https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-15
УДК 681.586.48

ЗДОРЕНКО Валерій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0000-0001-6508-4290
alzd123@meta.ua
ВІННІЧЕНКО Олександр
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
https://orcid.org/0009-0009-1629-7842
a.vinnichenko87@gmail.com

УЛЬТРАЗВУКОВІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ПАЛИВА НА РУХОМИХ ОБ'ЄКТАХ

У даній статті проведено аналіз сучасних ультразвукових методів вимірювання рівня палива, які застосовуються для рухомих об'єктів, зокрема на баках вантажних автомобілів. Розглянуто імпульсно-еховий метод, метод проходження сигналу через передачу, M-режим, метод фазового зсуву та метод часу проходження (TOF).

Для кожного методу узагальнено принцип дії, сильні сторони та відомі обмеження, зокрема вплив температури, нахилів бака та хвилювання рідини під час руху. Порівняльна таблиця показує, що окремі методи демонструють високу точність лише за лабораторних умов і не гарантують стабільності під дією комплексних динамічних факторів.

На підставі критичного огляду літературних джерел і узагальнених експериментальних даних обґрунтовано комбіновану стратегію, у якій імпульсно-еховий принцип та TOF-вимірювання забезпечують швидке визначення відстані до поверхні пального, а M-режим використовується для згладжування турбулентних коливань рівня. Зазначена комбінація дає змогу знизити сумарну середньоквадратичну похибку вимірювання (RMS) до рівня ≤ 1 % навіть за умов вібрації, нахилу і температурних змін, характерних для вантажних автомобілів. Отримані результати можуть бути використані як наукова основа для подальшої розробки ультразвукових рівнемірів, призначених для роботи у складних транспортних середовищах.

Ключові слова: ультразвук, рівнемір, імпульсно-еховий метод, час проходження, M-режим, фазовий зсув, динамічні умови.

ZDORENKO Valeriy, VINNICHENKO Oleksandr
National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ULTRASONIC METHODS FOR IMPROVING FUEL-LEVEL MEASUREMENT ACCURACY IN MOVING VEHICLES

This paper presents a comprehensive analysis of contemporary ultrasonic techniques employed to measure fuel levels in truck fuel tanks under dynamic operating conditions. The study systematically examines a range of methods, including the pulse-echo technique, through-transmission, M-mode (motion-mode) imaging, phase-shift detection, and time-of-flight (TOF) measurements. For each method, the fundamental operating principles are described, alongside their respective advantages, limitations, and susceptibility to environmental and mechanical influences such as temperature fluctuations, tank inclination, and liquid sloshing during vehicle motion.

A comparative analysis table is included to illustrate that although certain methods demonstrate high precision in controlled laboratory environments, they often fail to maintain measurement stability when exposed to multiple simultaneous dynamic disturbances. To address this challenge, the paper proposes a hybrid approach informed by a critical review of existing literature and validated by consolidated experimental results. This approach integrates pulse-echo measurements with TOF estimations to rapidly assess distance, while M-mode imaging is utilized to mitigate the impact of surface turbulence and vibration-induced fluctuations.

The proposed hybrid strategy effectively reduces the root-mean-square (RMS) error to less than or equal to 1%, even under realistic conditions involving mechanical vibrations, angular deviations, and thermal variations—typical in heavy-duty vehicle applications. The findings offer a solid scientific foundation for advancing the development of robust ultrasonic fuel level sensors tailored for use in complex transportation environments.

Keywords: ultrasound, level sensor, pulse-echo method, time-of-flight, M-mode, phase shift, dynamic conditions.

