

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

ГЛАДИШЕВСЬКИЙ МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 681.12

**МЕТОДИ УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЗАСІБ ВИМІРЮВАЛЬНОГО  
КОНТРОЛЮ ВИТРАТ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ**

Спеціальність 05.11.13 – «Прилади і методи контролю та  
визначення складу речовин»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті, Міністерство освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор,  
**Білинський Йосип Йосипович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електроніки та наносистем.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Середюк Орест Євгенович**,  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу,  
завідувач кафедри методів та приладів контролю  
якості і сертифікації продукції

доктор технічних наук, доцент  
**Ділай Ігор Володимирович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри автоматизації  
та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Захист відбудеться " 19 " жовтня 2018 р. о 12<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий "17" вересня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

О. М. Васілевський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дисертації .** В умовах ринкової економіки енергетична безпека України повинна бути побудована на ефективному використанні енергетичних ресурсів, скороченні їх споживання та зменшенні втрат, підвищенні точності і вірогідності їх обліку. Це стосується в першу чергу таких вуглеводних енергоносіїв як нафтопродукти та природний газ. Основною проблемою комерційних відносин при поставках енергоносіїв як плинного середовища є небаланс, що виникає при фізичному обліку від постачальника до споживача, тобто в результаті транспортування. Загальними факторами, що визначають виникнення цього небалансу, є похибки у вимірюванні об'єму речовини, відсутність достовірного обліку через невисоку точність і обмежений діапазон лічильників, несправності вузлів обліку.

Проблемам підвищення точності та вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ присвячено наукові праці багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених.

На сьогодні одними з найбільш прогресивних засобів вимірювального контролю витрати рідин і газів є витратоміри з ультразвуковими первинними перетворювачами. Частка ультразвукових витратомірів на світовому ринку серед усіх засобів контролю витрат різних енергоносіїв становить більше 10%.

Ультразвукові витратоміри мають ряд важливих переваг:

- широкий динамічний діапазон вимірювань;
- відсутність втрат тиску завдяки відсутності елементів приладу в вимірювальному каналі;
- відсутність впливу на гідродинаміку потоку;
- відсутність рухомих елементів і як наслідок, підвищена надійність;
- можливість вимірювання витрати нафтопродуктів, агресивних, не електропровідних, непрозорих неоднорідних рідин суспензій, в тому числі багатоконпонентних середовищ;
- низьке енергоспоживання;
- можливість монтажу без зупинки технологічного процесу (для накладних приладів);
- збереження техніко-експлуатаційних характеристик у часі;
- відносна похибка таких засобів, як правило, знаходиться в межах 1%-1,5%.

Ультразвукові витратоміри поділяють, як правило, на три основні групи за методом вимірювання швидкості газового потоку.

Це витратоміри, основані на принципі переміщенні ультразвукових коливань рухомим газовим потоком за та проти (transit time flowmeters):

До них відносяться фазові, часово-імпульсні, частотні та кореляційні.

До другої групи відносяться ультразвукові витратоміри, основані на явищі Доплера (Doppler flowmeters), до третьої – довгохвильові витратоміри, які застосовують хвилі зі звукового діапазону частот.

На сьогодні найбільш перспективними засобами контролю та обліку витрати плинних середовищ є ультразвукові часово-імпульсні витратоміри з діаметральними акустичними каналами.

Разом з тим, аналіз конструктивних особливостей і технічних характеристик відомих ультразвукових витратомірів показує, що проблеми створення досить надійно працюючих перетворювачів витрати вирішені далеко не повністю. Кожен з наведених вище типів витратомірів мають свої недоліки, основними з яких є, зокрема, необхідність забезпечити надійне визначення витрати в "забруднених" газових середовищах, а також в моменти виникнення різкої зміни швидкості потоку в трубопроводі, яка призводить до зміни виду потоку, низька точність реєстрації положення початку імпульсного сигналу, дискретність вимірювань, складність обробки сигналу. Окрім того, часово-імпульсні чи частотні витратоміри застосовують, як правило, для вимірювання витрат у трубопроводах великого діаметра. А в трубопроводах малого діаметра або в хордових каналах мають достатньо велику зону нечутливості. Тому й відсутні ультразвукові витратоміри з діаметром трубопроводу менше 25 мм, оскільки ускладнюється конструкція, а вартість не задовольняє користувача.

В цілому, всі виробники ультразвукових витратомірів використовують однаковий підхід в області вимірювання витрати газу і мають незначні відмінності в моделі побудови таких витратомірів та кінцевому результату обробки отриманих даних. Така одноманітність спонукає до більш глибокого дослідження ультразвукових методів вимірювання задля усунення спільних проблем шляхом впровадження нових методів ультразвукових вимірювань. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що з огляду на безупинний розвиток промисловості та високі вимоги до вимірювального обладнання залишається актуальним завдання розробки сучасних методів і засобів акустичного контролю плинних середовищ, в тому числі, для малого діаметра трубопроводу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2014-20017 р. за планами наукових робіт кафедри електроніки та наносистем ВНТУ та ТОВ НВФ «Робікон». Основні результати дисертаційної роботи отримані у ході виконання автором виконавця госп. договірної теми «Розробка методики проектування ультразвукового витратоміра природного газу» (№ держ. реєстрації 0115U000823), держбюджетної теми "Засоби контролю кількісного вмісту та витрат природного та скрапленого нафтового газів" (№ держ. реєстрації 0116U0004707, виконавець, 2016, 2017 рр.), яка проводилась на кафедрі електроніки та наносистем ВНТУ.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ у трубопроводах із малими поперечним перерізом шляхом використання ультразвукового частотно модульованого сигналу.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

- Проаналізувати існуючі методи та засоби вимірювального контролю

витрат плинних середовищ.

- Обґрунтувати та експериментально дослідити метод вимірювання швидкості плинних середовищ, оснований на частотній модуляції ультразвукового сигналу.

- Удосконалити математичну модель перенесення ультразвукового випромінювання в плинному середовищі.

- Розробити та дослідити математичну модель ультразвукового вимірювального перетворювача плинних середовищ.

- Запропонувати математичну модель та розробити амплітудно-частотний засіб вимірювального контролю витрат плинних середовищ.

- Отримати аналітичні залежності для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик та впливних величин на вимірювальний канал засобу контролю витрат плинних середовищ.

- Виконати експериментальні дослідження засобу та оцінити вірогідність контролю.

**Об'єктом дослідження** є процес взаємодії ультразвукового випромінювання зі плинним середовищем.

**Предметом дослідження** є методи та засоби вимірювального контролю витрат плинних середовищ.

**Методи дослідження.** При виконанні поставлених задач використовувались: основи теорії вимірювального перетворення неелектричних величин для розробки математичної моделі ультразвукового вимірювального перетворювача; методи математичного, фізичного та комп'ютерного моделювання з використанням середовищ MATCAD, Matlab та Maple при дослідженні ультразвукового амплітудно-частотного методу та засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ; основи теорії ймовірності і випадкових процесів для дослідження вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ; методи математичної статистики при обробці результатів вимірювань під час дослідження повторюваності результату; основи теорії вимірювань і похибок для оцінювання метрологічних характеристик запропонованого засобу.

**Наукова новизна отриманих результатів і положень** полягає в подальшому розвитку методу та ультразвуковому засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, який дозволяє в промислових умовах, у реальному часі забезпечити високу вірогідність контролю.

В роботі отримані такі наукові результати.

1. Удосконалено математичну модель перенесення ультразвукової хвилі в плинному середовищі в межах ближньої зони ультразвукових передавача-приймача, яка адекватно описує фізичні процеси та в якій, на відміну від відомих, амплітудно-частотна характеристика однозначно пов'язана зі швидкістю потоку, при цьому враховано вплив густини  $\rho$  середовища, його температура  $T$ , а також показник адіабати  $\chi$  та коефіцієнт стисливості газу  $K$ .

2. Отримав подальшого розвитку ультразвуковий метод вимірювального контролю витрат плинних середовищ у трубопроводах із малими поперечним перерізом на основі частотної модуляції, який на відміну від відомого базується

на явищі інтерференції ультразвукових хвиль в ближній зоні передавача-приймача, а результатом вимірювального контролю є значення резонансної частоти, а отже швидкості потоку та об'ємної витрати, при цьому встановлено, що похибка вимірювання не перевищує 1%.

3. Вперше запропоновано математичну модель ультразвукового амплітудно-частотного засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, яка враховує геометричні розміри трубопроводу й ультразвукових перетворювачів та швидкості поширення ультразвукової хвилі, отримано функцію перетворення, що однозначно пов'язує вихідну величину – значення резонансної частоти ультразвукового сигналу та вхідну – значення витрат плинного середовища, експериментально доведено, що засоби, які реалізують цей метод, характеризуються високою вірогідністю контролю (0,95–0,96).

