

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ТАРАНЕНКО ЮРІЙ КАРЛОВИЧ

УДК 681.2:621.3.082.1

**ВІБРОЧАСТОТНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ
РІДКИХ ТА ГАЗОПОДІБНИХ РЕЧОВИН
(ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ)**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ХАРКІВ – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі радіоелектронної автоматики фізико-технічного факультету Дніпропетровського національного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Петренко Олександр Миколайович,
Дніпропетровський Національний університет
м. Дніпропетровськ, декан фізико-технічного факультету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сучков Григорій Михайлович,
Національний технічний університет
„Харківській політехнічний інститут”
м. Харків, професор кафедри приладів та методів
неруйнівного контролю

доктор технічних наук, професор
Ігуменцев Євген Олександрович,
Українська інженерно-педагогічна академія м. Харків,
завідувач кафедри систем управління технологічними
процесами і об'єктами

доктор технічних наук, професор
Мусієнко Максим Павлович,
Черкаський державний технологічний університет
м. Черкаси, професор кафедри комп'ютеризованих та
інформаційних технологій у приладобудуванні

Захист відбудеться “09” квітня 2009 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті „Харківській політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету „Харківській політехнічний інститут”

Автореферат розісланий ”26” лютого 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Глоба С.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Основою підвищення ефективності промислового виробництва є використання методів автоматичного контролю якості сировини та готової продукції. Віброспостереження методи контролю (ВМК) складу рідких і газоподібних речовин відрізняються відносною простотою автоматизації, високою чутливістю та надійністю. Використання для реалізації ВМК механічних резонаторів (МР), добротність яких перевищує добротність електричних коливальних контурів на декілька порядків, створює суттєві переваги цих методів над іншими автоколивальними методами контролю.

Але за існуючим ВМК частота автоколивань МР з контрольованою речовиною порівнюється із заданою з урахуванням діапазону зміни частоти, а компенсація впливу температури та тиску речовини здійснюється за допомогою окремих датчиків тиску та температури. Частота коливань МР густиноміра після стрибка температури або тиску встановлюється протягом двох десятків періодів, що при середній частоті у 1000 Гц займає 20 мс. Температурна похибка кращих зразків віброспостереження густиномірів рідини фірми Solartron з датчиком температури середньої інерційності у 80 с складає $1,2 \text{ кг/м}^3$ на 1°C . При зміні температури зі швидкістю 1°C на хвилину це призводить до неврахованої додаткової похибки контролю у $1,6 \text{ кг/м}^3$. При контакті МР з вимірювальною речовиною обома поверхнями тиск не впливає але різко зменшується добротність МКС унаслідок демпфування коливань речовиною та у зазорах системи збудження коливань. Контакт МР із речовиною тільки однією поверхнею спричиняє суттєвий вплив на частоту автоколивань надлишкового тиску та швидкості течії речовини. Додаткові датчики тиску також мають температурний дрейф нуля та масштабного коефіцієнта, тому неврахована додаткова похибка від коливання тиску складає у середньому $5,8 \text{ кг/м}^3$ на 1 МПа.

Використання додаткових датчиків температури та тиску перешкоджає здійсненню прямого вимірювального перетворення контрольованого параметра у частотний вихідний сигнал. Втрачається основна перевага ВМК – природний частотний вихідний сигнал.

Науково-прикладна проблема, яка вирішується у дисертаційній роботі полягає у розширенні галузі застосування ВМК і визначення складу і властивостей рідких і газоподібних речовин на контроль густини рідин і газів, концентрації вузької фракції твердої фази суспензій, положення межі розподілу рідин або рідини і газу в умовах коливань температури, тиску контрольованого середовища, густини рідкої фази суспензій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. Дисертаційна робота виконана у Дніпропетровському національному університеті на кафедрі радіоелектронної автоматики і базуються на результатах науково-дослідних робіт, які виконувалися у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України “Автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи контролю та діагностики авіаційне – космічних конструкцій” (ДР0102U004418), здобувач – виконавець розділу, та госпрозрахункової роботи Університету економіки та права (м. Дніпропетровськ) „Віброспостереження методи вимірювань та контролю

технологічних параметрів виробничих процесів, (ДР0106U000820), здобувач – науковий керівник роботи.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є обґрунтування теоретичних основ розробки та впровадження перспективних віброчастотних методів контролю масової густини рідин та газів, положення межі розподілу рідин або рідини та газу, масової концентрації вузької фракції твердої фази суспензій, в умовах коливань температури, тиску, швидкості течії рідини або газу, густини рідкої фази суспензій або пульпи.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

- удосконалити віброчастотний метод контролю густини рідин та газів, що полягає у порівнянні частот автоколивань трубчастих механічних резонаторів;
- розробити віброчастотний метод контролю густини рідин та газів оснований на порівнянні частот автоколивань пластинчастих (ПМР) і циліндричних (ЦМР) механічних резонаторів;
- розробити віброчастотний експрес метод контролю концентрації вузької фракції твердої фази суспензій;
- розробити віброчастотний метод контролю положення межі розподілу рідин або рідини та газу;
- визначити похибки контролю, які вносить автоколивальна система механічного резонатора (АКСМР) густиноміра з магнітоелектричною системою збудження та ємнісною системою зняття коливань;
- дослідити АКСМР у яких виявляється суттєва нелінійність пружних властивостей механічного резонатора, та запропонувати методи її компенсації;
- дослідити АКСМР яка потребує спеціальних заходів для стабілізації амплітуди коливань МР, і визначити межі стійкості автоколивань у таких системах;
- визначити похибки контролю у залежності від виду характеристики підсилювача зворотного зв'язку (ПЗЗ) та синтезувати характеристику підсилювача, яка мінімізує ці похибки;
- впровадити віброчастотний датчик (ВД) контролю масової густини мазуту, та математичні моделі для розрахунку основних параметрів ВД контролю густини, положення межі розподілу рідин та експрес аналізатора масової концентрації вузької фракції твердої фази суспензій.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії вібраційного поля створеного МР з контрольованою речовиною, який формує реакцію у вигляді зміни частоти власних коливань механічного резонатора, що несе інформацію про склад та властивості контрольованої речовини.

Предметом дослідження є ВД контролю масової густини рідин та газів, масової концентрації вузької фракції суспензій та пульпи, положення межі розподілу рідин або рідини та газу.

Методи досліджень. При теоретичних дослідженнях для створення основ удосконалених ВМК були використані методи підвищення точності, чутливості та вірогідності контролю складу і властивостей рідких та газоподібних речовин шляхом компенсації додаткових похибок від коливань тиску та температури. Методами теорії коливань визначені залежності власних частот трубчастих,

мембранних та циліндричних резонаторів від контрольованих та неінформативних параметрів, знайдені умови їх компенсації. Методами теорії автоматичного керування визначені похибки, які вносить автоколивальна система механічного резонатора у результати контролю і знайдені умови їх зменшення. Досягнуті результати по точності і достовірності контролю густини рідин перевірені методом пасивного експерименту у реальних умовах експлуатації.

Наукова новизна одержаних результатів:

– удосконалено ВМК густини рідини, що полягає у порівняння частот (періодів) автоколивань двох ТМР, через які протікає контрольована речовина, шляхом: контролю за різницею частот (періодів) автоколивань резонаторів, густини з максимальною чутливістю; забезпечення однакових змін частот (періодів) автоколивань обох резонаторів від впливу температури, тиску, швидкості течії рідини через резонатори; зменшення нелінійності характеристики перетворення; контролю температури за отриманим значенням густини та частотами (періодами) резонаторів; управління відношенням частот автоколивань резонаторів при зміні діапазону контролю. ВМК густини здійснюється з використанням різноманітних конструкцій ТМР, для створення ВД контролю густини у складних умовах експлуатації;

– розроблено ВМК густини рідини або газу, що полягає у порівняння частот (періодів) автоколивань двох ПМР, які контактують з контрольованою речовиною, шляхом: контролю за різницею частот (періодів) автоколивань резонаторів, густини з заданою чутливістю; забезпечення однакових змін частот (періодів) автоколивань обох резонаторів від впливу температури, тиску; зменшення нелінійності характеристики перетворення; температури за отриманим значенням густини та частотами (періодами) резонаторів. ВМК густини здійснюється з використанням різноманітних конструкцій ПМР круглої форми, для створення ВД контролю густини в складних умовах експлуатації. ВМК густини може застосовуватися і для широко розповсюджених конструкцій ПМР, з закріпленням у центрі мембрани, додатковим чутливим елементом;

– розроблено ВМК густини рідини або газу, що полягає у порівняння частот (періодів) автоколивань двох ЦМР, які контактують з контрольованою речовиною, шляхом: контролю за різницею частот (періодів) автоколивань густини, з заданою чутливістю; забезпечення однакових змін частот (періодів) автоколивань обох циліндрів від впливу температури та тиску; контролю температури за отриманим значенням густини та частотами (періодами) окремих циліндрів. ВМК густини здійснюється з використанням будь-яких конструкцій ЦМР, при будь-якому способі закріплення кінців циліндрів (за умов довгих циліндрів), для створення ВД контролю густини в складних умовах експлуатації;

– розроблено ВМК контролю концентрації вузької фракції твердої фази суспензії оснований на порівнянні частот (періодів) автоколивань високочастотного та низькочастотного МР, які контактують з контрольованою суспензією, шляхом: контролю за різницею частот (періодів) автоколивань резонаторів концентрації вузької фракції твердої фази суспензії; забезпечення різних змін частот (періодів) автоколивань від впливу концентрації вузької фракції твердої фази суспензії та однакових змін від впливу густини рідкої фази.

ВМК контролю концентрації вузької фракції твердої фази суспензії здійснюється з використанням будь яких конструкції МР, для створення ВД концентрації вузької фракції твердої фази суспензії в умовах коливань густини рідкої фази;

- розроблено ВМК контролю положення межі розподілу рідин, або рідини і газу оснований на залежності частоти автоколивань трубчастого замкнутого камертона, заповненого системою контрольованих речовин різної густини, що не змішуються, від положення межі розподілу цих речовин відносно підстав камертона;

- вперше досліджено АКСМР для ВД контролю густини рідини або газу з використанням магнітоелектричної системи збудження коливань та ємнісної системи зняття коливань, і на основі аналізу результатів досліджень визначені похибки, що вносять такі системи у результати контролю густини рідини або газу;

- вперше досліджено АКСМР в якій виявляється суттєва нелінійності пружних властивостей МР, і на основі аналізу результатів досліджень визначені похибки контролю від цієї нелінійності та запропонувати метод її компенсації, що полягає у використанні у ВД двох МР з однаковим характером впливу нелінійності на частоту автоколивань. Така АКСМР застосовується для експрес контролю масової концентрації суспензій і пульпи з довгими ТМР;

- вперше досліджено АКСМР з параметричним контуром стабілізації амплітуди коливань МР, і на основі аналізу результатів досліджень визначені межі стійкості автоколивань. Така АКСМР застосовується для ВД положення межі розподілу рідин або рідини і газу з ТМР, що працює у широкому діапазоні зміни маси;

- вперше досліджено вплив характеристики ПЗЗ на похибки, які вносить АКСМР у результати контролю і на основі аналізу результатів досліджень синтезована характеристика ПЗЗ, що мінімізує похибки контролю. Такий ПЗЗ застосовується для всіх наведених АКСМР.