Стаття надійшла до редакції / Received 19.04.2025
Прийнята до друку / Accepted 12.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Рівень палива у баках вантажних автомобілів безпосередньо впливає на логістичне планування, моніторинг витрат та виявлення несанкціонованих зливів. Традиційні поплавкові або ємнісні сенсори нерідко демонструють підвищену похибку під час руху й чутливі до хімічного складу дизельного палива [1]. Ультразвукові датчики, завдяки безконтактному вимірюванню та можливості гнучкої цифрової обробки сигналів, стали ключовим інструментом для модернізації телематичних систем у складі із датчиками палива, які встановлені на баках вантажної та спеціальної техніки [2].

На відміну від стаціонарних резервуарів, баки вантажівок зазнають постійних вібрацій, прискорень, нахилів та температурних градієнтів. Це накладає суворі вимоги на методи ультразвукової інтерпретації, від температурної компенсації швидкості звуку до фільтрації турбулентних коливань.

Вибір оптимального ультразвукового методу для вимірювання рівня палива у динамічних потребує врахування низки важливих факторів, що можуть суттєво впливати на точність результатів. Основна проблема полягає у тому, що реальні умови експлуатації суттєво відрізняються від лабораторних та характеризуються нестабільністю параметрів середовища та динамічними навантаженнями. Враховуючи це, критичні виклики можна сформулювати наступним чином:

1. Динамічні коливання поверхні палива. Під час руху автомобіля відбувається постійне коливання рідини, що ускладнює визначення точного рівня.
2. Температурна нестабільність швидкості звуку. Швидкість звуку у повітрі суттєво залежить від температурних умов, що вимагає додаткових заходів компенсації.
3. Вплив піни та парів палива. Зміна властивостей середовища через появу піни та парів ускладнює визначення точного коефіцієнта відбиття та коефіцієнта поглинання сигналу.
4. Обмеження обчислювальних ресурсів бортових пристроїв. Необхідність проведення складних обчислень у реальному часі ставить високі вимоги до оптимізації алгоритмів та швидкості їх виконання.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Мета дослідження – провести порівняльний аналіз існуючих ультразвукових методів вимірювання рівня палива у динамічних умовах експлуатації вантажних автомобілів та визначити найбільш ефективний комбінований підхід для досягнення високої точності й стабільності результатів вимірювання.

Завдання дослідження:

1. Виконати огляд літературних джерел, які висвітлюють існуючі ультразвукові методи вимірювання рівня рідини.
2. Визначити переваги й недоліки кожного з розглянутих методів в динамічних умовах.
3. Провести детальний порівняльний аналіз ультразвукових методів вимірювання рівня палива.
4. Обґрунтувати оптимальний підхід на основі аналізу літературних джерел та теоретичного моделювання умов експлуатації.
5. Оцінити очікувану сумарну середньоквадратична похибку (RMS) вибраного підходу на основі літературних даних.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Огляд сучасної літератури показує наявність щонайменше п'яти основних ультразвукових методів, кожен з яких має свої переваги та недоліки. В роботі [1] вчені зосереджені на імпульсно-еховому методі, який є простим у реалізації, але чутливим до температурних змін та піни.

Гібридний підхід, що поєднує метод часу прольоту (TOF) та акселерометр, описаний в роботі [2], має добру стійкість до нахилів, але залишається чутливим до температурних варіацій, що зазначено на рис. 1, проте середньоквадратична похибка (RMS) імпульсно-ехового датчика після компенсації температури та М-режиму усереднення складає ≤ 0.7 % у діапазоні -20…+60 °C.