**Практичне значення отриманих результатів.** Отримані наукові результати впроваджені у вигляді експериментального зразка ультразвукового витратоміра в ТОВ «НВФ «Робікон»». м. Київ (акт впровадження від 12.07.2017 р.), ПрАТ «Енергооблік» м. Харків (акт. впровадження від 08.11. 2017 р.) та у навчальний процес кафедри електроніки та наносистем Вінницького національного технічного університету.

1. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено та впроваджено експериментальний зразок ультразвукового витратоміра, який відрізняється тим, що для підвищення вірогідності вимірювального контролю використано частотно модульований сигнал. В результаті метрологічних досліджень експериментального витратоміра встановлено, що засіб дозволяє вимірювати швидкість газового плинного середовища в діапазоні 0,25 – 25м/с, що забезпечує високу вірогідність контролю, максимальна зведена похибка засобу контролю витрати не перевищує 1 %.

2. Розроблено програмне забезпечення ультразвукового витратоміра та методику підвищення точності вимірювального контролю, яке дає змогу визначити резонансну частоту, а отже швидкість потоку при низьких апаратних затратах.

3. Експериментально досліджено закони розподілу контрольованих величин і похибки вимірювання. Доведено, що ці закони є нормальними. Встановлено, що засіб контролю, який реалізує ультразвуковий амплітудно-частотний метод, забезпечує вірогідність контролю витрати природного газу в межах 0,95–0,96. Такий результат є вищим в порівнянні з засобами, що реалізують часо-імпульсний або частотний метод.

4. Розроблено методику проектування ультразвукового амплітудно-частотного витратоміра, який складається з трьох основних частин: первинного вимірювального перетворювача, блока обробки сигналів і алгоритму автоматичного вимірювання. За цією методикою розроблено електричну принципову схему аналогового блока сумісного з первинним вимірювальним перетворювачем та виготовлено експериментальний зразок засобу.

Результати лабораторних і метрологічних досліджень дозволяють вважати розроблений засіб контролю витрат плинних середовищ типовим засобом вимірювання, а результати промислових досліджень дозволили його практичне використання в складі системи неперервного контролю витрат природного газу. Впровадження підтверджуються відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу [1], проаналізовано методи і засоби контролю витрат рідких і газоподібних середовищ і запропоновано класифікацію на їх основі [2], проаналізовано метрологічні характеристики засобів вимірювання об'єму та витрати плинних середовищ [5, 13], проаналізовано ультразвукові засоби вимірювального контролю витрати плинних середовищ [6], розроблено новий ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ [7, 10], запропоновано новий ультразвуковий метод вимірювання витрат плинних середовищ [8, 23], розроблено методику проектування амплітудно-частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку [9], проведено аналіз системи вимірювання витрат газу та розглянуто шляхи забезпечення єдності вимірювань [11, 12], аналіз методики обліку природного газу на базі ультразвукового лічильника [14], розроблено математичну модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ [15], визначення впливу фізико-хімічних показників газу на ефективність роботи газових приладів [16], проведено експериментальне дослідження підсилювача для ультразвукового витратоміра [17], проведено моделювання роботи підсилювача для ультразвукового витратоміра [18], розроблено алгоритм мікропроцесорної обробки вимірювання швидкості потоку [19], представлено модель поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі [20], проведено моделювання ультразвукового амплітудно-частотного вимірювача швидкості плинних середовищ [21], проведено моделювання ультразвукового засобу вимірювального контролю витрати плинних середовищ [22], проведено дослідження частотної характеристики ультразвукового сигналу в системі приймач-передавач в межах ближньої зони [26] та проведено дослідження явища інтерференції ультразвукового сигналу в межах ближньої зони [27].

**Апробація матеріалів дисертації.** Результати досліджень, що розглядаються у даній роботі, пройшли апробацію на таких науково-технічних конференціях: IX-XXI міжнародні науково-практичні конференції «Політ. Сучасні проблеми науки» (м. Київ, 2009-2011 рр.); 7-ма міжнародна науково-технічна конференція і виставка «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 25 - 28 листопада 2014 р); Всеукраїнська семінар-нарада «Облік природного газу та метрологія» (сmt. Козин, 23-27 травня 2016); XV міжнародна науково-технічна конференція «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (м. Одеса (Затока), 10-14 вересня 2015); I всеукраїнська науково-технічна конференція «Комп'ютерні тех-

нології: інновації, проблеми, рішення 2015» (м. Житомир, 17-18 квітня 2015); X міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2011». (м. Київ, 19-21 квітня 2011); III міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах». (м. Вінниця, 27-29 жовтня 2015); XIII Міжнародна конференція «Контроль та управління в складних системах (КУСС-2016)» (м. Вінниця, 3-6 жовтня 2016); X Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка» (м. Харків 5-7 жовтня 2016); міжнародна науково-практична конференція «Потенціал сучасної науки» (м. Київ, 8-11 листопада 2016).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 27 праць, в тому числі 9 статей надруковано у фахових виданнях, затверджених МОН України, 14 публікацій у збірках матеріалів та тез доповідей та 4 патентах України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел і 12 додатків. Загальний обсяг наукової роботи 205 сторінок, з яких основний зміст викладено на 164 сторінках друкованого тексту. Наукова робота містить 5 таблиць та 65 рисунків. Список використаних джерел складається з 142 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, її наукова та практична значущість, сформульовані цілі та задачі роботи, наведено її загальну характеристику.

У першому розділі проведено огляд методів вимірювання витрат плинних середовищ та запропоновано їх класифікацію. Встановлено, що завдяки своєму широкому динамічному діапазону, надійній роботі, високій точності і зручній діагностиці найперспективнішим методом є ультразвуковий. Проаналізовано найбільш широко використовувані ультразвукові витратоміри на об'єктах ПАТ «Укртрансгаз». Проведено оцінку метрологічних характеристик ультразвукових витратомірів, широко використовуваних на території України, а також детально проаналізовано класифікації по методам вимірювання витрати, кількості вимірювальних каналів, направлення випромінювання та виду акустичних каналів. Описані як переваги, так і недоліки таких витратомірів. На основі використання вдосконаленого критерію оцінки ефективності роботи вимірювальних перетворювачів встановлено, що найвищий показник ефективності має вимірювальний перетворювач амплітудно-частотного типу для трубопроводів малого діаметра. Обрано напрямки подальших досліджень.

У другому розділі удосконалено математичну модель поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі в межах ближньої зони, запропоновано математичну модель вимірювального перетворювача швидкості плинного середовища, а також модель двоканального вимірювального перетворювача. Проведено дослідження особливостей розповсюдження акустичних хвиль в плинному середовищі. Встановлено, що АЧХ ультразвукового приймача-передавача



пов'язана як з геометричними параметрами даного пристрою, так і з параметрами середовища.

Рух середовища впливає на характер поширення звукових хвиль, їх випромінювання і прийом. У рухомому середовищі швидкість поширення хвильового фронту залежить від швидкості звуку в нерухомому середовищі, а також від проекції швидкості руху середовища на нормаль до фронту (рис.1). У найпростішому випадку руху середовища як цілого, хвильові фронти точкового

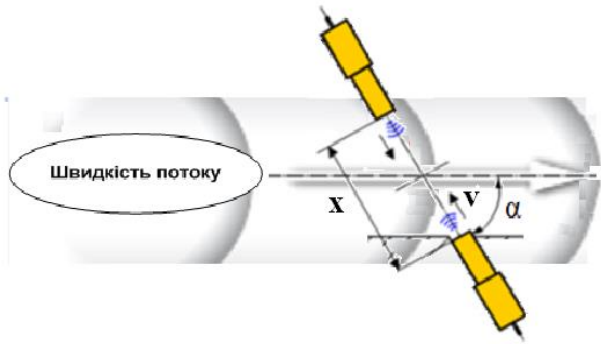


Рисунок 1 – Поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі

джерела являють собою сфери, що розширюються зі швидкістю звуку, центри яких переміщуються зі швидкістю середовища.

Встановлено, що в межах ближньої зони передавача й приймача має місце явище інтерференції прямої та відбитої ультразвукової хвилі. На формування так званої резонансної частоти ультразвукової хвилі впливають як геометричні параметри ультразвукових

перетворювачів, так і стан середовища, в якому поширюється хвиля. Якщо швидкість потоку рідини набагато менша, ніж швидкість звуку в середовищі, розповсюдження акустичних хвиль описується як зміна тиску  $P$  відносно статичного тиску (тиску без поширення акустичних хвиль,  $P_s$ ). Зміна тиску в результаті поширення хвилі у точці визначається як акустична.