Практичне значення одержаних результатів роботи у нафтохімічній промисловості: Отримані математичні моделі ВД контролю та визначення складу рідких і газоподібних речовин впроваджені у розробках ВАТ „ДніпроВНПЕнергопром” та застосовані при впровадженні віброчастотного диференційного датчика контролю густини мазуту ДДГ-1 на насосній станції мазуту ВАТ „Куйбишевський НПЗ” (м. Самара). Результати дисертації були використані у навчальному процесі фізико-технічного факультету Дніпропетровського національного університету за спеціальністю 7.090903 – прилади і системи неруйнівного контролю, зокрема в курсах: "Фізичні основи неруйнівного контролю", "Прилади неруйнівного контролю", та при виконанні курсових і дипломних робіт на кафедрі радіоелектронної автоматики. У курсах лекцій, при викладанні дисциплін “Стандартизація та сертифікація продукції”; “Організація виробництва”; “Системи технологій” та при виконанні курсових робіт за спеціальністю “Економіка підприємства” на кафедрі економіки підприємства Дніпропетровського університету економіки та права.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційну роботу включено теоретичні положення і результати одержані здобувачем особисто: створені теоретичні та практичні основи ВМК які полягають у порівняння частот автоколивань двох

конструктивно подібних МР, що контактують з вимірювальною речовиною, та на їх базі розроблені ВД масової густини рідин та газів, положення межі розподілу рідин або рідини та газу, масової концентрації вузької фракції твердої фази суспензій, які забезпечують інваріантність до коливань температури, тиску вимірювальної речовини, густини рідкої фази суспензій або пульпи; розроблені АКСМР для усіх наведених ВД; розроблені методи обробки вихідних сигналів ВД, які дозволяють отримати додаткову інформацію про температуру контрольованої речовини.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на: The 11 th International Congress of Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation. CHISA 93 (Praha, Czech Republic, 1993); 1-й Міжнародній науково-практичній конференції “Наука: теорія та практика – 2006” (м. Дніпропетровськ, 2006 р.); 1-й Міжнародній науково-практичній конференції “Передові наукові розробки – 2006” (м. Дніпропетровськ, 2006 р.); 3-й Міжнародній науково-практичній конференції “Дни науки – 2007” (м. Дніпропетровськ, 2007 р.); 5-й Міжнародній науково-практичній конференції „ Наука и образование – 2007” (м. Дніпропетровськ, 2007 р.); 6-й Науково-технічній конференції “Приладобудування: стан і перспективи ” (м. Київ, 2007 р.); 10-й конференції “Неруйнівний контроль-2008” (м. Київ, 2008 р.).

Результати дисертаційної роботи надавалися і обговорювались на міжкафедральному науково-технічному семінарі “Космічна техніка та технології ” фізико-технічного інституту Дніпропетровського національного університету у (2005-2008 рр), на розширеному семінарі кафедри приладів і методів неруйнівного контролю Національного технічного університету „ Харківський політехнічний інститут ” (2007 р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 46 наукових публікаціях; серед них – 27 праць у фахових виданнях ВАК України; 12 авторських свідоцтв.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків та 4 додатків. Повний обсяг дисертації складає 330 сторінок, з них: 72 рисунки по тексту, 1 рисунок на 1 сторінці; 18 таблиць по тексту, 1 таблиця на 1 сторінці; 4 додатки на 23 сторінках; 270 найменувань використаних літературних джерел на 28 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано проблему, мету та основні задачі дисертаційної роботи, наведено дані про їх зв'язок з науковими програмами, викладено наукову новизну і практичне значення досліджень, особистий внесок здобувача, вказано відомості щодо апробації результатів дисертації, їх публікації та впровадження.

Використано накопичений в даному напрямку науки і техніки світовий досвід, в який зробили свій внесок багато вітчизняних шкіл під керівництвом: Гриневича Ф.Б., Орнатського П.П., Клеймана О.С., Скрипника Ю.О., Туза Ю.М., Маєвського С.М., Таранова С.Г., Циделка В.Д., Павленка Ю.Ф., Шарапова В.М., Ігуменцева Є.О., та науковці: Новицькій П.В., Кноррінг В.Г., Гутніков В.С., Еткін

Л.Г., Корабльов І.В., Кулаков М.В., Жуков Ю.П., Горенштейн І.О., Ківіліс С.С., Бромберг Е.М., Волгін Л.І., Куліковський К.Л., Гітіс Е.І., Земельман М.О., J. Ley, J. Stansfeld і багато інших.

У першому розділі виконано аналіз проблем застосування ВМК та визначення складу рідких та газоподібних речовин. Наведене місце досліджень здобувача у вирішенні проблем застосування ВМК речовин. Надані результати порівняльного аналізу існуючих методів контролю та визначення складу речовин за такими критеріями застосовності: властивості речовин; температура; тиск; динамічні впливи; наявність частотного вихідного сигналу. Розглянуті такі методи: радіоізотопний; віброчастотний; гідростатичний; оптичний; електропровідності; поплавковий; ультразвуковий; електричної ємкості; тепловий. За наведеними критеріями ВМК поступається лише радіоізотопному, що свідчить про актуальність подальшого дослідження та вдосконалення цього методу.

Запропонована класифікація ВМК густини: за типами резонаторів (трубчасті, пластинчасті, циліндричні); за схемами компенсації додаткових похибок (з додатковими датчиками температури і тиску та диференційним включенням двох резонаторів). Основними проблемами ВМК густини є: додаткові динамічні похибки від зміни температури та тиску контрольованої речовини; низька добротність коливальних систем МР; недосконалість АКСМР.

На основі наведеної класифікації та детального аналізу літературних та патентних джерел визначені такі напрямки удосконалення ВМК густини:

- найбільш придатною формою ТМР є форма замкнутого трубчастого камертона. Необхідно вирішити проблему компенсації повздовжніх коливань підстав камертону та керування власною частотою його коливань. Для ефективного застосування двох ТМР треба виконати дослідження додаткових похибок від впливу тиску та температури на моменти інерції еліптичних перетинів резонаторів;

- найбільш придатною формою ПМР є закріплена за периметром мембрана. Висока добротність такої конструкції забезпечується збільшенням частоти власних коливань мембрани. Необхідно розробити ВМК густини з використанням двох мембранних резонаторів, який забезпечить інваріантність густиноміра до температури та тиску. Це дозволить відокремити систему збудження коливань від контрольованого середовища, а відповідно розширити галузь застосування методу;

- найбільш придатною формою ЦМР є довгий циліндр, що має у місцях закріплення форму дзвону. Необхідно розробити ВМК густини з використанням двох проточних ЦМР, який забезпечить інваріантність ВД контролю густини до температури та тиску. Це дозволить відокремити систему збудження коливань від контрольованого середовища, а відповідно підвищити добротність коливальної системи унаслідок виключення демпфування коливань у зазорах між зовнішню поверхнею циліндра та системою збудження коливань.

Виконаний аналіз проблем застосування ВМК дисперсного складу суспензій з використанням гравітаційного осадження твердої фази у вертикальному трубчастому резонаторі, що здійснює малі згинаючі коливання на

власній частоті. Основними проблемами такого методу є циклічність і тривалість аналізу, додаткові похибки від зміни температури, густини та в'язкості рідкої фази.

Запропонована класифікація ВМК положення межі розподілу рідин або рідини і газу за типом механічного резонатора. Це метод суцільного одинарного камертону та метод трубчастого замкнутого камертону. Доведено, що метод трубчастого здвоєного камертону має суттєву перевагу, що полягає у збереженні високої добротності резонатора в усьому діапазоні контролю.

На основі наведеної класифікації та детального аналізу літературних і патентних джерел визначені такі напрямки удосконалення ВМК положення межі розподілу речовин:

- отримання аналітичної характеристики перетворення для основної моди коливань трубчастого здвоєного камертону;
- визначення умов максимальної чутливості та компенсації температурної похибки;
- розробка АКСМР із стабілізацією амплітуди коливань гілок трубчастого камертону.

Запропонована класифікація методів одночасного контролю густини та в'язкості рідин: метод контролю частоти та амплітуди коливань при постійній силі збудження; метод збудження двох незалежних видів коливань одного резонатора. Ці методи мають спільну проблему, що полягає у демпфуванні коливань резонатора в'язкими рідинами і як наслідок зменшення добротності резонатора, а відповідно обмеження застосування методу низько в'язкими рідинами. Необхідно розробити метод компенсації демпфування резонатора.

Основну похибку усіх розглянутих ВМК та визначення складу рідких та газоподібних речовин вносить АКСМР, яка перетворює власну частоту МР у частоту автоколивань. Проблемаю існуючих АКСМР для ВД контролю густини є відсутність теоретичних основ таких систем. Не визначено: вплив типу збудника та приймача коливань на похибку контролю; вплив вищих гармонік з виходу нелінійного ПЗЗ на частоту автоколивань; оптимальна характеристика ПЗЗ; структура і характер контуру параметричного регулювання амплітуди для ВД контролю з різкими змінами навантаження на резонатор.

На підставі викладеного сформовані основні завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі на основі дослідження взаємодії вібраційних полів МР (різних конструкцій, форм і мод коливань) з рідиною, системою рідина–тверде, двома рідинами різної густини або рідиною і газом, отримані такі математичні моделі: модель ВМК густини на основі порівняння частот(періодів) автоколивань двох МР (ТМР, ПМР, ЦМР); модель ВМК концентрації вузької фракції твердої фази систем рідина–тверде (суспензії пульпа) на основі порівняння частот (періодів) автоколивань високочастотного та низькочастотного МР; модель ВМК положення межі розподілу рідин або рідини і газу.

На основі математичних моделей розроблено метод обробки частот (періодів) автоколивань двох МР (різних конструкцій, форм і мод коливань), який

дозволяє контролювати густину рідин або газів та їх температуру, згідно зі співвідношеннями:

$$\Delta t = \frac{\left(1 - \frac{f_1}{f_{01}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho_P}{A}}\right) \cdot (A + \rho_P)}{2 \cdot \vartheta_1 \cdot (A + \gamma_1 \cdot \rho_P)} + \frac{\left(1 - \frac{f_2}{f_{02}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho_P}{B}}\right) \cdot (B + \rho_P)}{2 \cdot \vartheta_2 \cdot (B + \gamma_2 \cdot \rho_P)}, \quad (1)$$

$$f_D = f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_P}} \cdot \left(1 - \vartheta_1 \cdot \frac{A + \gamma_1 \cdot \rho_P}{A + \rho_P} \cdot \Delta t\right) - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_P}} \cdot \left(1 - \vartheta_2 \cdot \frac{B + \gamma_2 \cdot \rho_P}{B + \rho_P} \cdot \Delta t\right), \quad (2)$$

де Δt – відхилення температури рідини або газу від заданої при градуванні датчика; f_D – різниця частот (періодів) автоколиваний резонаторів; A, B – сталі резонаторів (залежать від типу резонатора, розраховуються теоретично та уточнюються експериментально); ρ_P – контрольована густина речовини; f_1, f_2, f_{01}, f_{02} – поточні та початкові частоти (періоди) автоколиваний резонаторів; $\gamma_2 = (\beta_{EB} + 2 \cdot \alpha_2 - \beta_V) / (\beta_{EB} - \alpha_2)$; $\gamma_1 = (\beta_{EA} + 2 \cdot \alpha_1 - \beta_V) / (\beta_{EA} - \alpha_1)$; $\vartheta_1 = 0,5 \cdot (\beta_{EA} - \alpha_1)$; $\vartheta_2 = 0,5 \cdot (\beta_{EB} - \alpha_2)$; α_1, α_2 – температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу резонаторів; β_{EB} – температурні коефіцієнти модуля пружності матеріалу резонаторів (залежать від конструкції резонатора та уточнюються експериментально); β_V – коефіцієнт об'ємного розширення контрольованої речовини.

Після підстановки співвідношення (1) у (2) за контрольованим значенням частот f_D, f_1, f_2 визначається густина ρ_P , а за співвідношенням (1) за f_1, f_2, ρ_P , температура.