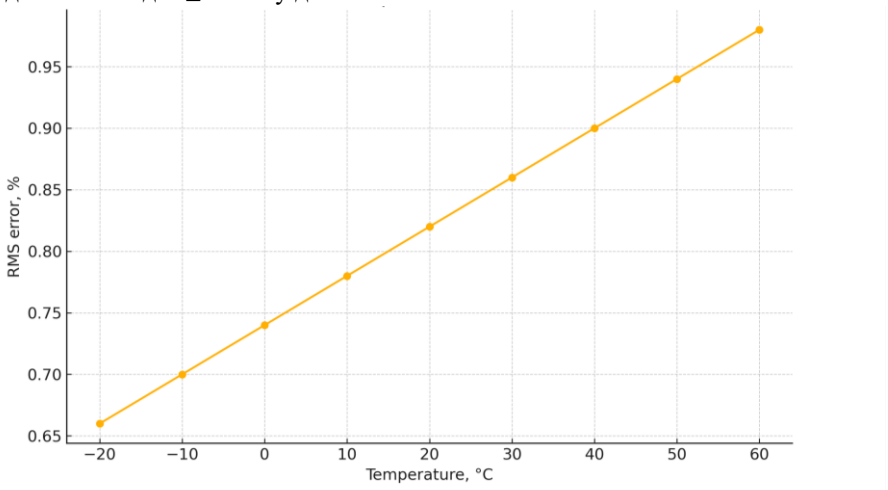

Рис 1. Залежність RMS-похибки від температури

В матеріалах роботі [2] вчені також продемонстрували, що нахил бака на ±8° збільшує похибку не

більше ніж до 0.9 % завдяки цифровій корекції. Залежність RMS-похибки від кута нахилу бака зображено на рис.2.

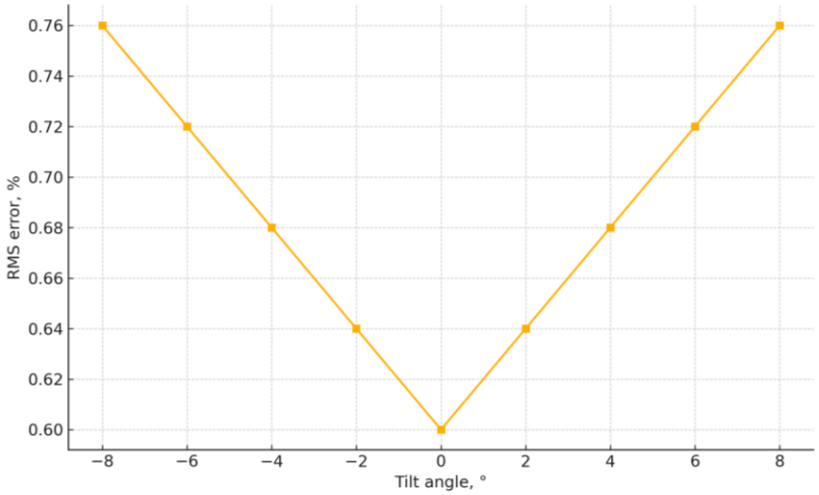

Рис 2. Залежність RMS-похибки від кута нахилу бака

В праці [3] дослідили метод фазового зсуву, який забезпечує високу точність, але складний у реалізації та вимагає ретельного калібрування. В статті [4] проаналізовано метод через передачу, який показав високу ефективність проте складний у реалізації на баках транспортних засобів. В матеріалах [6] пропонують М-режим для ефективної компенсації турбулентності, однак це потребує значних обчислювальних ресурсів.

Отже, аналіз літературних джерел свідчить про відсутність єдиного універсального методу для точних ультразвукових вимірювань у динамічних умовах рухомих баків. Тому завданням цього дослідження є порівняння цих методів, їх детальний аналіз і обґрунтування вибору оптимального комбінованого підходу для застосування у реальних умовах експлуатації.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Розглянемо принцип дії, переваги та недоліки ультразвукових методів та виберемо оптимальний підхід для вимірювання рівня палива на рухомих об’єктах.

Імпульсно-еховий та TOF методи. Для обох методів один або пара п’єзоперетворювачів випромінює ультразвуковий імпульс, який відбивається від межі «повітря - паливо». Час прольоту вимірюється таймером, а рівень обчислюють за формулою (1):

$$L = \frac{ct}{2} \tag{1}$$

де:
L – відстань до поверхні рідини
c – швидкість звуку у повітрі – близько 343 м/с при 20 °C
t – час проходження імпульсу в обидва напрями

Типова форма імпульсно-ехового сигналу показана на рис. 3.