У випадку поширення ультразвукової хвилі у плинному середовищі довжина хвилі  $\lambda$  залежно від густини  $\rho_c$  середовища буде змінюватися. Але оскільки плинне середовище має швидкість  $v_c$ , то швидкість поширення звуку ультразвукової хвилі буде визначатися як  $v = v_c \cos \alpha + v_y$ , де кут  $\alpha$  – це кут між швидкістю поширення ультразвукової хвилі та напрямком руху плинного середовища. Тоді тиск на приймачі, який знаходиться в плинному середовищі, що рухається зі швидкістю з урахуванням ступеня зміни  $\sigma$  частотної характеристики та згасання  $R$  буде визначатися як

$$P = \frac{K}{S_a} P_0 e^{\frac{-(f-f_0)^2 - \left(\frac{v}{x}\right)^2 R}{2\sigma^2}} \left[ 2 \sin \left[ \frac{2\pi f x}{v_c \cos \alpha + 16,59 \left( T \chi \frac{K}{\rho_c} \right)^{0,5} x} \right] \right]^2, \quad (1)$$

де  $f_0$  – основна (резонансна) частота,

Формула (1) представляє собою математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі, яка дає відповідь як веде себе сигнал в ближній зоні внаслідок зміни частоти та швидкості потоку. При цьому на величину вихідного сигналу суттєво впливає густина  $\rho_c$  плинного середовища та його температура  $T$ . Крім цього конкретно для природного газу має місце вплив показника адіабати  $\chi$  та коефіцієнт стисливості газу  $K$ . На рис. 2 показано результати моделювання.

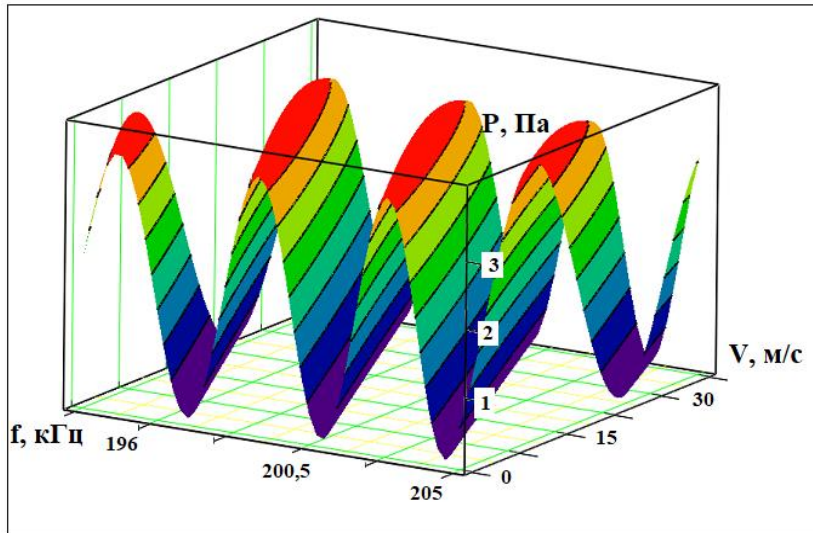


Рисунок 2 – Графік статичного тиску ультразвукової хвилі в плинному середовищі

Як видно з графіка, отримана функція є періодичною та має максимуми при  $x = a^2 / [(2n-1)\lambda]$  та мінімуми при  $x = a^2 / [2n\lambda]$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), де  $a$  – радіус п'єзоелемента. Це означає, що при знаходженні ультразвукових приймач-передач на відстані один від одного в межах ближньої зони має місце явище так званого резонансу у результаті інтерференції прямої та відбитої хвилі, що поширюються в плинному середовищі. При збільшенні відстані (відстань набагато більше, ніж розміри ближньої зон) відбувається процес затухання даного явища.

Для підтвердження результатів дослідження проведено моделювання процесу поширення частотно модульованого сигналу в плинному середовищі. Ультразвукова хвиля, що поширюється за потоком описується як

$$A1 = A \cos(\omega t + kx) = A \cos\left(\omega t + \frac{2\pi f x}{v_{yxx} + v}\right), \text{ а відбита, тобто хвиля проти потоку –}$$

$$A2 = A \cos(\omega t - kx) = A \cos\left(\omega t + \frac{2\pi f x}{v_{yxx} - v}\right). \text{ Сума цих двох хвиль і дає резонансну}$$

хвилю  $A$ , при умові відповідності конкретного значення швидкості потоку.

На рис. 3 показано поширення ультразвукових хвиль за  $A1$  та проти  $A2$  потоку, що знаходяться в резонансі при певному значенні швидкості потоку, а також їх результуюча хвиля  $A$ .

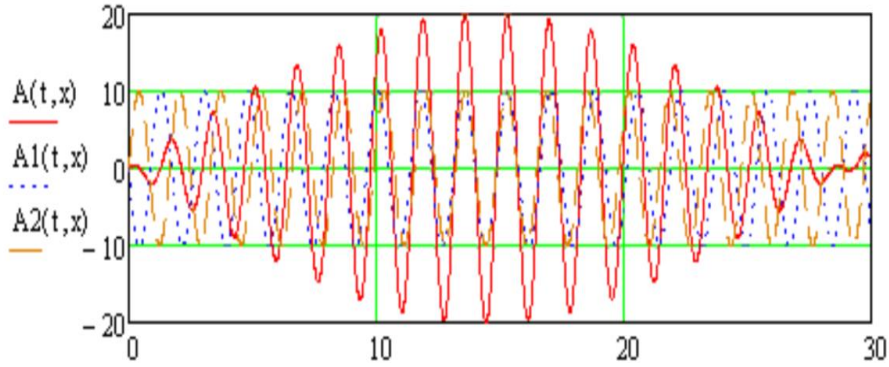


Рисунок 3 – Формування резонансу ультразвукової хвилі у результаті інтерференції прямої та відбитої хвилі, що поширюються в плинному середовищі

Окрім теоретичних досліджень також проведені експериментальні дослідження даного явища. Для цього розроблено експериментальну установку, яка дала змогу отримати характеристики залежності АЧХ при різних відстанях між приймачем та передавачем ультразвукової хвилі, від швидкості плинного середовища, а також температурну залежність. При цьому використовувались перетворювачі електроакустичні типу ПЭА-114 та ПЭА-103, зовнішній вигляд яких показано на рис. 4. Основна резонансна частота роботи таких перетворювачів становить 200 кГц та 3 МГц, відповідно, але також можуть працювати в діапазоні 180-210 кГц та 2,8-3,2 МГц, відповідно, з питомою чутливістю на відстані 100 мм при атмосферному тиску 47,3 мкВ/В. У всіх дослідженнях АЧХ сигналу мала так званий резонансний характер. Крім цього встановлено, що відношення резонансних частот відповідає відношенню відповідної кількості коливань



Рисунок 4 – Електроакустичні перетворювачі типу ПЭА-114 і ПЭА-103

при незмінному середовищу їх поширення.

Отже можна записати вираз, де  $\frac{f_1}{f_2} = \frac{n_1}{n_2}$ . (2)

Крім цього при наявності потоку частота ультразвукового сигналу  $f$  за потоком та проти потоку при певній швидкості однакова. Тоді

$$\frac{\lambda_{за}}{v_{узх} + v} = \frac{1}{f} = \frac{\lambda_{проти}}{v_{узх} - v}, \quad (3)$$

де  $\lambda_{за}$ ,  $\lambda_{проти}$  – довжина хвилі ультразвукового сигналу за та проти потоку, відповідно.

Таким чином результати моделювання та експериментальних досліджень дали змогу розробити новий амплітудно-частотний метод вимірювального кон-

тролю швидкості потоку, а отже витрат, який оснований на явищі інтерференції ультразвукових хвиль в межах ближньої зони ультразвукових перетворювачів шляхом визначення резонансної частоти ультразвукової хвилі частотно модульованого сигналу, що відповідає швидкості потоку. Такий підхід дозволив зменшити зону нечутливості і тим самим підвищити точність вимірювання для витратомірів малого діаметра трубопроводу.

Відомо, що швидкість поширення ультразвукової хвилі визначається як  $V_{узх} = \lambda f$ , де,  $f$  – частота ультразвукових коливань. З урахуванням швидкості

за потоком довжина хвилі буде визначатися як  $\lambda = \frac{v_{узх} + v \cos \alpha}{f}$ .

Для пари ультразвукових перетворювачів з однаковими розмірами довжина ближньої зони описується як  $N_{\text{бл}} = \frac{2a^2}{\lambda}$ . Тоді вираз для ближньої зони з урахуванням швидкості потоку набуде вигляду:

$$N_{\text{бл}}^{\text{за}} = \frac{2a^2 f}{v_{узх} + v \cos \alpha} = N_{\text{бл}} - \Delta N, \quad (4)$$

де  $\Delta N$  – зміна ближньої зони при появі плинності середовища з певною швидкістю за потоком.