На основі математичних моделей ВМК отримані умови компенсації впливу неінформативних параметрів на різницеву частоту автоколиваний МР. Наприклад, для ТМР еліптичної форми перетинів умови компенсації температурної складової похибки контролю мають вигляд

$$\frac{\rho_{TBA} \cdot L_{21}^4 \cdot \lambda_{12}^2 \cdot E_{AB} \cdot \varepsilon_{12} \cdot \vartheta_{12}^2 \cdot \left[(1 + \delta_{1a}) \cdot (1 + \delta_{1b})^3 - 1 \right]}{(1 + \delta_{2a}) \cdot (1 + \delta_{2b})^3 - 1} = \left[\frac{(1 + \delta_{1a}) \cdot (1 + \delta_{1b}) - 1 + \rho_A}{(1 + \delta_{2a}) \cdot (1 + \delta_{2b}) - 1 + \rho_B} \right]^3 \cdot \left[\frac{(1 + \delta_{2a}) \cdot (1 + \delta_{2b}) - 1 + \gamma_2 \cdot \rho_B}{(1 + \delta_{1a}) \cdot (1 + \delta_{1b}) - 1 + \gamma_1 \cdot \rho_A} \right]^2, \quad (3)$$

де $\rho_{TBA} = \rho_{TB} / \rho_{TA}$; $\lambda_{12} = \lambda_{i1} / \lambda_{i2}$; $L_{21} = L_2 / L_1$; $E_{AB} = E_A / E_B$; $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$; $\varepsilon_1 = b_{01} / a_{01}$; $\varepsilon_2 = b_{02} / a_{02}$; $\vartheta_{12} = \vartheta_1 / \vartheta_2$; $\delta_{1a} = \delta_1 / a_{01}$; $\delta_{1b} = \delta_1 / b_{01}$; $\delta_{2a} = \delta_2 / a_{02}$; $\delta_{2b} = \delta_2 / b_{02}$; $\rho_A = \rho_K / \rho_{TA}$; $\rho_B = \rho_K / \rho_{TB}$; ρ_{TB}, ρ_{TA} – щільності матеріалу резонаторів; $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}$ – сталі, що визначають моду коливаний резонаторів та умови закріплення кінців; L_1, L_2 – довжини резонаторів; E_A, E_B – модулі

пружності матеріалу резонаторів; δ_1, δ_2 – товщина стінок резонаторів; a_{01}, a_{02} – великі півосі еліпсів у перетинах резонаторів; b_{01}, b_{02} – малі півосі еліпсів у перетинах резонаторів; ρ_K – величина густини, при якій досягається повна компенсація температурної похибки.

Для ТМР співвідношення (3) є універсальним, тобто придатним для різних форм коливань трубки, ексцентриситетів перетинів, довжин та матеріалу резонаторів. Це забезпечує широкі можливості для конструювання ВД контролю густини.

Отримані умови безінерційної компенсації додаткової похибки від зміни тиску для ПМР та ЦМР. Отримані умови одночасної компенсації тиску та швидкості течії контрольованої речовини через ТМР. Наприклад умови безінерційної компенсації тиску для ВД контролю густини на основі двох ПМР мають вигляд

$$\frac{k_A^{11} \cdot k_h^2 \cdot E_A^3 \cdot \rho_{ПА} \cdot K_{РА}}{k_B^{11} \cdot E_B^3 \cdot \rho_{ПВ} \cdot K_{РВ}} = \frac{k_B \cdot k_{РВ}^{-1} + \rho_B}{k_A \cdot k_{РА}^{-1} + \rho_A}, \quad (4)$$

де $\rho_A = \rho_K / \rho_{ПА}$; $\rho_B = \rho_K / \rho_{ПВ}$; $k_A = h_1 / a_1$; $k_B = h_2 / a_2$; $k_h = h_1 / h_2$; $\rho_{ПА}, \rho_{ПВ}$ – щільності матеріалу пластин; h_1, h_2 – товщина пластин, a_1, a_2 – радіуси пластин; $K_{РА}, K_{РВ}$ – відносна товщина прошарків приєднаних до резонаторів мас речовини.

Використання співвідношення (4) разом із умовами температурної компенсації забезпечує повну інваріантність ВД контролю густини до коливань тиску та температури контрольованої речовини.

У ВД при відніманні частот або періодів автоколивань резонаторів результуюча чутливість знижується. Для підвищення чутливості здійснені дослідження залежності чутливості ТМР від матеріалу, товщини стінки, орієнтації перетину. Ці дослідження дозволили отримати наступні співвідношення для параметрів ТМР, що забезпечують його максимальну чутливість до контрольованої густини:

$$2 \cdot \chi^5 \cdot \xi_1^2 - 2 \cdot \chi^4 \cdot \xi_1 \cdot (\xi_1 - 1) + 4 \cdot \chi^3 \cdot \xi_1 \cdot (1 - \rho_A) - 3 \cdot \chi^2 \cdot (1 - \rho_A) \cdot (\xi_1 - 1) - 6 \cdot \chi \cdot \xi_1 + 3 \cdot (\xi_1 - 1) = 0, \quad (5)$$

$$2 \cdot \theta^5 + 2 \cdot \theta^4 \cdot (\xi_2 - 1) + 4 \cdot \theta^3 \cdot \xi_2 \cdot (1 - \rho_B) + 3 \cdot \theta^2 \cdot \xi_2 \cdot (1 - \rho_B) \cdot (\xi_2 - 1) - 6 \cdot \theta \cdot \xi_2 - 3 \cdot \xi_2 \cdot (\xi_2 - 1) = 0, \quad (6)$$

де $\xi_1 = a_{01} / b_{01}$; $\xi_2 = a_{02} / b_{02}$; $\chi = 1 + \delta_{1a}$; $\theta = 1 + \xi_2 \cdot \delta_{2a}$.

Співвідношення (5), (6) призначені для ТМР збудження малих згинаючих коливань яких здійснюються відповідно вздовж великої та малої осі еліптичного перетину. Вибір товщини стінки одного з резонаторів датчика згідно зі співвідношенням (5) або (6), а іншого на 15-20% більшою, дозволяє підвищити результуючу чутливість ВД контролю густини (рис. 1).

Рис. 1. Графіки залежності функцій чутливості $S_1(\chi)$, $S_2(\theta)$ металевих ТМР від безрозмірних параметрів χ , θ

Досліджено додаткову похибку пов'язану з впливом тиску на трубчасті резонатори еліптичної форми перетину. Отримані умови при яких зміна внутрішнього тиску у ТМР ВД густини не впливає на частоту автоколивань.

Для змінних умов експлуатації (діапазону контролю, діапазону змін температури та тиску) розроблений метод управління початковими частотами автоколивань резонаторів. Управління може здійснюватися як за допомогою вузлів зміни жорсткості, розташованих у центрах мас коливальних систем резонаторів, так і з використанням рухових перемичок для зміни активних довжин резонаторів. Визначені величини зусиль N_{KA}, N_{KB} , які повинні розвивати вузли зміни жорсткості для ТМР, ПМР, ЦМР. Наприклад, для трубчастих резонаторів зусилля визначаються із наступних рівнянь:

$$N_{KA} = \left[\frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{E_A \cdot J_A}{c_1 \cdot L_1^2} \cdot \frac{f_{02}^2}{f_{01}^2} \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{A + \rho_K}{B + \rho_K} - \frac{E_A \cdot J_A}{c_1 \cdot L_1^2}, \quad (7)$$

$$N_{KB} = \frac{E_B \cdot J_B}{c_2 \cdot L_2^2} - \left[\frac{\phi_A(\rho_K)}{\phi_B(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{E_B \cdot J_B}{c_2 \cdot L_2^2} \cdot \frac{f_{01}^2}{f_{02}^2} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K}, \quad (8)$$

де $\phi_B(\rho_K)$, $\phi_A(\rho_K)$ – коефіцієнти впливу на частоти коливань не інформативного параметра у середині діапазону контролю густини, які розраховуються теоретично та уточнюються експериментально; J_A , J_B – статичні моменти інерції розтинів трубчастих резонаторів; f_{01} , f_{02} – початкові частоти резонаторів без прикладання управляючих зусиль.

На підставі математичної моделі ВМК концентрації твердої фази суспензій була отримана характеристика перетворення ВД контролю на основі двох МР:

$$f_D = \frac{f_{01}}{n} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_p + \left(\theta_A - \frac{\rho_p}{\rho_T}\right) \cdot C}} - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_p + \left(\theta_B - \frac{\rho_p}{\rho_T}\right) \cdot C}}, \quad (9)$$

де f_{01} , f_{02} – початкові частоти високочастотного та низькочастотного резонаторів відповідно; ρ_T – щільність твердої фази; C – концентрація твердої фази;

$$\theta_A = \left(\left[\frac{\frac{2}{3} + \frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_1 \cdot \rho_p}}}{\frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_1 \cdot \rho_p}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_1 \cdot \rho_p}}\right)} \right]^2 + 1 \right)^{\frac{1}{2}} / \left(\left[\frac{\frac{4}{9} \cdot \left(\frac{\rho_T - C}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_T} + 0,5\right) + \frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_1 \cdot \rho_p}}}{\frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_1 \cdot \rho_p}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_1 \cdot \rho_p}}\right)} \right]^2 + 1 \right)^{\frac{1}{2}}$$

– відносна амплітуда коливань твердої фази у високочастотному резонаторі;

$$\theta_B = \left(\left[\frac{\frac{2}{3} + \frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_2 \cdot \rho_p}}}{\frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_2 \cdot \rho_p}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_2 \cdot \rho_p}}\right)} \right]^2 + 1 \right)^{\frac{1}{2}} / \left(\left[\frac{\frac{4}{9} \cdot \left(\frac{\rho_T - C}{\rho_c} + \frac{C}{\rho_T} + 0,5\right) + \frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_2 \cdot \rho_p}}}{\frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_2 \cdot \rho_p}} \cdot \left(1 + \frac{2}{\delta_T} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p}{\pi \cdot f_2 \cdot \rho_p}}\right)} \right]^2 + 1 \right)^{\frac{1}{2}}$$

– відносна амплітуда коливань твердої фази у низькочастотному резонаторі; δ_T – еквівалентний діаметр часток твердої фази; μ_p – в'язкість рідкої фази; ρ_c – густина суспензії; n – коефіцієнт ділення частоти високочастотного резонатора; f_1 , f_2 – поточні частоти резонаторів; A – стала, однакова для обох резонаторів.

Відносні амплітуди коливань θ_A , θ_B зменшуються як при зростанні частоти так і при зростанні еквівалентного діаметра твердих часток δ_T . Для заданого діапазону діаметрів ($0 \div \delta_{cp}$) у низькочастотному резонаторі забезпечуються умови $\theta_B \approx 1$. Перед відніманням частот резонаторів частоту високочастотного резонатора треба поділити на $n = f_{01} / f_{02}$. Враховуючи, що $[\rho_p + (\theta_A - \rho_p / \rho_T) \cdot C] / A \ll 1$, $[\rho_p + (1 - \rho_p / \rho_T) \cdot C] / A \ll 1$, характеристика (9) прийме вигляд

$$f_D = \frac{f_{02}}{2 \cdot A} \cdot C_\Phi, \quad (10)$$

де $C_\Phi = (1 - \theta_A) \cdot C$ – масова концентрація вузької фракції твердої фази.