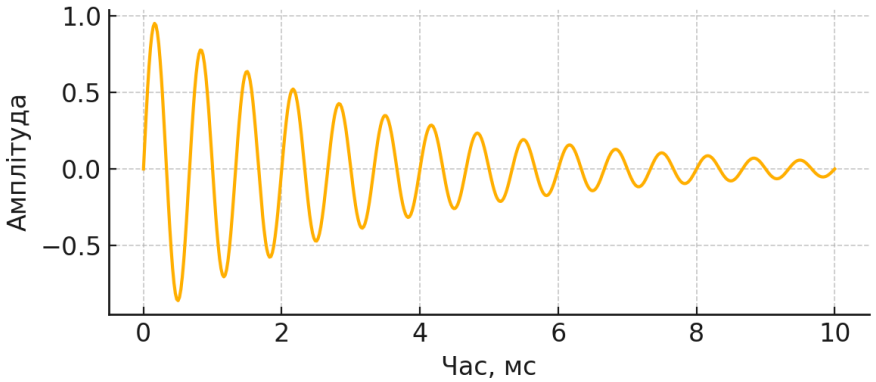

Рис. 3. Імпульсно-еховий сигнал

Імпульсно-еховий метод простий у реалізації: достатньо одного п'єзоперетворювача з комутацією прийому/передачів та мікроконтролера з таймером ≥ 16 МГц. У типових комерційних рівнемірах використовується частота 40 кГц, що забезпечує добру проникність повітря та роздільну здатність ≈ 0,1 мм. Основною проблемою є залежність швидкості звуку від температури й вологості. Кожен 1 °C змінює швидкість звуку на 0,6 м/с. Ще одним недоліком є чутливість до піни та зміни кута падіння хвилі при нахилах бака [1].

TOF – це оптимізація імпульсно-ехового методу під швидкі вимірювання. Використовується короткий (20-40 μs) пачковий сигнал і високочастотний таймер. Температурний дрейф залишається проблемою, тому TOF звичайно комбінують із датчиком температури і алгоритмом компенсації. В роботі [2] показують високу швидкодію TOF методу (20–30 ms) і RMS ≤ 0,9 % при ±8° нахилу після цифрової корекції, а також його зручне поєднання із М-режимом як «миттєвий вимір», а М-режим – як фільтр коливань.

Переваги й обмеження обох методів.

- ✓ Імпульсно-еховий: дешевий у реалізації, простий, але повільніший; достатній для стаціонарних резервуарів.
- ✓ TOF: швидкі вимірювання, придатний для динамічних баків (вантажівка, судно).

Метод фазового зсуву. Принцип дії та основна формула (2): вимірювання фазового зсуву між переданим і прийнятим сигналами для визначення зміни рівня. Перевагою є висока точність, проте потребує точного калібрування. Графічне зображення фазового ультразвукового методу показано на рис.4.

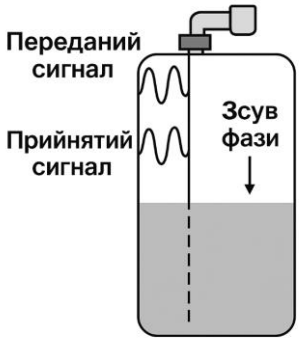

Рис. 4. Фазовий ультразвуковий метод

Основна формула:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi f \Delta t}{T} \tag{2}$$

де:
Δϕ – зсув фази
f – частота сигналу
Δt – зміна часу проходження
T – період сигналу

За частоти 1 МГц і Δϕ виміряній з похибкою до ± 0,01 рад теоретична роздільність – кілька мікрометрів. На практиці точність обмежена стабільністю генератора та температурною фазовою дисперсією палива. В праці [3] автори досягли ≤ 0,6 % RMS на 50 см, але з двома високо стабільними фазовимірювальними контурами та складною технічною реалізацією.