Величина ближньої зони ультразвукового сигналу проти потоку аналогічно визначається як

$$N_{\text{бл}}^{\text{пр}} = \frac{2a^2 f}{v_{узх} - v \cos \alpha} = N_{\text{бл}} + \Delta N. \quad (5)$$

Це означає, що по аналогії з (2) має місце відношення ближніх зон

$$\frac{N_{\text{бл}}^{\text{за}}}{N_{\text{бл}}^{\text{пр}}} = \frac{v_{узх} - v \cos \alpha}{v_{узх} + v \cos \alpha} \quad (6)$$

Тоді шляхом використання (4), (5) та (6) з урахуванням формули (2) та (3), а також діаметра трубопроводу  $D$ , де  $N_{\text{бл}} = \frac{D + 2a \cos \alpha}{\sin \alpha}$  частота ультразвукової хвилі визначається

$$f = \frac{\left[ \left( \frac{D + 2a \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) (v^2_{узх} - v^2 \cos^2 \alpha) \right]}{2a^2 v_{узх} \left( 1 + \frac{n_0}{k_0} \right)}, \quad (7)$$

де  $n_0$  – кількість коливань ультразвукової хвилі на основному резонансі за

ПОТОКОМ, ЯКИЙ ВИЗНАЧАЄТЬСЯ ЯК  $n_0 = \frac{2f \left( \frac{D + 2a \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) v_{yx}}{v_{yx}^2 - v^2}$ ;

де  $k_0$  – кількість коливань ультразвукової хвилі на основному резонансі проти потоку, який визначається як  $\frac{N_{\text{бл}}^{\text{за}}}{N_{\text{бл}}^{\text{пр}}} = \frac{n_0}{k_0}$ .

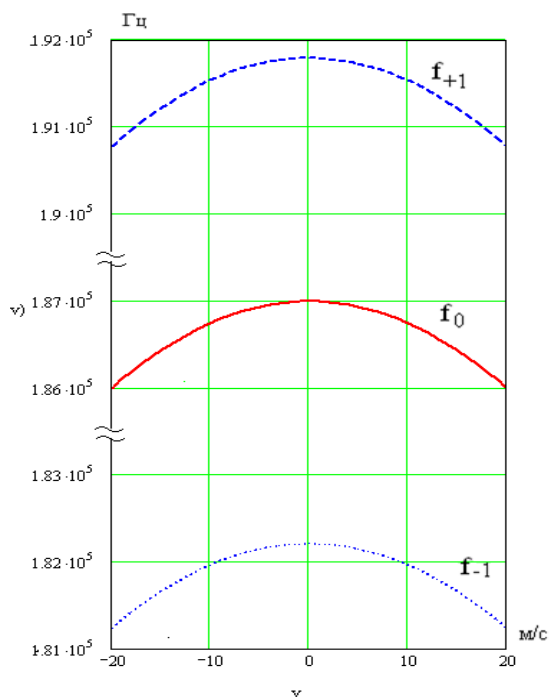


Рисунок 5 – Графік залежності декількох сусідніх резонансних частот ультразвукового сигналу від швидкості потоку

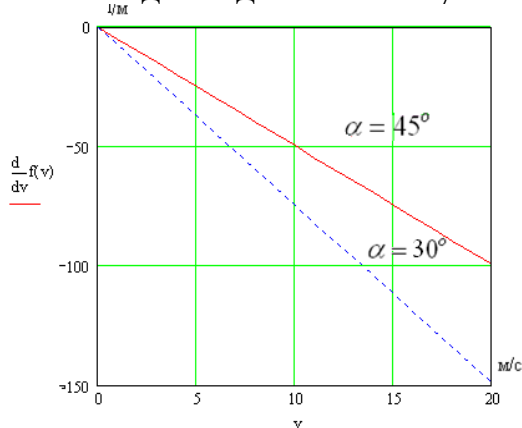


Рисунок 6 – Графік чутливості вимірювального перетворювача

На рис. 5 показано статичні характеристики декількох сусідніх резонансних частот ультразвукового сигналу. Як видно з графіка відстань між сусідніми резонансами складає приблизно 4,7 кГц при діаметрі трубопроводу 25 мм, що відповідає експериментальним даним. На рис 6 показано графік чутливості при декількох кутах нахилу ультразвукових перетворювачів відносно напрямку поширення плинного середовища. При зменшенні кута введення ультразвукового сигналу, відносно напрямку поширення потоку, чутливість такого перетворення зростає.

Оскільки частота сигналу суттєво залежить від температури, то необхідно використати додатковий компенсаційний канал і найбільш оптимальним рішенням при цьому є використання опорного каналу, який розташований перпендикулярно потоку і не реагує на зміну швидкості потоку.

Тоді частота ультразвукового сигналу на виході перетворювача опорного вимірювального каналу буде описуватися залежністю

$$f_0 = \frac{Dv_{yx}}{2a^2}. \quad (8)$$

А математична модель вимірювального перетворювача згідно формул (7) та (8) описується виразом

$$v = \frac{2a^2}{\cos \alpha} \cdot \sqrt{\frac{f_0^2}{D^2} - \frac{f_0 f \left(1 + \frac{n_0}{k_0}\right)}{D \left(\frac{D + 2a \cos \alpha}{\sin \alpha}\right)}} \quad (9)$$

Таким чином досягається можливість усунути залежність швидкості потоку від власної швидкості поширення звуку у досліджуваному середовищі, а отже й від ряду факторів, які впливають на неї.

На рис. 7 показано розташування вимірального та опорного каналів

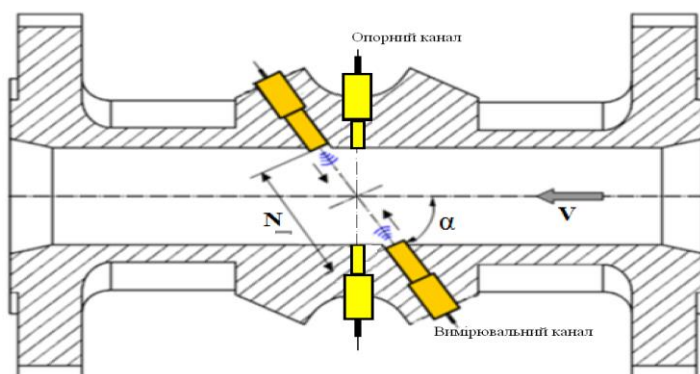


Рисунок 7 – Двоканальний вимірний перетворювач швидкості потоку

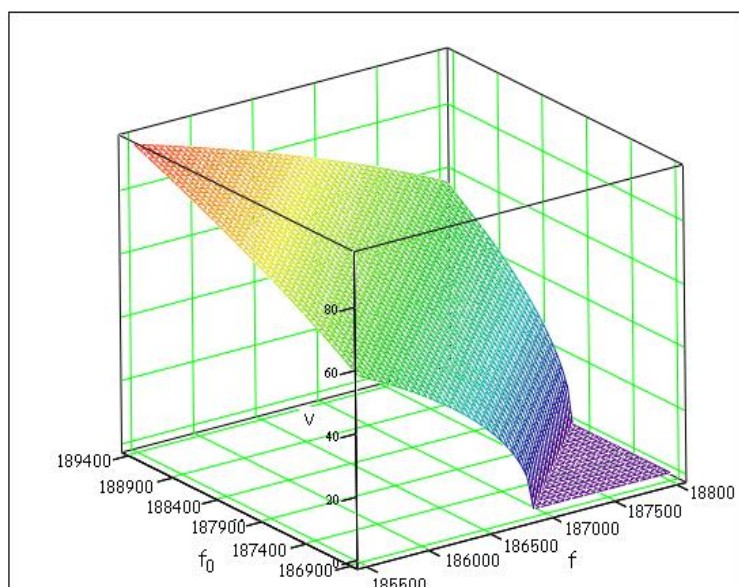


Рисунок 8 – Графік взаємозв'язку частот опорного та вимірального каналу від швидкості потоку плинного середовища

ультразвукового двоканального вимірального перетворювача.

Проведено моделювання запропонованої математичної моделі. Вхідні параметри моделювання такі:  $\alpha = 60^\circ$ ,  $f_1, f_2 = 182-200$  кГц,  $D = 0,025$  м,  $V = 0-60$  м/с (це відповідає витратам від 0 до 35 м<sup>3</sup>/год). На рис. 8 показані результати моделювання.

З графіка видно, що при збільшенні швидкості потоку частота ультразвукових коливань вимірального каналу зменшується. Частота вимірального каналу зменшується також і при підвищенні частоти опорного каналу, при цьому кут нахилу характеристики збільшується.