Експрес-аналіз здійснюється у потоці суспензії спрямованому знизу до гори у двох вертикально встановлених ТМР. Вихідна частота такого датчика лінійно залежить від концентрації вузької фракції твердої фази. У різницевому сигналі компенсуються зміни густини та в'язкості рідкої фази. Можливості контролю масової концентрації фракцій твердої фази віброчастотним методом розширюється при використанні вузла зміни жорсткості резонаторів. Зміною частот МР сканують дисперсійний склад суспензій у реальному масштабі часу.

На підставі математичної моделі ВМК положення межі розподілу родин або рідини та газу отримані такі співвідношення.

Для зведеного трубчастого камертонного резонатора характеристика перетворення (при нормальних умовах) для основної моди коливань має вигляд:

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{A - B \cdot \phi(\xi)}}, \quad (11)$$

де f – частота основної моди власних коливань зведеного трубчастого камертона; h – положення межі розподілу рідин різної густини відносно місця закріплення гілок камертону; L – довжина гілок камертона; $\xi = h/L$ – відносне положення межі розподілу рідини у гілках; $\phi(\xi) = 1,5 \cdot \xi - \pi^{-1} \cdot \sin(\pi \cdot \xi) \cdot \cos(\pi \cdot \xi) \cdot [2,5 - \cos^2(\pi \cdot \xi)]$; ρ_T – щільність матеріалу камертона; ρ_{PD} , ρ_P – густина рідин, що заповнюють гілки камертона; F_T – площа перетину гілки камертона; F – площа проточного каналу гілки камертона; $A = 3 + 3 \cdot \rho_{PD} \cdot F / (\rho_T \cdot F_T)$, $B = 2 \cdot (\rho_{PD} - \rho_P) \cdot F / (\rho_T \cdot F_T)$ – сталі резонатора, які уточнюються експериментально; $f_0 = 2 \cdot \pi \cdot E^{0,5} \cdot J^{0,5} / (L^2 \cdot \rho_T^{0,5} \cdot F_T^{0,5})$ – початкова частота автоколивань камертона (уточнюється експериментально); E – модуль пружності матеріалу камертона; J – статичний момент інерції перетину гілки камертона.

Положення межі розподілу ξ_m , при якому досягається максимальна абсолютна чутливість $S = df / d\xi$, визначається з рівняння

$$0,75 \cdot B \cdot \phi(\xi_m) \cdot \sin(\pi \cdot \xi_m) + 2 \cdot \pi \cdot \cos(\pi \cdot \xi_m) \cdot [A - B \cdot \phi(\xi_m)] = 0. \quad (12)$$

Для послідовного включення двох зведених трубчастих камертонних резонаторів заповнених системою рідин різної густини характеристика перетворення (при нормальних умовах) має вигляд

$$f_D = \frac{f_0}{\sqrt{A - B \cdot \phi(\xi)}} - \frac{f_0}{\sqrt{A + B \cdot \phi(\xi)}}, \quad (13)$$

де f_D – різницева частота автоколивань МР.

Для рівнобіжного включення двох трубчастих зведених трубчастих камертонів заповнених системою рідин різної густини характеристика вимірювального перетворення (при нормальних умовах) має вид:

$$f_D = \frac{f_{01}}{\sqrt{A_1 - B_1 \cdot \phi(\xi)}} - \frac{f_{02}}{\sqrt{A_2 - B_2 \cdot \phi(\xi)}}, \quad (14)$$

де $A_1 = 3 + 3 \cdot \rho_{PD} \cdot F / (\rho_T \cdot F_{T1})$; $A_2 = 3 + 3 \cdot \rho_{PD} \cdot F / (\rho_T \cdot F_{T2})$; $B_1 = 2 \cdot (\rho_{PD} - \rho_P) \cdot F / (\rho_T \cdot F_{T1})$; $B_2 = 2 \cdot (\rho_{PD} - \rho_P) \cdot F / (\rho_T \cdot F_{T2})$ – сталі резонаторів (уточнюються експериментально); $f_{01} = 2 \cdot \pi \cdot E^{0,5} \cdot J_1^{0,5} / (L_1^2 \cdot \rho_T^{0,5} \cdot F_{T1}^{0,5})$, $f_{02} = 2 \cdot \pi \cdot E^{0,5} \cdot J_2^{0,5} / (L_2^2 \cdot \rho_T^{0,5} \cdot F_{T2}^{0,5})$ – початкові частоти автоколивань камертонів (уточнюються експериментально); F_{T1} , F_{T2} – площі

перетину гілок камертонів; J_1, J_2 – статичні моменти перетинів гілок камертонів; L_1, L_2 – приведені, до прямолінійних довжини гілок камертонів.

Умови компенсації додаткової температурної похибки ВД положення межі розподілу рідин або рідини та газу визначаються зі співвідношення

$$\frac{L_2^2}{L_1^2} \cdot \sqrt{\frac{n_1^4 - 1}{n_2^4 - 1}} \cdot \left[\frac{3 \cdot (n_2^2 + a - 1) - b \cdot \phi(\xi_K)}{3 \cdot (n_1^2 + a - 1) - b \cdot \phi(\xi_K)} \right]^{1,5} = \frac{n_2^2 - 1 - \gamma \cdot \left[3 \cdot (n_2^2 + a - 1) - b \cdot \phi(\xi_K) \right]}{n_1^2 - 1 - \gamma \cdot \left[3 \cdot (n_1^2 + a - 1) - b \cdot \phi(\xi_K) \right]}, \quad (15)$$

де $n_1 = D_1 / d$; $n_2 = D_2 / d$; $a = \rho_{PD} / \rho_T$; $b = 2 \cdot (\rho_{PD} - \rho_P) / \rho_T$; $\gamma = (\beta_E - 2 \cdot \alpha) / 9 \cdot \alpha$; D_1, D_2 – зовнішні діаметри гілок камертонів; d – внутрішній діаметр гілок; β_E – температурний коефіцієнт модуля пружності матеріалу камертонів; α – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу камертонів.

Співвідношення (11) ÷ (15) використовують не тільки для проектування інваріантних до динамічних змін температури та тиску датчиків межі розподілу рідин або рідни і газу. Ці співвідношення можуть використовуватися для проектування ПВП параметра у частоту коливань. Наприклад температури, при заповненні гілок камертонів системою термометричних рідин. Або тиску, використовуючи сильфони встановлені на трубчастих ніжках камертонів заповнених системою рідин, що не змішуються.

У третьому розділі приведені результати досліджень автогенераторів віброчастотних датчиків. Для дослідження застосовано метод приведення розподілених механічних параметрів трубчастих, пластинчастих та циліндричних резонаторів до зосереджених (табл. 1). У таблиці застосовані такі позначення: E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуассона; J – статичний момент інерції трубки; L – довжина трубки або циліндра; a – радіус пластини або радіус циліндра; h – товщина трубки або циліндра; m_T – маса одиниці довжини трубки; m_{II} – маса одиниці площі пластини; m_{II} – маса одиниці площі циліндра;

$$\lambda = 0,5 \cdot \pi^{-1} \cdot \sqrt{\left[\pi^2 + 4 \cdot (L/a)^2 \right]^2 + 12 \cdot \pi^4 \cdot (L/a)^4 \cdot (1 - \mu^2) / \left[(h/a)^2 \cdot \left(\pi^2 + 4 \cdot (L/a)^2 \right)^2 \right]}.$$

Таблиця 1

Приведені параметри МР

ТМР (закріплений обома кінцями)		ПМР (закріплений за периметром)		ЦМР	
Приведена жорсткість	Приведена маса	Приведена жорсткість	Приведена маса	Приведена жорсткість	Приведена маса
$\frac{192 \cdot E \cdot J}{L^3}$	$0,38 \cdot L \cdot m_T$	$\frac{4 \cdot \pi \cdot E \cdot h^3}{3 \cdot a^2 \cdot (1 - \mu^2)}$	$0,48 \cdot a \cdot m_{II}$	$\frac{7,4 \cdot E \cdot h^3}{a^2}$	$0,20 \cdot \frac{L^4}{a^2} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \cdot m_{II}$

Коефіцієнт механічного тертя r_e визначається за результатами експериментального виміру добротності зразків резонаторів зі співвідношення:

$$r_e = C_e / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot Q). \quad (16)$$

З використанням наведених параметрів і методу енергетичного балансу отримані передаточні функції МР, магнітоелектричного збудника коливань та ємнісного приймача коливань. Виконано аналіз АКСМР, отримані умови виникнення автоколивань, співвідношення для частоти і амплітуди, визначена похибка, яку вносить автоколивальна система у виміри. Магнітоелектрична система збудження коливань та ємнісна система зняття коливань спричиняють мінімальний вплив на резонатор та вносять меншу похибку у результати контролю ніж інші конфігурації систем збудження коливань.

Досліджено так звану „м'яку” нелінійність, коли частота коливань МР, при зростанні амплітуди, зменшується та „жорстку” нелінійністю, коли частота коливань МР при зростанні амплітуди, зростає. Методом гармонічної лінеаризації отримані характеристичні рівняння автоколивальної системи та співвідношення для амплітуди і частоти автоколивань. Виконано порівняльний аналіз похибок, які вносить кожний тип нелінійності у результати контролю. При обранні резонаторів ВД з однаковим характером нелінійності пружних властивостей похибка пов'язана з амплітудою коливань суттєво зменшується.

Отримана оптимальна характеристика нелінійного ПЗЗ, що забезпечує стабільну амплітуду автоколивань. Для роботи ВД в умовах різких змін маси резонаторів, наприклад, для широкого діапазону контролю густини або концентрації суспензій розроблено автоколивальну систему з параметричним контуром регулювання амплітуди. Визначені межі стійкості автоколивань у залежності від параметрів основного та параметричного контурів.

Для одноконтурної автоколивальної системи на рис. 2 прийняті такі позначення: F_3 – сила збудника коливань; $F_{НП}$ – нелінійна складова сили пружності резонатора; x_1 – переміщення резонатора; I_{ex} – струм або напруга на виході приймача, у залежності від типу приймача коливань; I_{eu} – струм або напруга на виході підсилювача у залежності від типу збудника коливань; $K_P \cdot W_P(p)$ – передаточна функція лінійної частини резонатора; $F_P(x_1)$ – функція перетворення нелінійної частини резонатора; K_p – статичний коефіцієнт передачі резонатора; $K_{II} \cdot W_{II}(p)$ – передаточна функція приймача коливань; K_{II} – статичний коефіцієнт передачі приймача, який залежить від типу приймача; $K_3 \cdot W_3(p)$ – передаточна функція збудника коливань; K_3 – статичний коефіцієнт передачі збудника, який залежить від типу збудника коливань; $F_{ПС}(x_2)$ – функція перетворення ПЗЗ; x_2 – проміжна координата системи.

Для зворотного зв'язку, що не інвертує та диференціює сигнал, частота ω першої форми коливань механічного резонатора визначається за співвідношеннями у залежності від характеру нелінійності його пружних властивостей. При „м'якому” характері нелінійності:

$$\omega = T_p^{-1} \cdot \sqrt{0,5 + 0,5 \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \alpha \cdot a_2^2 \cdot T_p^2 \cdot K_p \cdot K_{II}^{-2}}} . \quad (17)$$

Автоколивання з частотою згідно зі співвідношенням (17) існують при умові: $3 \cdot \alpha \cdot a_2^2 \cdot T_p^2 \cdot K_p \cdot K_{II}^{-2} \ll 1$. При “жорсткому” характеру нелінійності:

$$\omega = T_p^{-1} \cdot \sqrt{0,5 + 0,5 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \alpha \cdot a_2^2 \cdot T_p^2 \cdot K_p \cdot K_{II}^{-2}}} , \quad (18)$$

де $T_p = 1/\omega_p$ – період власних коливань резонатора; ω_p – кутова частота власних коливань резонатора; α – коефіцієнт функції перетворення, $F_p(x_1) = \alpha \cdot x_1^3$ нелінійної частини резонатора; a_2 - амплітуда автоколивань.