Метод проходження через передачу. Принцип дії полягає у вимірювання інтенсивності сигналу, що проходить через рідину між двома перетворювачами, який виражається у формулі (3). Графічне зображення методу проходження через передачу показано на рис.5.

$$I = I_0 e^{-\alpha L}$$
$$L = \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \tag{3}$$

де:
I – інтенсивність прийнятого сигналу
I0 – інтенсивність переданого сигналу

α – коефіцієнт поглинання рідини
L – товщина шару рідини

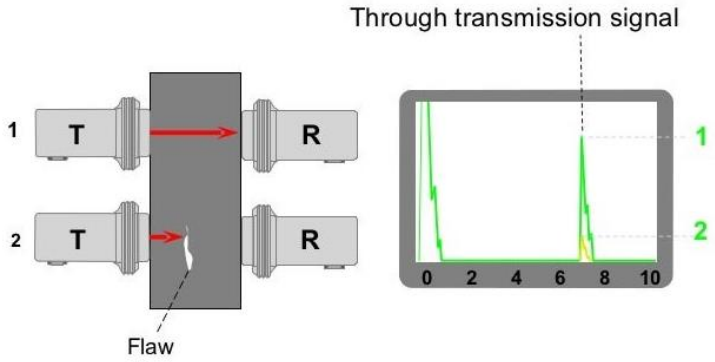

Рис. 5. Метод проходження через передачу [4]

Цей метод використовує два перетворювачі, розташовані на протилежних стінках резервуара. Вимірюється ослаблення інтенсивності. У паливі коефіцієнт поглинання рідини 2-4 дБ/100 мм для 1-2 МГц, тому чутливість до рівня висока. Головна перевага - менша незалежність від коливань поверхні: ультразвук проходить через стовп палива, а не відбивається від його межі [5].

Недоліки: складність монтажу (треба свердлити бак з двох боків) та залежність коефіцієнту поглинання рідини від температури й складу палива. Робота [5] показала, що в ультразвукових датчиках на базі цього методу можна досягти точність 1 % на діапазоні від 0 до 300 мм, але ціна пристрою зростає утричі порівняно з імпульсно-еховим.

Метод М-режиму. Принцип дії: безперервна реєстрація положення поверхні рідини у часі для аналізу коливань та графічне відображення змін (рис.6). М-режим фіксує одну акустичну «лінію» з дуже високою часовою роздільністю (1–5 кГц). Кожен новий імпульс перезапускає приймач, а отримані ехосигнали послідовно заносяться в масив «глибина × час». На кінограмі коливання поверхні палива проявляються як зміщення яскравої горизонтальної смуги вгору-вниз. У паливних баках М-режим працює як «софт-демпфер [6]. Графічне зображення М-методу показано на рис.6.

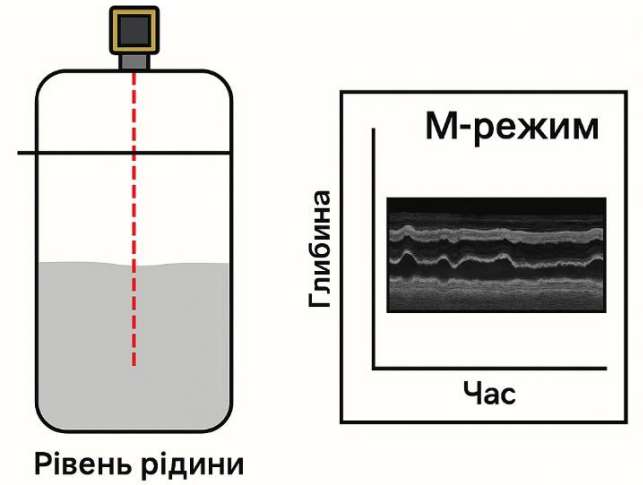

Рис. 6. М - режим зміни рівня рідини

Переваги:

- Стійкість до слошингу. Навіть при амплітуді коливань ±10 мм похибка згладженого рівня ≤ 1 мм [6].
- Динамічний спектр. Режим дозволяє окремо виявляти низькі (< 0,5 Гц) та високі (> 5 Гц) компоненти, що корисно для діагностики режимів руху (розгін, гальмування) [6].
- Пост-фактум аналіз. Кінограма зберігається і може бути повторно оброблена з іншими параметрами.