Результати досліджень дають можливість стверджувати про його перспективність практичного застосування для вимірального контролю плинних середовищ.

У третьому розділі на основі проведених досліджень розроблено ультразвуковий засіб контролю витрат плинних середовищ, а саме структурна схема засобу, описаний принцип його роботи, отримано функцію перетворення, яка однозначно пов'язує вихідну величину – значення резонансної частоти засобу та вхідну – значення швидкості потоку.

На основі запропонованої математичної моделі вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ, запропоновано структурну схему ультразвукового засобу контролю плинних середовищ, яка наведена на рис. 9.

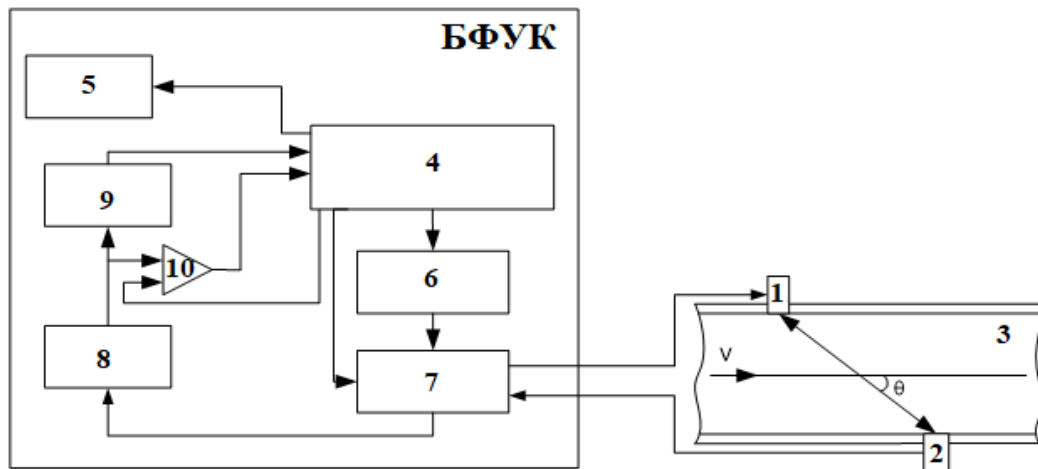


Рисунок 9 – Схема ультразвукового витратоміра з БФУК  
 1 та 2 – електроакустичні перетворювачі, 3 – вимірювальна ділянка трубопроводу, 4 – контролер, 5 – індикатор, 6 – генератор змінної частоти, 7 – комутатор, 8 – підсилювач, 9 – АЦП та 10 – компаратор

Засіб складається з блоку формування ультразвукових коливань (БФУК), електроакустичних перетворювачів 1, 2, які врізані у вимірювальну ділянку трубопроводу 3.

Витратомір працює на принципі випромінювання резонансної частоти ультразвукових коливань за потоком або проти потоку досліджуваного середовища, що пройшло через нього.

Ультразвуковий частотно модульований сигнал проходить від одного п'єзоелемента до іншого й при певній його частоті, яка буде резонансною, амплітуда сигналу буде максимальною. Дана частота при цьому відповідає швидкості потоку. При зміні швидкості потоку зменшується амплітуда. Для відновлення максимального значення амплітуди необхідно змінити частоту сигналу у відповідності до умови ближньої зони.

Об'ємні витрати плинного середовища визначаються як  $Q = 0,25\pi D^2 vt$ , де  $t$  – час, за який відбувається контроль витрат. Тоді математичну модель засобу можна записати у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \frac{0.5\pi a^2 D^2 t}{\cos \alpha} \cdot \sqrt{\frac{f_0^2}{D^2} - \frac{f_0 f \left(1 + \frac{n_0}{k_0}\right)}{D \left(\frac{D + 2a \cos \alpha}{\sin \alpha}\right)}} \\ N_{dig}^1 = \frac{kU_{max}^1}{U_{on}} (2^{n_0} - 1) \\ N_{dig}^0 = \frac{kU_{max}^0}{U_{ii}} (2^{n_0} - 1) \\ f_0 = F(N_{dig}^0) \\ f = F(N_{dig}^1) \end{array} \right. \quad (10)$$

де  $N_{dig}^1$  – двійкове значення коду  $n$ -розрядного АЦП, що оцифровує максимальну напругу  $U_{max}^1$  приймача вимірювального каналу, яка відповідає резонансній частоті ультразвукової хвилі.

де  $N_{dig}^0$  – двійкове значення коду  $n$ -розрядного АЦП, що оцифровує максимальну напругу  $U_{max}^0$  приймача опорного каналу, яка відповідає резонансній частоті ультразвукової хвилі.

Схемна реалізація функціональних перетворень засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ показано на рис. 10.

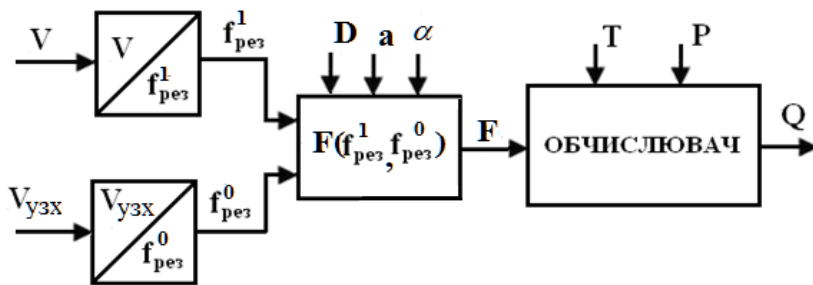


Рисунок 10 – Схема функціональних перетворень вимірювального засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ

Функціонально засіб містить два ідентичні канали вимірювання швидкості, які налаштовані на визначення резонансних частот, що відповідають швидкості потоку та швидкості ультразвукової хвилі в даних умовах.

На рис. 11 показана структурна схема вимірювального каналу ультразвукового амплітудно-частотного витратоміра.

Вимірювальний перетворювач працює наступним чином. Сигнал з п'єзоприймача поступає на вхід вхідного підсилювача (ВхП), далі підсилений сигнал поступає на вхід фільтра нижніх частот (ФНЧ), а далі – на вхід пікового детектора (ПД), амплітудне значення якого вимірюється та записується мікропроцесорним блоком (МБ). Для підвищення точності вимірювання використовується диференційний підсилювач (ДП). Частота генератора ( $\Gamma$ ) задається мікропроцесорним блоком, сигнал з генератора підсилюється

Функціонально засіб містить два ідентичні канали вимірювання швидкості, які налаштовані на визначення резонансних частот, що відповідають швидкості потоку та швидкості ультразвукової хвилі в даних умовах.



вихідним підсилювачем (ВихП) та надходить на п'єзоелектричний передавач.

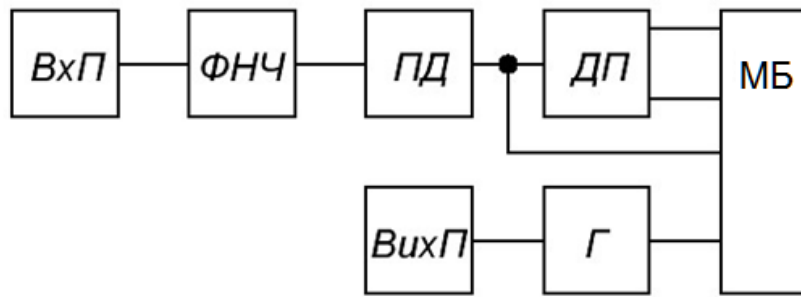


Рисунок 11 – Структурна схема вимірювального каналу ультразвукового амплітудно-частотного витратоміра

На рис. 12 показано зовнішній вигляд ультразвукового сенсора, на рис. 13 – мікропроцесорного блоку обробки даних.