Рис. 2. Структурна схема одноконтурної системи самозбудження механічного резонатора з нелінійністю, “+” – “м’якого”, “-” – “жорсткого” типів

Для зворотного зв’язку, що інвертує та інтегрує сигнал, частота ω автоколивань визначається співвідношеннями у залежності від характеру нелінійності пружних властивостей резонатора. При „м’якому” характері нелінійності та встановленні інтегруючого фазозсувального фільтра після ПЗЗ:

$$\omega = T_p^{-1} \cdot \sqrt{1 - 0,75 \cdot K_p \cdot \alpha \cdot a_2^2 \cdot K_{II}^{-1}} . \quad (19)$$

Автоколивання з частотою згідно зі співвідношенням (19) існують при умові $0,75 \cdot K_p \cdot \alpha \cdot a_2^2 \cdot K_{II}^{-1} \ll 1$. При „жорсткому” характеру нелінійності та встановленні інтегруючого фазозсувального фільтра після ПЗЗ:

$$\omega = T_p^{-1} \cdot \sqrt{1 + 0,75 \cdot K_p \cdot \alpha \cdot a_2^2 \cdot K_{II}^{-1}} . \quad (20)$$

Використовуючи співвідношення для чутливості резонатора до контрольованої густини $s = d\omega/d\rho = -0,5 \cdot A \cdot \omega_0 / (1 + A \cdot \rho)$, а також наближеність частоти автоколивань резонатора із рідиною до частоти його власних коливань $\omega \approx \omega_p$, отримана абсолютна похибка контролю густини Δ_p^A у залежності від відносної зміни амплітуди автоколивань δ_A , з урахуванням співвідношень (17), (18) у вигляді

$$\Delta_{\rho}^A = \frac{\delta_{\omega} \cdot \omega}{s} = \mp \frac{1,5 \cdot (A^{-1} + \rho) \cdot \alpha \cdot K_P \cdot K_{II}^{-2} \cdot \omega_P^{-4} \cdot a_2^2}{\sqrt{1 \mp 3 \cdot \alpha \cdot K_P \cdot K_{II}^{-2} \cdot \omega_P^{-2} \cdot a_2^2}} \cdot \delta_A, \quad (21)$$

де $\delta_{\omega} = |\Delta\omega/\omega|$, $\delta_A = |\Delta a_2/a|_2$; A – стала резонатора, яка дорівнює відношенню масі одиниці довжини до площі проточного каналу резонатора.

На підставі співвідношень (19), (20) залежність абсолютної похибки контролю (Δ_{ρ}^A) густини від відносної зміни δ_A амплітуди автоколивань має вигляд:

$$\Delta_{\rho}^A = \frac{\delta_{\omega} \cdot \omega}{s} = \mp 1,5 \cdot (A^{-1} + \rho) \cdot \alpha \cdot K_P \cdot K_{II}^{-1} \cdot a_2^2 \cdot \delta_A. \quad (22)$$

Аналіз отриманих співвідношень доводить, що похибки від неізохронності є адитивними. Характер нелінійності резонатора визначається експериментально, після його виготовлення. При однаковому характері нелінійності обох резонаторів похибка пов'язана із явищем неізохронності може буди повністю компенсована у ВД при відніманні частот автоколивань резонаторів.

Для розглянутих одноконтурних автогенераторів синтезована оптимальна характеристика нелінійного підсилювача (рис. 3), яка у порівнянні із характеристикою типу „насичення” забезпечує на порядок меншу нестабільність амплітуди автоколивань δ_A , а згідно з (21), (22) і похибку контролю густини.

Рис. 3. Оптимальна характеристика нелінійного підсилювача

Для наведеної характеристики визначено коефіцієнт гармонічної лінеаризації $q_0(a)$

$$q_0(a) = 2 \cdot \pi^{-1} \cdot \left[\arcsin(\mu^{-1}) - \mu^{-1} \cdot (1 - \mu^{-2})^{0,5} \right], \quad (23)$$

де $\mu = a/b$.

На підставі (23) визначена нестабільність амплітуди автоколивань $\Delta a/a$, при відносних змінах частоти коливань $\Delta\omega_p/\omega_p$ резонатора та відносних змінах коефіцієнта передачі системи $\Delta K/K$:

$$\Delta a/a = 0,5 \cdot \pi \cdot \xi \cdot K^{-1} \cdot T_p \cdot \mu^3 \cdot (1 - \mu^{-2})^{0,5} \cdot (\Delta\omega_p/\omega_p), \quad (24)$$

$$\Delta a/a = 0,5 \cdot \pi \cdot \xi \cdot K^{-1} \cdot T_p \cdot \mu^3 \cdot (1 - \mu^{-2})^{0,5} \cdot (\Delta K/K), \quad (25)$$

де ξ – коефіцієнт затування коливань МР.

Визначені похибки від впливу вищих гармонік на виході нелінійного ПЗЗ на частоту автоколивань:

– для зворотного зв'язку, що не інвертує та диференціює сигнал

$$\delta\omega = (\omega_p - \omega) / \omega_p = \pi^{-2} \cdot Q^{-2} \cdot \mu^{-2} \cdot (1 - \mu^{-2})^3 \cdot (K / K_{\min})^2; \quad (26)$$

– для зворотного зв'язку, що інвертує та інтегрує сигнал

$$\delta\omega = (\omega_p - \omega) / \omega_p = 0,11 \cdot \pi^{-2} \cdot Q^{-2} \cdot \mu^{-2} \cdot (1 - \mu^{-2})^3 \cdot (K / K_{\min})^2, \quad (27)$$

де Q – добротність коливальної системи резонатора; K_{\min} – мінімальний значення коефіцієнта передачі системи.

Похибка від впливу вищих гармонік, яку вносить у контроль густини автоколивальна система при інвертуванні та інтегрування сигналу ланцюгом зворотного зв'язку у дев'ять разів менша за похибку при не інвертуванні та диференціюванні сигналу ланцюгом зворотного зв'язку. Наведена на рис. 3 характеристика може бути реалізована із використанням у якості приймача коливань магніточутливих ключових елементів, які комутують блок живлення збудника коливань.

Для умов експлуатації з різкими змінами маси резонатора розроблений двоконтурний автогенератор з параметричним контуром регулювання амплітуди коливань резонатора (рис. 4). На рис. 4 прийняті наступні позначення: $K_{ПС1}$, $K_{ПС2}$ – коефіцієнти підсилення підсилювачів основного та параметричного контурів; F_B – нелінійна функція випрямляча; x_B – вихідний сигнал випрямляча;

$K_{\Phi 3} \cdot W_{\Phi 3}(p) = \frac{K_{\Phi 3}}{(T_{1\Phi 3} \cdot p + 1) \cdot (T_{2\Phi 3} \cdot p + 1)}$ – передаточна функція згладжуючого

фільтра, як аперіодичної ланки першого порядку; E_0 – опорний рівень стабілізації амплітуди коливань або амплітуди струму; X, Y, Z – координати системи управління, пов'язані між собою диференціальними рівняннями;

$K_{TP} \cdot W_{TP}(p) = \frac{K_{TP} \cdot p}{(T_{1TP} \cdot p + 1) \cdot (T_{2TP} \cdot p + 1)} \approx \frac{K_{TP}}{T_{1TP}} = K_{TP}^-$ – передатна функція

трансформатора погодження з магнітоелектричною системою збудження коливань; $T_{1\Phi 3}, T_{2\Phi 3}$ – постійні часу згладжуючого фільтра; T_{1TP}, T_{2TP} – постійні часу трансформатора.

Введення параметричного контура дозволяє отримати у основному контурі практично синусоїдальні коливання, що забезпечує роботу основного контуру на лінійній ділянці. При цьому зменшується нестабільність частоти вихідного сигналу, тому що зміна ступеня насичення підсилювача, при зміні амплітуди, призводить до фазових зсувів.

Для визначення параметрів стаціонарних автоколивань було застосовано метод роздільної гармонічної лінеаризації. Лінеаризація основного контура здійснювалася за першою гармонікою коливань, а лінеаризація нелінійних рівнянь параметричного контура здійснювалася за постійною складовою – нульовою гармонікою.

Рис. 4. Структурна схема АКСМР з параметричним контуром регулювання амплітуди коливань резонатора

З використанням передаточних функцій основного контура, отримано наступні умови забезпечення стійкості автоколивань за амплітудою:

$$T_{2\phi 3} < \frac{T_{1\phi 3} \cdot \left[T - \tau \cdot \left(K_{CVM}^- - 1 \right) \right]}{T_{1\phi 3} \cdot \left(K_{CVM}^- - 1 \right) - \left[T - \tau \cdot \left(K_{CVM}^- - 1 \right) \right]}, \quad (28)$$

де $T = (\xi \cdot \omega_p)^{-1}$; $\tau = \frac{\xi^2}{Y} \cdot T$; $K_{CVM}^- = K_{OK}^- \cdot E_0$, K_{OK}^- – узагальнений коефіцієнт передачі основного контура.

На рис. 5 у логарифмічному масштабі показано межу стійкості автоколивань по амплітуді відносно параметрів $T_{1\phi 3}, T_{2\phi 3}$.

Рис. 5. Межа стійкості автоколивань за амплітудою для АКСМР з параметричним контуром регулювання амплітуди

Хрестиками позначені експериментально отримані значення параметрів $T_{1\phi3}, T_{2\phi3}$, для стійких за амплітудою автоколивань, точками експериментально отримані значення параметрів $T_{1\phi3}, T_{2\phi3}$, для нестійких за амплітудою автоколивань. Межа розрахована теоретично.

У четвертому розділі наводиться методика проектування оптимальних ВД складу та властивостей речовин, яка дозволяє проектувати датчики, що забезпечують одночасну компенсацію декількох додаткових похибок контролю. Для ВД контролю густини на основі двох ТМР знайдені та експериментально перевірені умови компенсації температурної похибки та похибок від зміни тиску і швидкості течії рідини через датчик. Отримані умови забезпечення максимальної чутливості, компенсації температурної похибки та похибки лінійності. Розроблено метод розрахунку високочастотних ВД густини, на основі двох ПМР, що забезпечує інваріантність до коливань температури і тиску контрольованого середовища. Розроблено метод розрахунку ВД з двома ЦМР та експрес аналізатора концентрації суспензій. При розробці конструкції резонаторів ВД контролю застосовано принцип камертона. Наведена схема ПВП частотного сигналу, яка дозволяє підвищити точність контролю шляхом виділення інформативної складової вихідного частотного сигналу та її подальшого помноження на сталу величину.

Датчики густини рідини будувалися на основі одного резонатора, тому критерієм оптимальності ВД з двома резонаторами є відношення похибки контролю датчика на основі одиночного резонатора до похибки датчика з двома резонаторами. Розроблений підхід до аналізу складових похибок контролю густини та параметрів які залежать від густини, передбачає визначення коефіцієнтів впливу ($\varphi_{iA}, \varphi_{iB}$) неінформативних (n) параметрів на частоти автоколивань складових резонаторів та різницевого частотного сигналу ВД (φ_{iD}). Згідно з таким підходом критерій оптимальності ВД матиме вигляд:

$$K_{\text{опт}} = \sum_{i=1}^n \frac{\min(\varphi_{iA}, \varphi_{iB})}{\max(\varphi_{iD})}. \quad (29)$$

Розробка оптимального ВД густини або величин, що пов'язані із густиною включає такі етапи:

- перший етап – визначення вимог до конструктивних, метрологічних та експлуатаційних показників датчика;
- другий етап – визначення конструктивних параметрів резонаторів які забезпечують максимальну величину $K_{\text{опт}}$ при завданих умовах експлуатації. На цьому етапі здійснюється вибір типу та конструкції резонаторів, структурних схем автоколивальної системи та проміжного вимірювального перетворювача частот резонаторів;
- третій етап – виготовлення випробного зразка датчика, експериментальне визначення параметрів f_{01}, f_{02}, A, B , та температурного коефіцієнта модуля пружності β_E матеріалу резонаторів. Додатково експериментально визначаються:

для заглибних датчиків з пластинчастими і для проточних з циліндричними резонаторами відносні товщини прошарків приєднаної речовини K_{PA}, K_{PB} ; для експрес аналізатора концентрації суспензій відносні амплітуди коливань θ_A, θ_B твердих часток; для датчика положення межі розподілу рідин чутливість у точці ξ_m . Здійснюється перевірка коефіцієнтів впливу температури, тиску швидкості течії на вихідний частотний сигнал, та визначення значення густини ρ_K для повної компенсації похибок від впливу не інформативних параметрів.