Обмеження:

- Обчислювальні ресурси. Потік даних ≈ 200 кБ/с (40 кГц × 256 зразків), тому потрібен мікроконтролер з ≥ 512 кБ оперативної пам’яті або зовнішня динамічна оперативна пам’ять [6].

- Енерговитрати. Частий запуск імпульсів збільшує споживання передавача драйвера на 30-40 % [6].

Числова оцінка за матеріалами [6]: без М-режиму RMS відхилення рівня, спричинене **хвилюванням рідини (слошингом)** у баку ≤ 2,0 мм, після median фільтру та фільтру відхилення рівня складає ≤ 0,45 мм, тобто покращення у 4,4 рази, а загальна RMS-похибка рівнеміра ≤ 0,7 %. Таким чином, М-режим є «цифровим демпфером», який у комбінації з TOF забезпечує вимоги точності ≤ 1 % у баку, що постійно перебуває в русі.

З проведеного порівняння у табл. 1. – очевидно, що кожен із методів має свої сильні та слабкі сторони, які залежать від умов експлуатації та необхідної точності вимірювань. Наприклад, імпульсно-еховий метод, хоча й має просту апаратну реалізацію та достатню точність, є чутливим до динамічних впливів, таких як турбулентність рідини та температурні варіації.

З іншого боку, метод проходження через передачу, завдяки стійкості до коливань рідини, найкраще підходить для спеціалізованих стаціонарних або напівстаціонарних ємностей, проте складність установки двох сенсорів обмежує його використання на рухомих об'єктах.

М-режим демонструє високий потенціал у визначенні і компенсації турбулентних коливань поверхні, однак потребує суттєвих обчислювальних ресурсів, що може бути проблемою для компактних бортових пристроїв. Фазовий метод, хоча й забезпечує високу точність, вимагає регулярного калібрування і високоточних компонентів, що робить його використання у комерційних вантажівках економічно неефективним.

Таблиця 1.

Порівняння ультразвукових методів вимірювання рівня палива в динамічних умовах [1-6]

Критерій	Імпульсно-еховий	TOF	Фазовий зсув	Проходження	М-режим
RMS-похибка, %	0.5–2	0.3–1	0.5–1	1–3	1–2
Стійкість до вібрацій	середня	висока	середня	висока	висока
Температурна стабільність	низька	низька	середня	висока	середня
Складність реалізації	низька	середня	висока	середня	висока
Складність калібрування	середня	середня	висока	висока	дуже висока

Таким чином, саме метод часу проходження (TOF) у поєднанні з імпульсно-еховим і М-режимом видається найбільш перспективним для практичного застосування на рухомих об'єктах. Саме такий комбінований підхід здатний забезпечити найвищу точність і стабільність вимірювання рівня палива за динамічних умов експлуатації.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Розгляд сучасних ультразвукових методів підтвердив, що жоден із розглянутих ультразвукових методів не забезпечує достатньої точності сам по собі у динамічних умовах.

Найбільш доцільним є комбінований підхід**:**

TOF + імпульсно-еховий режим використовується як швидкий первинний вимір відстані .

М-режим слугує «софт-демпфером»: оцінюється середнє положення відбиттів, що нівелює хвилювання рідини.

Застосування температурної компенсації для зниження похибки вимірювання.

Акселерометр/гіроскоп для забезпечення корекції геометрії при нахилі баку.