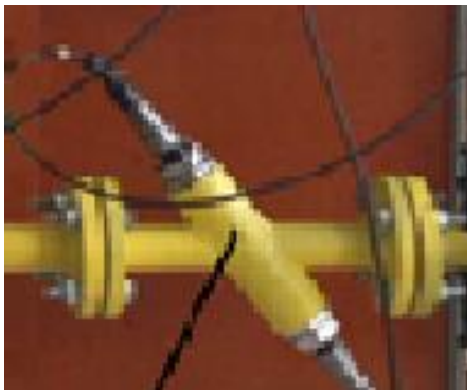


Рисунок 12 - Зовнішній вигляд ультразвукового сенсора

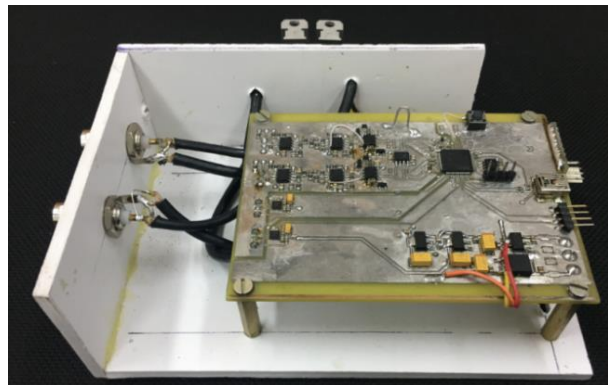


Рисунок 13 - Зовнішній вигляд мікропроцесорного блоку обробки даних

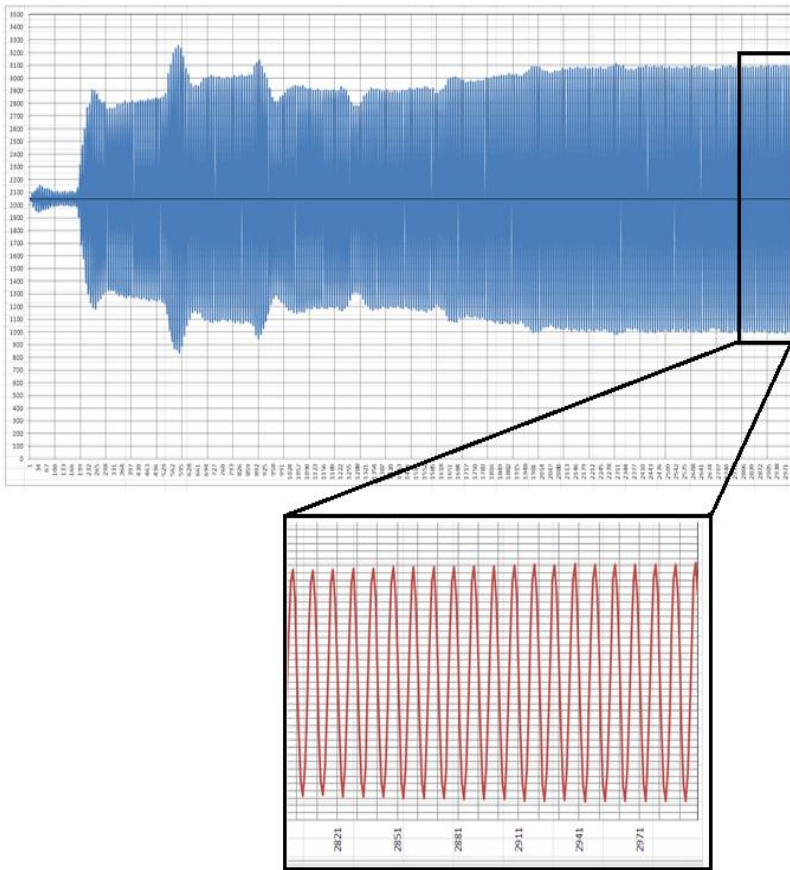
ФНЧ побудований по схемі активного фільтра Баттерворта шостого порядку. ПД зібраний за класичною схемою на операційному підсилювачі з використанням польового транзистора для розрядки накопичувального конденсатора. МБ складається із мікроконтролера STM32F103RCT6, що має вбудовані АЦП та ЦАП та мікросхему Flash пам'яті AT25SF041. МБ має вихід USB та UART для введення та виведення інформації. Мікросхема Flash пам'яті використовується для автономного збереження інформації про витрату газу. Крім цього МБ має автономний індикатор, індикатори режимів роботи, а також містить стандартні виходи у вигляді інтерфейсів RS-232 для підключення до сенсора газу та USB для підключення до єдиної системи збору даних.

Розроблено алгоритм мікропроцесорної обробки результатів вимірювання швидкості потоку, який полягає у вимірюванні напруги  $U_1$  вихідного сигналу при певному значенні частоти  $f_1$  вхідного ультразвукового сигналу. Далі відбувається збільшення частоти  $f_1$  на один крок до частоти  $f_2$ . Відповідно зі

зміною частоти відбувається зміна вихідної напруги, яка далі визначається як  $U_2$ . У випадку нерівності вихідних напруг змінюється значення частоти на один крок. Якщо  $U_1 > U_2$ , частота збільшується на один крок. Якщо  $U_1 < U_2$ , значення частоти зменшується на один крок. Процес циклічно повторюється до моменту рівності попереднього та наступного значень напруг. Відоме значення частоти й слугуватиме мірою відображення швидкості потоку в даний момент часу. При цьому час перехідної характеристики визначається як

$$T = T_2 + T_{yzn} + T_{nik} + T_{АЦП}, \quad (11)$$

де  $T_2$  – час налаштування частоти генератора,  $T_3$  – час проходження звукової хвилі через плинне середовище,  $T_{nik}$  – час наростання амплітуди на виході пікового детектора,  $T_{АЦП}$  – час цифро-аналогового перетворення.



На рис. 14 показано формування стоячої хвилі на виході АЦП, яка містить зону наростання та зону стійкого режиму. Це означає, вимірювання амплітуди сигналу необхідно виконувати тільки в режимі стійкого стану.

Для підвищення точності визначення резонансної частоти розроблено підхід, який полягає у використанні значень трьох точок частоти і, відповідно, їх амплітуд, що знаходяться в області резонансної частоти. На рис. 15 показано вигляд частини АЧХ в області резонансу, область в межах вершини якої можна апроксимувати частиною кола. При цьому центр кола буде відповідати максималь-

Рисунок 14 – Експериментальна осцилограма формування стоячої хвилі на виході АЦП

ному значенні амплітуди, а отже, відповідно, резонансній частоті.

Резонансна частота  $z$  визначається як:

$$z = \frac{[(f_1^2 - f_2^2) + (N_1^2 - N_2^2)] \cdot (N_1 - N_3) - [(f_1^2 - f_2^2) + (f_1^2 - f_3^2)] \cdot (N_1 - N_2)}{2 \cdot [(f_1 - f_2) \cdot (N_1 - N_2) - (f_1 - f_2) \cdot (N_1 - N_2)]}. \quad (12)$$

де  $R$  – радіус кола, частина якого становить частину АЧХ в області резонансної частоти;  $f_1, f_2, f_3$  – значення частот ультразвукового сигналу в області резонансної частоти, відповідно;  $N_1, N_2, N_3$  – значення амплітуд ультразвукового сигналу в області резонансної частоти, відповідно;  $k$  – умовне

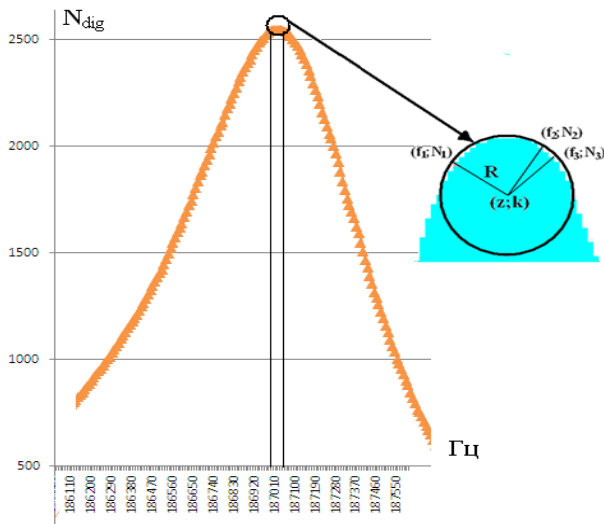


Рисунок 15 – АЧХ сигналу та її представлення частиною кола

значення координати максимальної амплітуди сигналу.

Таким чином, використовуючи вираз (12), можна розрахувати значення резонансної частоти з більш високою точністю.

Встановлено, що за допомогою такого засобу можна отримати до 25 вимірів в секунду для обчислення резонансної частоти, а отже витрат.

Проведено аналіз складових похибок вимірювання витрат плинних середовищ та встановлено, що значення інструментальної похибки становить 0,345%, значення методичної похибки – 0,11%, загальна

похибка вимірювань не перевищує 0,5%.

У четвертому розділі наведено рекомендації щодо інженерного проектування засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, на основі яких виготовлено експериментальний зразок та проведено його експериментальні дослідження. Запропонований алгоритм вимірювального контролю витрат плинних середовищ, який дозволяє зробити висновок про придатність витрат, тобто відповідність заданій нормі для конкретного застосування. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ. Проведено аналіз результатів експериментальних досліджень засобу.

Наведено залежності загального закону розподілу похибки вимірювання швидкості потоку середовища та встановлено, що закон розподілу є нормальний. Розраховано помилки першого  $\alpha=0,03533$  та другого роду  $\beta=0,0028$ . Вірогідність прийняття засобом вимірювального контролю правильного результату становить 0,96, що на 1% більше, ніж у відомих засобів.