Наприклад, умови інваріантності до коливань температури та тиску вимірювальної речовини для ВД на основі двох ПМР мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{k_A}{k_B} \right)^8 \cdot \left(\frac{E_A}{E_B} \right)^2 \cdot \left(\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} \right) &= \left(\frac{k_A \cdot K_{PA}^{-1} + \rho_A}{k_B \cdot K_{PB}^{-1} + \rho_B} \right) \cdot \left(\frac{k_B \cdot K_{PB}^{-1} + \gamma_2 \cdot \rho_B}{k_A \cdot K_{PA}^{-1} + \gamma_1 \cdot \rho_A} \right), \\ k_h &= \sqrt{\left(\frac{k_B}{k_A} \right)^{11} \cdot \left(\frac{E_B}{E_A} \right)^3 \cdot \frac{K_{PB}}{K_{PA}} \cdot \frac{\rho_{PB}}{\rho_{PA}} \cdot \left(\frac{k_B \cdot K_{PB}^{-1} + \rho_B}{k_A \cdot K_{PA}^{-1} + \rho_A} \right)} \end{aligned} \right\}. \quad (30)$$

Розрахований за співвідношенням (30) ВД на основі двох ПМР мав наступні експериментально уточнені параметри: $f_{01} = 1600,2128 \text{ Гц}$; $f_{02} = 681,9824 \text{ Гц}$; $A = 880,7812 \text{ кг/м}^3$; $B = 818,5612 \text{ кг/м}^3$. Тиск рідини збільшувався до $p = 0,5 \text{ МПа}$. Похибки резонаторів визначені за відносною зміною частот склали $\psi_A = 3 \cdot 10^{-4}$, $\psi_B = 7 \cdot 10^{-4}$, а похибка датчика (рис. 6) змінювалася в межах від $-3 \cdot 10^{-7}$ до $+3 \cdot 10^{-7}$, що на три порядки менше ніж з одним резонатором.

Рис. 6 Розподіл відносної зміни частоти ВД вздовж діапазону виміру густини, при стрибкоподібному підвищенні тиску рідини

Після стрибка тиску автоколивання резонаторів виходять на стаціонарний режим через десять періодів коливань, що становить 6 мс і 14 мс, відповідно.

При зміні температури рідини в межах $t = 20 \div 60^\circ \text{C}$ температурна похибка (рис. 7) на краях діапазону виміру, де вона максимальна, становить $\phi_D = 3 \cdot 10^{-6}$.

Рис. 7 Розподіл значень температурних коефіцієнтів частоти вздовж діапазону виміру густини: 1 – датчика; 2, 3 – складових резонаторів

Мінімальне значення для резонатора $\varphi_A = 4 \cdot 10^{-5}$, що на порядок більше, ніж у датчика. Після стрибка температури автоколивання резонаторів виходять на стаціонарний режим через п'ятнадцять періодів коливань, що становить 150 мс і 220 мс, відповідно. Таким чином розроблені ВМК дозволяють створювати ВД густини, концентрації суспензій, положення межі розподілу рідин або рідини і газу інваріантні до коливань температури, тиску, густини та в'язкості суспензій, що розширює галузі застосування ВМК та визначення складу речовин.

У п'ятому розділі приводиться методика використання ВД контролю на основі двох МР у складі автоматизованих систем контролю або інформаційно-вимірювальних систем (ІВС). Розроблені структурні схеми ІВС, здійснено структурний аналіз похибок виміру. Наведена структура ІВС для виміру масових витрат рідин. Розроблено метод градування та перевірки поточних ВД густини. Для аналізу впливу на похибку контролю густини усієї сукупності неінформативних параметрів розроблені регресійні моделі для оцінювання сумарної похибки ВД контролю густини в умовах експлуатації. Розроблена система параметричної стабілізації демпфування МР типу „коливальна гантель” для одночасного контролю густини та в'язкості рідин.

Регресійної моделі оцінювання похибки ВД контролю густини в умовах експлуатації побудована методом пасивного експерименту. Здійснено співставлення абсолютних похибок диференційного датчика густини (ДДГ-1) розрахованого за наведеним методом, з умов компенсації впливу температури, тиску, швидкості течії рідини та серійно виготовленого датчика густиноміра АІП-1 (НДПІ „Нефтехимавтомат” Азербайджан г. Баку) з додатковими датчиками температури на вході та виході рідини з датчика.

Для побудови регресійної моделі використовувалися такі змінні, що фіксувалися стандартними вимірювальними засобами:

1. Фактична густина рідини ρ [кг/м³], на вході у датчик, що визначалася лабораторним аналізом відібраної проби диференційним пікнометричним методом з точністю на пів порядку вищою за точність густиномірів;

2. Швидкість зміни густини $v_\rho = [\rho_{\tau_i} - \rho_{\tau_{i-1}}] / (\tau_i - \tau_{i-1})$ [кг/м³/хв]

розраховувалася за період часу $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ [хв] між вимірами густини;

3. Температура t [°C] рідини у датчику вимірювалася з використанням ртутних термометрів П-2, як середнє значення на вході і виході з датчика;

4. Швидкість зміни температури $v_t = [t_{\tau_i} - t_{\tau_{i-1}}] / (\tau_i - \tau_{i-1})$ [°C/хв]

розраховувалася за період часу $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ [хв] між вимірами температури;

5. Вимірювальна густина ρ^* [кг/м³] визначалася за характеристиками градування густиномірів на підставі результатів виміру частот коливань ДДГ (f_D [Гц]) та АИП-1 (f [Гц]) цифровим частотоміром ЧЗ-35А у режимі середнього значення 1000 періодів коливань T_{cp} [с]. Для АИП-1 у значення частоти f [Гц] вводилися поправки на температуру та тиску згідно з паспортом на прилад. У різницевому сигналі ДДГ-1 (f_D [Гц]) вплив температури, тиску, швидкості течії рідини корегувався автоматично;

6. Тиск p [МПа] рідини вимірювався уніфікованим сильфонним манометром МС-Є2 моделі 9524 з класом точності 0,6 та діапазоном 0-2,5 МПа;

7. Швидкість зміни тиску $v_p = [p_{\tau_i} - p_{\tau_{i-1}}] / (\tau_i - \tau_{i-1})$ [МПа/хв], визначалась за період часу $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ [хв] між вимірами;

8. Швидкість течії рідини v [м/с] через датчик розраховувалася на підставі результатів виміру об'ємних витрат Q турбінним водоміром ВВГ-50 з діапазоном 1,5÷30 м³/год, за формулою $v = Q / (F \cdot 3600)$ [м/с], де F [м²] площа проточного каналу резонаторів.

Абсолютна похибка з урахуванням знаку розраховувалася за формулою $\delta = \rho - \rho^*$ [кг/м³]. Прийнята лінійна форма зв'язку між похибкою вимірів та факторами, що на неї впливають:

$$\delta = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot v_t + a_3 \cdot \rho + a_4 \cdot v_\rho + a_5 \cdot p + a_6 \cdot v_p + a_7 \cdot v. \quad (31)$$

Вплив факторів на результуючу похибку визначається коефіцієнтами детермінації d_i .

$$d_i = \alpha_i \cdot r_{i\delta}, \quad (32)$$

де α_i – коефіцієнт стандартизованої регресії; $r_{i\delta}$ – коефіцієнт кореляції i фактора з похибкою виміру δ .

За величинами коефіцієнтів d_2, d_6 можна судити про динамічні властивості схем компенсації температури та тиску. Коефіцієнт d_3 визначає вплив мультиплікативної похибки, що виникає від нестабільності коефіцієнтів передачі проміжного вимірювального перетворювача (ПВП). Коефіцієнт d_4 визначає динамічні властивості ВД контролю густини відносно контрольованої густини. Прямий вплив температури, тиску та швидкості течії рідини через датчик визначається коефіцієнтами d_1, d_5, d_7 відповідно. Перевірка факторів за критерієм значущості здійснювалася відповідно критерію Стьюдента. Перевірка показала, що в обох статистичних моделях для ДДГ-1 та АИП-1 усі фактори значущі. Виконано аналіз більш 60 варіантів регресійних моделей для наведених

датчиків густиномірів. При цьому за суттєво більшим коефіцієнтом множинної кореляції були відібрані ті моделі, які найбільш адекватно відображають залежність абсолютної похибки виміру від факторів впливу. Рівняння регресії для абсолютних похибок АИП-1 та ДДГ-1 і коефіцієнти детермінації свідчить, що на похибку АИП-1 найбільший вплив спричиняє температура t , тиск p , швидкість зміни температури v_t та тиску v_p .

Таблиця 2

Регресійні моделі віброчастотних густиномірів

Тип датчик а	Рівняння регресії	Коефіцієнти детермінації $d_i \cdot 10^2$.						
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7
АИП-1	$\delta = -1,03999 + 0,0056 \cdot t + 2,5207 \cdot v_t + 0,0014 \cdot p - 0,0031 \cdot v_p - 0,2249 \cdot p + 1,3720 \cdot v_p - 0,0582 \cdot v$	1,19	99,78	-0,15	0,32	-1,60	0,59	-0,16
ДДГ-1	$\delta = -2,8730 - 5,51 \cdot 10^{-4} \cdot t - 4,65 \cdot 10^{-3} \cdot v_t + 3,83 \cdot 10^{-3} \cdot p - 0,0286 \cdot v_p + 0,0635 \cdot p - 0,0473 \cdot v_p - 0,3262 \cdot v$	-3,32	-3,60	-44,73	16,59	19,57	-2,51	-31,63

На похибку ДДГ-1 найбільший вплив спричиняє сама густина ρ та швидкість v_p її зміни. Це пояснюється залежністю додаткових похибок від густини і може бути ліквідовано використання спеціальних методів обробки сигналів резонаторів. Абсолютна похибка ДДГ-1 у статичному режимі на порядок менше за АИП-1, а у динамічному при зміні температури та тиску майже на два порядки менша за похибку АИП-1.

Використання наведеного методу побудови регресійної моделі в реальних умовах експлуатації дозволяє не тільки оцінити достовірність отриманої інформації але і визначити шляхи подальшого удосконалення ВД контролю складу і властивостей речовин.

Особливості побудови ІВС з використанням ВД контролю складу і властивостей речовин полягають у розподілу функцій компенсації похибок та обробки частотного сигналу між датчиком та обчислювальним пристроєм (рис. 8).

Точність контролю досягається у різницевому частотному сигналі f_D , шляхом зменшення адитивних систематичних і вірогідних похибок. Не зворотні втрати вимірювальної інформації зменшуються у ПВП, шляхом віднімання сталої частини різницевої частоти резонаторів і множення результату для передачі у канал зв'язку (КЗ).

