail: ihorlt@gmail.com

Abstract. The study proposes a concept for an automated system to monitor the technical condition of main gas pipelines operating in challenging mountainous terrain. The system relies on the integrated use of strain gauge and ultrasonic methods to diagnose the stress-strain state (SSS) of pipeline metal. A mathematical model of acoustoelasticity was employed to calculate stress magnitudes based on changes in the propagation speed of ultrasonic waves in the material. The model employs the generalized Hooke's law to describe the relationship between stresses and strains, enabling the determination of stress tensor components through the velocities of longitudinal and transverse ultrasonic waves. To verify the model, laboratory tests were conducted on samples of X60 steel using a tensile testing machine with incremental loading, measuring deformations with strain gauges and ultrasonic transducers. Experiments using the R-50 tensile testing machine confirmed the high accuracy of the ultrasonic method compared to the strain gauge method, particularly at the initial stages of deformation. The research results demonstrated a strong correlation between calculated and experimental data, especially for the ultrasonic method, validating its suitability for use in the operational conditions of main gas pipelines. A structural diagram of the automated system, adapted to cathodic protection stations, is presented. The practical implementation includes the development of a system with strain gauges and the SIGMA ultrasonic device, which operates on the principle of frequency auto circulation, enhancing measurement accuracy. The system is integrated with cathodic protection stations, enabling real-time data transmission to a control centre. The proposed approach facilitates continuous SSS monitoring in real time and enables prompt decision-making regarding the technical condition of pipeline transport assets. The obtained results provide a foundation for the further development of intelligent monitoring systems with adaptive logic, accounting for environmental conditions and loading parameters.

Key words: stress-strain state, ultrasonic inspection, strain gauges, X60 steel, mathematical model, main gas pipelines.