Для проведення експериментальних досліджень амплітудно-частотного вимірювача швидкості плинних середовищ використано експериментальну установку ДП «Укрметртестстандарт» та розроблено методику проведення досліджень.

Експериментальні дослідження проводили при температурі 20°C при тисках 1 атм., 1,1 атм., 1,2 атм., 1,25 атм. Ультразвукові вимірювальні перетворювачі попередньо тестувались. Основні дослідження були направлені на встанов-

лення залежності резонансної частоти від швидкості, а отже витрат плинного середовища. Проведений аналіз результатів експериментальних досліджень засобу показав збіжність теоретичної та експериментальної характеристики. Похибка моделі не перевищує 10%.

При проведенні експериментальних досліджень отримано 500 значень швидкості потоку протягом 7 хв. у діапазоні від 1,7038 м/с до 1,721 м/с. Отримано залежність зміни швидкості плинного середовища та зміни відносної похибки. Аналіз експериментальних досліджень показує, що максимальне значення зведеної похибки вимірювання не перевищує 1 %. На основі експериментальних досліджень побудовано закони розподілу контрольованої величини, відносної похибки вимірювання швидкості плинного середовища та сумісний закон розподілу. Статистичні оцінки для експериментальних даних та перевірка гіпотези на нормальний закон розподілу проводилися за допомогою програми Numeri v. 2.1 і Maple 15.

У таблиці 1 наведені порівняльні характеристики розробленого засобу контролю витрат плинних середовищ та ультразвукового часово-імпульсного витратоміра Зонд-1 виробництва України Товариства «НВП «Курс».

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики розробленого засобу контролю плинних середовищ

Технічні характеристики	Засіб вимірювального контролю	
	Розроблений	Зонд 1
Діапазон вимірювання, м <sup>3</sup> /год.	0,25...25	0,25...25
Мінімальний внутрішній діаметр, мм	25	40
Відносна похибка вимірювання, % в межах: 0,25 – 5 м <sup>3</sup> /год. 5 – 25 м <sup>3</sup> /год.	2 0,5	2 1
Частота роботи Гц	10	2
Робоча температура, С	-30...+50	-30...+50
Вага, кг	5	15
Вартість, грн.	3200	4800
Вірогідність вимірювального контролю	0,96	0,95

Таким чином, отримані в роботі результати вказують на перспективність запропонованого методу та амплітудно-частотного засобу витрат плинних середовищ на його основі для використання в трубопроводах малого діаметра.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи розв'язано важливу науково-практичну задачу підвищення точності та вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ на основі використання ультразвукового амплітудно-частотного методу.

В загальному по роботі можна зробити такі висновки:

1. Проаналізовано сучасний стан методів та засобів вимірювального контролю витрат плинних середовищ, виявлено їх переваги та недоліки. Обґрунтовано вибір найбільш перспективного та точного методу вимірювального контролю витрат. Таким методом є ультразвуковий, який не зважаючи на недоліки, має безліч переваг над іншими, а саме: безінертність та безконтактність вимірювання; відсутність рухомих частин в потоці та витрат тиску в трубопроводах; можливість їх застосування для вимірювання витрат забруднених і агресивних середовищ.

2. Запропоновано математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі, яка описує поведінку сигналу в ближній зоні внаслідок зміни частоти та швидкості потоку. Встановлено, що на величину вихідного сигналу суттєво впливає густина плинного середовища, його температура, а для природного газу – показник адіабати та коефіцієнт стисливості газу.

3. Запропоновано ультразвуковий амплітудно-частотний метод вимірювання швидкості потоку, який полягає у визначенні резонансної частоти ультразвукової хвилі, що однозначно пов'язана з швидкістю плинного середовища, яка відповідає останньому дифракційному максимуму ближньої зони. Такий підхід дозволив зменшити зону нечутливості й тим самим підвищити точність і вірогідність вимірювального контролю та використати його як засіб вимірювального контролю плинних середовищ в трубопроводах малого діаметра.

4. Розроблено математичну модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ та проведено моделювання отриманої залежності, з якого видно, що залежність резонансної частоти ультразвукової хвилі від швидкості потоку не залежить від напрямку потоку. Отримано залежність зміни частоти ультразвукового сигналу від часу, за допомогою якого можна зробити висновок про достатньо високу швидкодію.

5. Розроблено засіб вимірювального контролю витрат природного газу, який може бути застосований в газопроводах невеликого діаметра (від 25 мм) та в умовах різкої зміни швидкості потоку. Проведено моделювання даного засобу, в основу якого покладено еквівалентну схему вимірювального перетворювача на основі смугового фільтра. Результати моделювання показали можливість використання запропонованого методу. Оцінено час реакції системи на зміну частоти генератора. Наведено алгоритм вимірювального контролю витрат.

6. Проведено аналіз результатів експериментальних досліджень засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, який показав збіжність теоретичної та експериментальної характеристики. Похибка моделі не перевищує 10%. Наведено залежності загального закону розподілу похибки вимі-

рювання швидкості потоку та встановлено, що закон розподілу є нормальним. Розраховано помилки першого  $\alpha=0,035$  та другого роду  $\beta=0,0028\div 0,0002$ . Вірогідність прийняття засобом вимірювального контролю правильного результату становить 0,96, що на 1% вище, ніж у відомих засобів.

7. Отримано аналітичні залежності статичних метрологічних характеристик та оцінено впливні величини на вимірювальний канал засобу контролю. Встановлено, що значення похибки вимірювань не перевищує 1%.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] Й. Й. Білінський, М. В. Гладишевський і Б. П. Книш, «Визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 112-119, 2014.
- [2] Й. Й. Білінський, М. В. Гладишевський і М. О. Стасюк, «Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ і класифікація на їх основі», *Наукові праці ВНТУ*, № 1, 2015, [Електронний ресурс]. Доступно: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/3748/5468>.
- [3] Й. Й. Білінський, М. В. Гладишевський і О. С. Городецька, «Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідких і/або газоподібних середовищ», *98518 МПК G0FB 1/00 № U201413183*, Квіт. 27, 2015.
- [4] Й. Й. Білінський, М. В. Гладишевський і О. С. Городецька, «Ультразвуковий витратомір», *99227 МПК G0FB 1/00 № U201413183*, Трав. 25, 2015.
- [5] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Аналіз метрологічних характеристик засобів вимірювання об'єму та витрати плинних середовищ», на *Всеукраїнському семінар-наradі. Облік природного газу та метрологія*, Козин, 2016, с. 13-15.
- [6] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Аналіз ультразвукових засобів вимірювального контролю витрати плинних середовищ», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 23-29, 2016.
- [7] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Розробка ультразвукового методу вимірювання швидкості плинних середовищ», *Технологічний аудит та резерви виробництва*, № 4/1, с. 19-24, 2015.
- [8] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Новий ультразвуковий метод вимірювання витрат плинних середовищ», *Нафтогазова галузь України*, № 2, с. 35-39, 2016.
- [9] Й. Й. Білінський і М. Гладишевський, «Методика проектування амплітудно-частотного вимірювального перетворювача швидкості потоку», на *XV Міжнародній науково-технічній конференції. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, Одеса, 2015, с. 37-39.
- [10] Й. Й. Білінський і М. В. Гладишевський, «Ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ», на *I Міжнародній науково-технічній конференції. Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015*, Житомир, 2015, с. 53-54.