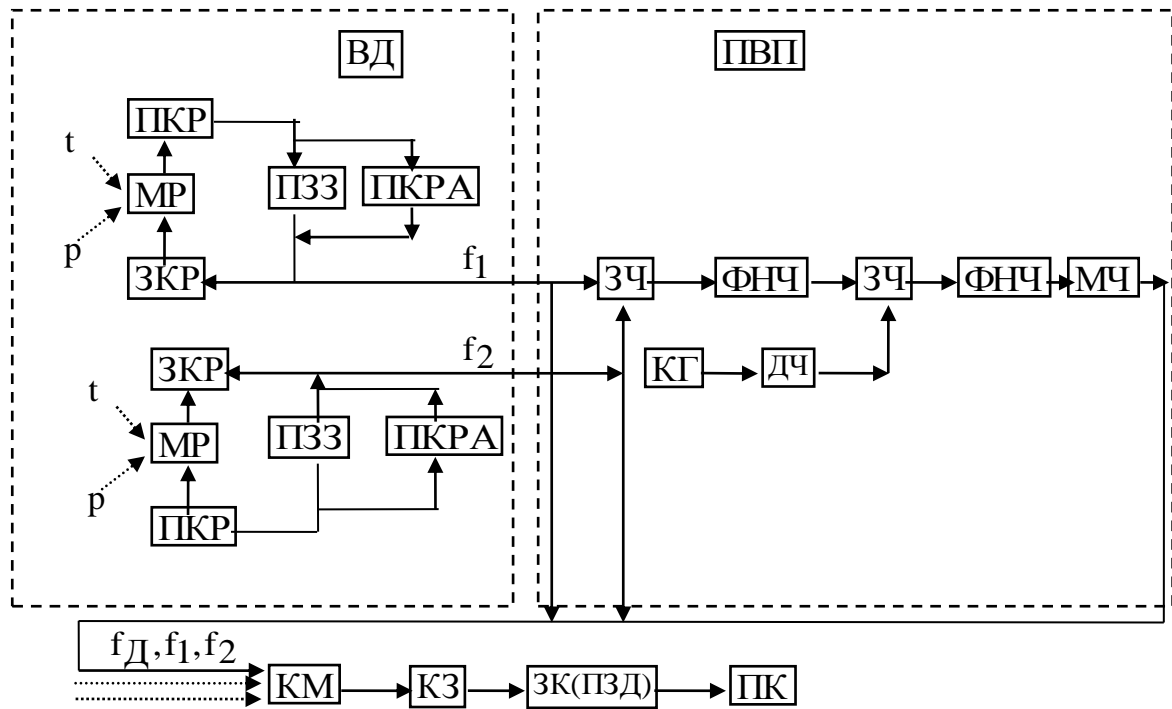


Рис. 8 Структурна схема ІВС з ВД на основі двох МР

Вимірювальний канал ІВС працює наступним чином. МР приводяться у режим автоколивань за допомогою приймачів (ПКР) та збудників (ЗКР) коливань підключених до підсилювачів (ПЗЗ) з параметричними контурами регулювання амплітуди коливань (ПКРА). Частоти автоколивань f_1, f_2 , залежать від контрольованого параметра та знаходяться під впливом основних неінформативних параметрів таких як температури (t) та тиску (p). Ці похибки є систематичними, вони компенсуються у різницевому частотному сигналі завдяки обранню параметрів резонаторів. На резонатори також діють і випадкові параметри, це напруга живлення, струси та вібрації обладнання, зміна пружних властивостей матеріалу та інші. Ці параметри спричиняють адитивні випадкові похибки, які завдяки спільним системам живлення, спільним підставам, однаковим конструктивним формам резонаторів жорстко корельовано між резонаторами. Це дозволяє подавити випадкові адитивні похибки частково або повністю при відніманні частот резонаторів.

У проміжному вимірювальному перетворювачі (ПВП) за допомогою першого змішувача (ЗЧ) і першого фільтра низької частоти (ФНЧ) формується різницева частота резонаторів. Для усунення постійної складової різницевої частоти застосовано кварцовий генератор (КГ) з дільником частоти (ДЧ) та другий фільтр низької частоти (НЧФ). Дивіація різницевого частотного сигналу збільшується множителем частоти (МЧ). Значення параметрів f_{01}, f_{02}, A, B , що занесені у пам'ять (ПК) періодично поновлюються при калібруванні каналів ІВС. Через комутатор (КМ) інформаційна частина різницевого частотно-модульованого сигналу датчика потрапляє у канал зв'язку (КЗ). У каналі зв'язку здійснюється стискання вимірювальної інформації та зворотне її перетворення перед потраплянням на багатоканальну плату збирання даних (ПСД) або звукові

картки (ЗК) персонального комп'ютера (ПК). Після перетворення у цифровий код інформація потрапляє у персональний комп'ютер (ПК) або спеціалізований обчислювальний пристрій.

Структурна схема наведена на рис. 8, призначена для роботи з ВД контролю, що розраховані на завдані діапазони виміру. З урахуванням можливості управління відношенням початкових частот МР на персональний комп'ютер (ПК) або спеціалізований обчислювальний пристрій покладена додаткова функція управління частотами (рис. 9).

Робота ІВС аналогічна розглянутій на рис. 8, за винятком забезпечення виконання умов компенсації похибок при зміні діапазону виміру. Введені вузли зміни жорсткості (ВЗЖ). Жорсткість МР може змінюватися як за допомогою пропорційного електромагнітного перетворювача сили так і зміною активних довжин за допомогою пропорційного перетворювача переміщень. Ці перетворювачі керуються у кроковому режимі послідовним кодом. Тому введені додаткові канали зв'язку та цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Можливе і використання звукових карток (ЗК), але це потребує додаткової плати погодження з пропорційним перетворювачем. При управлінні початковими частотами резонаторів проміжок часу між калібруванням каналів зменшується. Початкові дані (ВЗЖ) для кожного датчика зберігаються у пам'яті обчислювального пристрою весь цикл виміру. Така схема дуже ефективна при роботі у циклічному режимі за запитом.

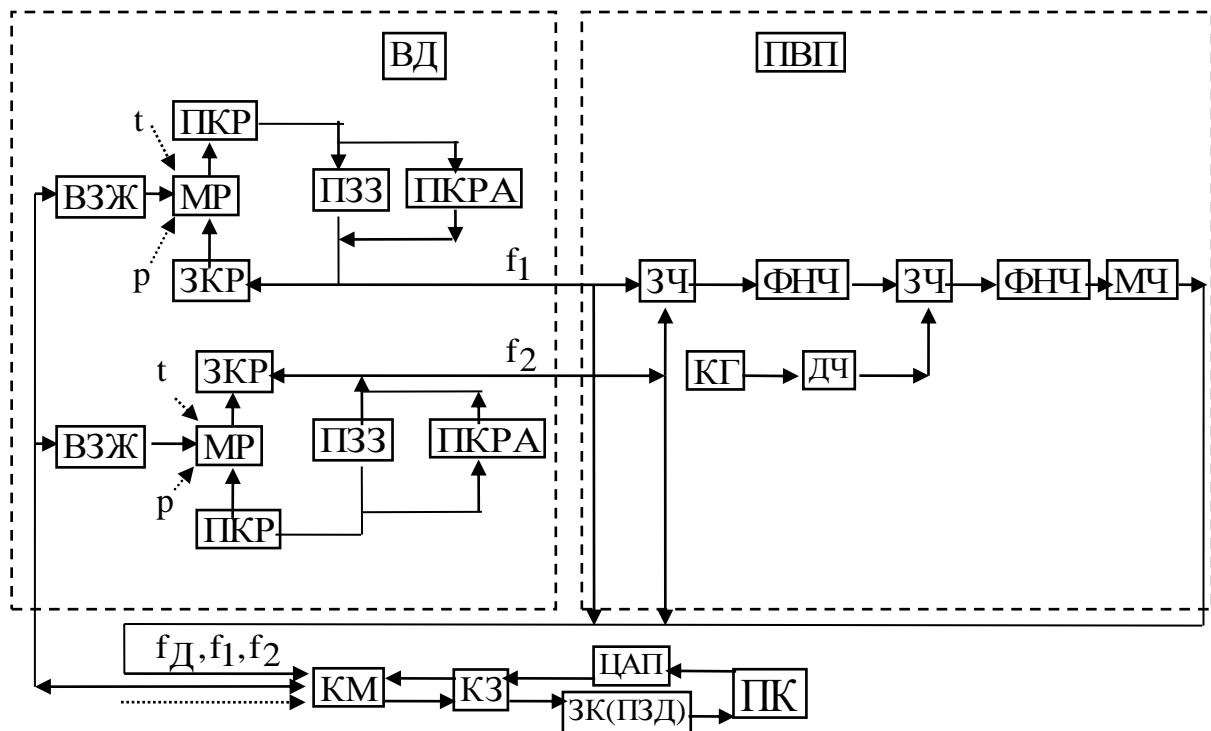


Рис. 9 Структурна схема ІВС на основі ВД з управлінням початковими частотами МР

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено науково – прикладну проблему розширення галузі застосування ВМК і визначення складу і властивостей рідких і газоподібних речовин на контроль густини рідин і газів, концентрації вузької фракції твердої фази суспензій, положення межі розподілу рідин або рідини і газу в умовах коливань температури, тиску контрольованого середовища, густини рідкої фази суспензій.

1. Удосконалено ВМК густини рідини, що полягає у порівняння частот (періодів) автоколивань двох ТМР, через які протікає контрольована речовина, шляхом: контролю, за різницею частот (періодів) автоколивань резонаторів, густини з максимальною чутливістю; забезпечення однакових змін частот (періодів) автоколивань обох резонаторів від впливу температури, тиску, швидкості течії рідини через резонатори; зменшення нелінійності характеристики перетворення; контролю температури за отриманим значенням густини та частотами (періодами) резонаторів; управління відношенням частот автоколивань резонаторів при зміні діапазону контролю. ВМК густини здійснюється з використанням різноманітних конструкції ТМР, для створення ВД контролю густини в складних умовах експлуатації.

2. Розроблено ВМК густини рідини або газу, що полягає у порівняння частот (періодів) автоколивань двох ПМР, які контактують з контрольованою речовиною, шляхом: контролю, за різницею частот (періодів) автоколивань резонаторів, густини з завданою чутливістю; забезпечення однакових змін частот (періодів) автоколивань обох резонаторів від впливу температури, тиску; зменшення нелінійності характеристики перетворення; контролю температури за отриманим значенням густини та частотами (періодами) резонаторів. ВМК густини здійснюється з використанням різноманітних конструкцій ПМР круглої форми, для створення ВД контролю густини в складних умовах експлуатації. ВМК густини може застосовуватися і для широко розповсюджених конструкцій ПМР, з закріпленням у центрі мембрани, додатковим чутливим елементом.

3. Розроблено ВМК густини рідини або газу, що полягає у порівняння частот (періодів) автоколивань двох ЦМР, які контактують з контрольованою речовиною, шляхом: контролю за різницею частот (періодів) автоколивань густини, з завданою чутливістю; забезпечення однакових змін частот (періодів) автоколивань обох циліндрів від впливу температури та тиску; контролю температури за отриманим значенням густини та частотами (періодами) окремих циліндрів. ВМК густини здійснюється з використанням різноманітних конструкцій ЦМР, при різноманітних способах закріплення кінців циліндрів (за умов довгих циліндрів), для створення ВД контролю густини в складних умовах експлуатації.