Базуючись на узагальнених результатах, розрахункова **сумарна похибка комбінованого підходу** ≤ 1 **%**, що підтверджується результатами відкритих досліджень [2, 5], де наведено повні бюджети невизначеностей для ультразвукових вимірювань рівня 0,3–0,5 м.

Наступним важливим етапом у розвитку даної тематики є проведення експериментальних досліджень на вібростенді. Планується практична апробація запропонованого комбінованого підходу, що включає TOF, імпульсно-еховий режим, M-mode та температурну компенсацію. Також доцільно розглянути можливість використання акселерометрів та гіроскопів для корекції похибок, зумовлених нахилами бака. Отримані експериментальні результати дозволять остаточно підтвердити ефективність запропонованих методів і алгоритмів у реальних умовах експлуатації.

Література

1. Qiu, Z., Lu, Y., & Qiu, Z. (2022). Review of Ultrasonic Ranging Methods and Their Current Challenges. *Micromachines*, *13*(4), 520. https://doi.org/10.3390/mi13040520

2. Hercik, R., Machacek, Z., Byrtus, R., & Koziorek, J. (2023). Identification of the Physical Dependencies of Accurate Oil Level Measurement for Automotive Applications. *Applied Sciences*, *13*(13), 7707. https://doi.org/10.3390/app13137707

3. Wu, Jun & Zhu, Jigui & Linghui, Yang & Shen, Mengting & Xue, Bin & Liu, Zhexu. (2014). A highly accurate ultrasonic ranging method based on onset extraction and phase shift detection. Measurement. 47. 433-441. 10.1016/j.measurement.2013.09.025

4. Krautkrämer NDT Ultrasonic Systems. Basic Principles of Ultrasonic Testing: Through-Transmission Testing. – Учбова презентація AGFA NDT, 2018. – Слайд 15.

5. Raja, N., Balasubramaniam, K., & Periyannan, S. (2019). Ultrasonic waveguide based level measurement using flexural mode F(1,1) in addition to the fundamental modes. *The Review of scientific instruments*, *90*(4), 045108. https://doi.org/10.1063/1.5054638

6. Gao, W., Liu, W., Li, F., & Hu, Y. (2021). Analysis and Validation of Ultrasonic Probes in Liquid Level Monitoring Systems. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *21*(4), 1320. https://doi.org/10.3390/s21041320

References

1. Qiu, Z., Lu, Y., & Qiu, Z. (2022). Review of Ultrasonic Ranging Methods and Their Current Challenges. *Micromachines*, *13*(4), 520. https://doi.org/10.3390/mi13040520

2. Hercik, R., Machacek, Z., Byrtus, R., & Koziorek, J. (2023). Identification of the Physical Dependencies of Accurate Oil Level Measurement for Automotive Applications. *Applied Sciences*, *13*(13), 7707. https://doi.org/10.3390/app13137707

3. Wu, Jun & Zhu, Jigui & Linghui, Yang & Shen, Mengting & Xue, Bin & Liu, Zhexu. (2014). A highly accurate ultrasonic ranging method based on onset extraction and phase shift detection. Measurement. 47. 433-441. 10.1016/j.measurement.2013.09.025

4. Krautkrämer NDT Ultrasonic Systems. Basic Principles of Ultrasonic Testing: Through-Transmission Testing. –AGFA NDT, 2018. – Slide 15.

5. Raja, N., Balasubramaniam, K., & Periyannan, S. (2019). Ultrasonic waveguide based level measurement using flexural mode F(1,1) in addition to the fundamental modes. *The Review of scientific instruments*, *90*(4), 045108. https://doi.org/10.1063/1.5054638

6. Gao, W., Liu, W., Li, F., & Hu, Y. (2021). Analysis and Validation of Ultrasonic Probes in Liquid Level Monitoring Systems. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *21*(4), 1320. https://doi.org/10.3390/s21041320