- [11] М. В. Гладисhevський, А. А. Рижкова і Д. О. Харламов, «Шляхи забезпечення єдності вимірювань на підприємствах», на *X Міжнародній науково-технічній конференції. АВІА-2011*, Київ, 2011, с. 71-74.
- [12] М. В. Гладисhevський, «Аналіз системи вимірювання витрат газу», на *IX Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2009, с. 56.
- [13] В. С. Єременко і М. В. Гладисhevський, «Сучасні прилади обліку витрат газу», на *X Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2010, с. 152.
- [14] В. С. Єременко і М. В. Гладисhevський, «Методика обліку природного газу на базі ультразвукового лічильника», на *XI Міжнародній науково-технічній конференції. Політ. Сучасні проблеми науки*, Київ, 2011, с. 125.
- [15] Й. Й. Білинський і М. В. Гладисhevський, «Математична модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ», на *III Міжнародній науковій конференції. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах*, Вінниця, 2015, с. 128-129.
- [16] М. П. Андрійшин, М. В. Гладисhevський, Р. А. Домницький, С. І. Дехтярчук і А. В. Едель, «Вплив фізико-хімічних показників газу на ефективність роботи газових приладів», *Нафтогазова галузь України*, № 6, с. 34-39, 2014.
- [17] Й. Й. Білинський і М. В. Гладисhevський, «Експериментальне дослідження підсилювача для ультразвукового витратоміра», на *Міжнародній науково-практичній конференції. Потенціал сучасної науки*, Вінниця, 2016, с. 21-23.
- [18] Й. Й. Білинський і М. В. Гладисhevський, «Моделювання роботи підсилювача для ультразвукового витратоміра», на *XIII Міжнародній конференції. Контроль та управління в складних системах (КУСС-2016)*, Вінниця, 2016, с. 71-73.
- [19] Й. Й. Білинський і М. В. Гладисhevський, «Алгоритм мікропроцесорної обробки вимірювання швидкості потоку», на *X Міжнародній науково-технічній конференції. Метрологія та вимірювальна техніка*, Харків, 2016, с. 94.
- [20] Й. Й. Білинський, М. В. Гладисhevський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання поширення ультразвукових хвиль в плинному середовищі», *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, № 42(1214), с. 17-21, 2016. Doi. 10.20998/2413-4295.2016.42.03.
- [21] Й. Й. Білинський, М. В. Гладисhevський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання ультразвукового амплітудно-частотного вимірювача швидкості плинних середовищ», *Методи та прилади контролю якості*, № 2(37), с. 67-71, 2016.
- [22] Й. Й. Білинський, М. В. Гладисhevський і В. Б. Бурдейний, «Моделювання ультразвукового засобу вимірювального контролю витрати плинних середовищ», *Вісник Хмельницького національного університету, Серія: Технічні науки*, № 1(245), с. 191-195, 2017.

- [23] Й. Й. Білінський і М. В. Гладішевський, «Ультразвуковий метод вимірювання швидкості плинних середовищ», на *Всеукраїнському семінарі-нараді. Облік природного газу та метрологія*, Рівне, 2015, с. 13-14.
- [24] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський, О. С. Городецька і Я. В. Яхимович, «Ультразвуковий спосіб вимірювання витрат рідких і/або газоподібних середовищ», *121664 МПК G01F 1/66 № U201706593*, Груд. 11, 2017.
- [25] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський, К. В. Огородник і А. В. Столяр, «Спосіб визначення густини газу», *115995 МПК G01F 1/66 № U201608719*, Травень. 10, 2017.9
- [26] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський, О. С. Городецька і Я. В. Яхимович, «Дослідження частотної характеристики ультразвукового сигналу в системі приймач-передавач в межах ближньої зони», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2017)»*, Вінниця, 2017, с. 23–24.
- [27] Й. Й. Білінський, М. В. Гладішевський, О. С. Городецька і Я. В. Яхимович, «Дослідження явища інтерференції ультразвукового сигналу в межах ближньої зони», на *Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2017)»*, Вінниця, 2017, с. 25–26.

## АНОТАЦІЯ

**Гладішевський М.В. Метод і ультразвуковий засіб вимірювального контролю витрат плинних середовищ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин». - Вінницький національний технічний університет. - Вінниця, 2018.

Робота присвячена розв'язанню важливої науково-практичної задачі підвищення точності та вірогідності вимірювального контролю витрат плинних середовищ на основі використання ультразвукового амплітудно-частотного методу. В роботі проаналізовано сучасний стан методів та засобів вимірювального контролю витрат плинних середовищ, виявлено їх переваги та недоліки. Запропоновано математичну модель поширення ультразвукової хвилі в плинному середовищі. Запропоновано ультразвуковий амплітудно-частотний метод вимірювання швидкості потоку, який полягає у визначенні резонансної частоти ультразвукової хвилі. Розроблено математичну модель ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ, засіб вимірювального контролю витрат природного газу, який може бути застосований в газопроводах невеликого діаметру. Проведено аналіз результатів експериментальних досліджень засобу вимірювального контролю витрат плинних середовищ, отримано аналітичні залежності статичних метрологічних характеристик та оцінено впливні величини на вимірювальний канал засобу контролю.



**Ключові слова:** частотно модульований сигнал, вимірювальний контроль, природний газ, витратоміри, методи вимірювання, ультразвуковий вимірювальний перетворювач, ультразвуковий амплітудно-частотний метод, амплітудно-частотний витратомір, ближня зона.

## ABSTRACT

***Gladyshevskiy M.V. Method and ultrasonic mean of measurement control for flowing medium flowrate. – Qualification scientific paper on the rights of manuscript.***

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.11.13 "Instruments and methods of control and determination of substance composition". - Vinnytsia National Technical University. - Vinnytsya, 2018.

The thesis paper is concerned with solving an important scientific and practical task of increasing the accuracy and probability of flowing medium flow rate measuring control based on the use of ultrasonic amplitude-frequency method.

The present state of methods and means of measurement control for flowing medium flowrate is analyzed, their advantages and disadvantages are revealed. Such method is ultrasonic method, which despite disadvantages has many advantages over other methods, such as: zero lag and contactless of measurement; the absence of moving parts in the flow and pressure losses in the pipelines. The mathematical model of the ultrasonic wave propagation in a fluid medium is proposed, which describes the behavior of the signal in the near zone due to changes in the frequency and flow velocity. It is established that the density of the flowing medium and its temperature, significantly influences the magnitude of the output signal and for natural gas the adiabatic index and the compressibility factor of gas. An ultrasonic amplitude-frequency method for measuring the flow velocity is proposed, which consists in determining the resonance frequency of an ultrasonic wave, that is uniquely associated with the velocity of the flowing medium, which corresponds to the last diffractive maximum of the near zone. This approach has allowed to reduce the zone of insensitivity and thereby to increase the accuracy and probability of measurement control of flowing medium and use it as a mean of measurement control for flowing medium flowrate in conduits with small cross-section. The mathematical model of the ultrasonic measuring transducer of the flowing medium velocity was developed and the obtained dependency was simulated, from which it is evident that the dependence of the resonance frequency of the ultrasonic wave on the flow velocity does not depend on the flow direction. The dependence of the change in the frequency of the ultrasonic signal from time is obtained, that is results in high response speed. The device for measurement control of natural gas flowrate was developed, which can be applied in gas pipelines with small diameter (from 25 mm) and in conditions of sharp change of flowrate. The simulation of this device was carried out, based on the equivalent scheme of the measuring transducer with the bandpass filter. The simulation results showed the adequacy the proposed method. The reaction time of the system on the frequency change of the generator was estimated. The algorithm of measurement

control of flowrate is given. The analysis results of experimental studies of the mean of measurement control for flowing medium flowrate has been carried out, which showed the convergence of theoretical and experimental characteristics. Model error does not exceed 10%. The dependences of the general law of the distribution of the measurement error of the flow velocity measurement are given and it is established that the distribution law is normal. The errors of the first  $\alpha = 0.035$  and the second kind  $\beta = 0.0028 \div 0.0002$  were calculated. The probability of acceptance by mean of measurement control of the correct result is 0.96, which is 1% higher than that of known means. The analytical dependences of static metrological characteristics were obtained and the influence values on the measurement channel of the control instrument were estimated. It has been established that the measurement error value does not exceed 1%.

**Keywords:** frequency modulated signal, measurement control, natural gas, flow meters, measurement methods, ultrasonic measuring transducer, ultrasonic amplitude-frequency method, amplitude-frequency flow meter, near zone.

## АННОТАЦИЯ

**Гладышевский Н. В. Метод и ультразвуковое средство измерительного контроля расходов текучих сред. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля и определения состава веществ». - Винницкий национальный технический университет. - Винница, 2018.

Работа посвящена решению важной научно-практической задачи повышения точности и достоверности измерительного контроля расхода текучих сред на основе использования ультразвукового амплитудно-частотного метода. В работе проанализировано современное состояние методов и средств измерительного контроля расхода текучих сред, выявлены их преимущества и недостатки. Предложено математическую модель распространения ультразвуковой волны в текучей среде, ультразвуковой амплитудно-частотный метод измерения скорости потока, который заключается в определении резонансной частоты ультразвуковой волны. Разработана математическая модель ультразвукового измерительного преобразователя скорости текучих сред, средство измерительного контроля расхода природного газа, которое может быть применено в газопроводах небольшого диаметра. Проведен анализ результатов экспериментальных исследований средства измерительного контроля расхода текучих сред, получены аналитические зависимости статических метрологических характеристик и оценены влияние величины на измерительные каналы средства контроля.

**Ключевые слова:** частотно модулированный сигнал, измерительный контроль, природный газ, расходомеры, методы измерения, ультразвуковой измерительный преобразователь, ультразвуковой амплитудно-частотный метод, амплитудно-частотный расходомер, ближняя зона.

Підписано до друку 12.09.2018 р. Формат 60x84 1/16.

Тираж 100 прим. Зам. № 2012-150

Віддруковано в інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

21021, Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: (0432) 59-81-59