4. Розроблено віброчастотний метод експрес контролю концентрації вузької фракції твердої фази суспензії оснований на порівнянні частот(періодів) автоколивань високочастотного та низькочастотного МР, які контактують з контрольованою суспензією, шляхом: контролю за різницею частот (періодів) автоколивань резонаторів концентрації вузької фракції твердої фази суспензії; забезпечення різних змін частот (періодів) автоколивань від впливу концентрації вузької фракції твердої фази суспензії та однакових змін від впливу густини

рідкої фази. ВМК контролю концентрації вузької фракції твердої фази суспензії здійснюється з використанням різноманітних конструкції МР, для створення ВД концентрації вузької фракції твердої фази суспензії в умовах коливань густини рідкої фази .

5. Розроблено ВМК контролю положення межі розподілу рідин, або рідини і газу оснований на залежності частоти автоколивань трубчастого замкнутого камертону, заповненого системою контрольованих речовин різної густини, що не змішуються, від положення межі розподілу цих речовин відносно підстав камертону.

6. Досліджено АКСМР для ВД контролю густини рідини або газу з використанням магнітоелектричної системи збудження коливань та ємкісної системи зняття коливань, і на основі аналізу результатів досліджень визначені похибки, що вносять такі системи у результати контролю густини рідини або газу.

7. Досліджено АКСМР в якій виявляється суттєва нелінійності пружних властивостей МР, і на основі аналізу результатів досліджень визначені похибки контролю від цієї нелінійності та запропонувати метод її компенсації, що полягає у використанні у ВД двох резонаторів з однакових характером впливу нелінійності на частоту автоколивань. Така АКСМР застосовується для експрес контролю масової концентрації суспензій та пульпи з довгими ТМР.

8. Розроблено АКСМР з параметричним контуром стабілізації амплітуди коливань МР, визначені межі стійкості автоколивань. Така АКСМР застосовується для ВД положення межі розподілу рідин або рідини і газу з ТМР, що працює у широкому діапазоні зміни маси.

9. Синтезовано характеристику ПЗЗ, що мінімізує похибки контролю. Такий ПЗЗ застосовується для всіх приведених АКСМР.

10. Результати дисертаційних досліджень впроваджено у вигляді математичних моделей ВД контролю густини, концентрації вузької фракції твердої фази суспензій, положення межі розподілу рідин або рідини і газу, методики перевірки достовірності безперервного автоматичного контролю густини нафтопродуктів диференційним датчиком ДДГ-1 на ВАТ ДніпроВНІГПенергопром (м. Дніпропетровськ), диференційного датчика густини мазуту ДДГ-1 на ВАТ „Куйбишевський НПЗ” (г. Самара) та у навчальному процесі на кафедрі радіоелектронної автоматики фізико-технічного факультету Дніпропетровського національного університет у(м. Дніпропетровськ) у курсах лекцій, при викладанні дисциплін „Фізичні основи неруйнівного контролю ”, „Прилади неруйнівного контролю ” та методичних вказівках до курсових та дипломних робіт за спеціальністю „Прилади та системи неруйнівного контролю ” і на кафедрі економіки підприємства Дніпропетровського університету економіки та права (м. Дніпропетровськ) у курсах лекцій, при викладанні дисциплін „Стандартизація та сертифікація продукції ”, „Організація виробництва ”, „Системи технологій ” та при виконанні курсових робіт за спеціальністю „Економіка підприємства ”

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тараненко Ю.К. Автоматична корекція температурної погрішності віброчастотних вимірювачів щільності рідких та газоподібних речовин [Текст] / Ю.К.Тараненко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –Хмельницький – 2006.– №1.– С.13-16
2. Тараненко Ю. К. Проміжний вимірювальний перетворювач для проточних диференційних вібраційних датчиків щільності рідини [Текст]/ Ю.К.Тараненко// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –Хмельницький – 2006.– №2.– С.24-27.
3. Тараненко Ю.К. Диференційний віброчастотний метод вимірювання щільності газів, рідин та дисперсних систем [Текст]/ Ю.К. Тараненко// Вопр. химии и хим. технологии. – Днепропетровск – 2006. – № 3. – С.201-203.
4. Тараненко Ю.К. Математична модель диференційного віброчастотного датчика концентрації дисперсних систем [Текст] /Ю.К.Тараненко //Вісник Академії митної служби України. – Днепропетровск – 2006. – №3.– С.109-116.
5. Тараненко Ю.К. Математична модель вимірювального перетворення щільності рідини у частотний вихідний сигнал диференційного датчика на основі двох трубчастих резонаторів проточного типу [Текст]/Ю.К.Тараненко//Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2006. – №4/2(22). – С.41-50.
6. Тараненко Ю.К. Методика проектування оптимальних диференційних датчиків щільності рідини та концентрації дисперсних систем [Текст] / Ю.К. Тараненко// Вопр. химии и хим. технологии. – Днепропетровск – 2006. – № 4. – С.211-214
7. Тараненко Ю.К. Математична модель чутливості диференційного датчика щільності рідини, на основі двох трубчастих резонаторів [Текст] / Ю.К. Тараненко// Вопр. химии и хим. технологии. – Днепропетровск – 2006. – № 5 – С.228-232.
8. Тараненко Ю.К. Математична модель вимірювального перетворення щільності рідини у частотний вихідний сигнал диференційного датчика на основі двох пластинних резонаторів заглибного типу [Текст]/Ю.К.Тараненко//Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2006. –5/2(23). – С.106 -111.
9. Тараненко Ю.К. Математична модель вимірювального перетворення щільності рідини у частотний вихідний сигнал диференційного датчика на основі двох циліндричних резонаторів [Текст] /Ю.К.Тараненко//Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2006. – 6/2(24). – С.77-83.
- 10.Тараненко Ю.К. Математична модель диференційного датчика щільності рідини на основі двох трубчастих резонаторів еліптичного розтину [Текст]/ Ю.К.Тараненко // Вісник НТУ „ХПІ” Тематичний випуск „Автоматика та приладобудування”.– 2006. – № 31. – С.132-141.
- 11.Тараненко Ю.К. Диференційний метод виміру щільності рідин, газів та дисперсних систем [Текст]/ Ю.К.Тараненко// Вісник НТУУ „КПІ”. Серія приладобудування. – 2006.– Вип. 32. – С.47-55.

12. Тараненко Ю.К. Автоколебательная система виброчастотного измерителя плотности жидкости с механическим резонатором [Текст] / Ю.К.Тараненко // Изв. Вузів Радіоелектроніка. – Київ – 2006. том 49. Вып. 12. – С.29-45.
13. Тараненко Ю.К. Автоколивальна система виброчастотного вимірювача щільності рідини на основі механічного резонатора з “м’якою” нелінійністю [Текст] / Ю.К.Тараненко // Електроніка і зв’язь. – Київ – 2006. – № 4. – С. 65-70.
14. Тараненко Ю.К. Автоколивальна система виброчастотного вимірювача щільності рідини на основі механічного резонатора з “ жорсткою ” нелінійністю / Ю.К.Тараненко // Електроніка і зв’язь. – Київ – 2006. – № 5. – С.60-63.
15. Тараненко Ю. К. Регресійні моделі для оцінки метрологічних характеристик виброчастотних вимірювачів щільності [Текст] / Ю.К. Тараненко, О.М. Петренко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький – 2006. – №2. – С.18-23.
Здобувач запропонував методику побудови регресійних моделей і здійснив експериментальні дослідження.
16. Тараненко Ю.К. Математична модель впливу тиску та швидкості течії вимірювальної рідини на вихідний частотний сигнал диференційного датчика щільності рідини [Текст] / Ю.К.Тараненко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАН України. – Дніпропетровськ. 2006. – Вип. 63. – С.131-139.
17. Тараненко Ю.К. Автоколивальна система виброчастотних вимірювальних перетворювачів з механічним камертонним резонатором [Текст] / Ю.К.Тараненко // Електроніка і зв’язь. – Київ – 2006. – № 6. – С.59-63.
18. Тараненко Ю.К. Компенсація температурної похибки та похибки від зміни швидкості та тиску рідини у диференційних поточних виброчастотних датчиках густини нафтопродуктів [Текст] / Ю.К. Тараненко // Вопр. хімії і хім. технології. – Дніпропетровськ – 2006. – № 6. – С.187-192
19. Тараненко Ю. К. Розробка конструкції диференційного виброчастотного датчика щільності рідини [Текст] / Ю.К.Тараненко // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця – 2006. – №2(24). – С.61-66.
20. Тараненко Ю. К. Коливальний метод виміру реологічних характеристик речовин [Текст] / Ю. К.Тараненко, О.М. Петренко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький – 2006. – №2. – С.77-80.
Здобувач є автором винаходу конструкції резонатора, яка у теорії виброчастотних вимірів отримала назву „коливальна гантель”.
21. Тараненко Ю. К. Аналіз сучасного стану та перспективи розвитку засобів виміру масових витрат нафти та нафтопродуктів на вузлах комерційного обліку [Текст] / Ю.К.Тараненко // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2007. – 1/2(25). – С.29 -36.
22. Тараненко Ю.К. Использование параметрического контура регулирования амплитуды в автоколебательных системах виброчастотных плотномеров с механическим резонатором [Текст] / Тараненко Ю.К. // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя – 2007. – №1. – С.37-43

23. Тараненко Ю. К. Градування та повірка поточних віброчастотних вимірювачів щільності з диференційним датчиком [Текст] / Ю.К.Тараненко // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2007. – 2/2(26). – С.41-47.
24. Тараненко Ю.К. Забезпечення максимальної чутливості, компенсація температурної похибки та похибки лінійності у диференційних віброчастотних датчиках щільності рідин та газів. [Текст] / Ю.К.Тараненко, О.М. Петренко // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2007. – 3/2(27). – С.22-28.
Здобувач розробив методу проектування вимірювачів густини з лінійною характеристикою вимірювального перетворення та максимальною чутливістю з використанням двох трубчастих резонаторів.
25. Тараненко Ю.К. Математична модель вібраційного датчика межі розподілу рідин / Ю.К.Тараненко // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2007. – 4/2(28). – С.28-32.
26. Тараненко Ю.К. Формирование оптимальной характеристики нелинейного усилителя для автоколебательных систем вибрационных плотномеров [Текст] / Ю.К.Тараненко // Изв. Вузів Радиоелектроніка. – Київ – 2008. Т. 51, Вып. 7. – С.47-58.
27. Тараненко Ю. К. Методика расчёта высокочастотных плотномеров с их инвариантностью к колебаниям температуры и давления контролируемой среды [Текст] / Ю.К.Тараненко, О.Н. Петренко // Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ – 2008. – №20. – С.41 -46.
Здобувач розробив методу проектування високочастотних густиномірів з пластинчастими резонаторами, яка забезпечує інваріантність приладу до коливань температури та тиску.
28. А.с. 648843 ССРСР, МКИ² G01F 23/28. Датчик уровня / Ю.К.Тараненко, В.И. Снегур (ССРСР). – №2525807/18-10; заявл. 19.09.77; опубл. 25.02. 79. Бюл. № 7. – 2 с. : ил.1
Здобувач є автором конструкції резонатора для виміру розподілу рідин під тиском.
29. А.с. 964503 ССРСР, МКИ³ G01 L 9/00 Датчик разности давлений с частотным выходным сигналом / Ю.К. Тараненко (ССРСР). – №3003887/18-10; заявл. 11.11.1980; опубл. 07.10.82, Бюл. №37. – 3 с. : ил.1
30. А.с. 966501 ССРСР, МКИ² G01F 23/28. Вибрационный уровнемер / Ю.К.Тараненко (ССРСР). – №3256173/18-10; заявл. 05.03.81; опубл. 15.10. 82. Бюл. № 38. – 4 с. : ил.2
31. А.с. 1052888 ССРСР, МКИ³ G01 K 7/32. Устройство для измерения температуры / Ю.К. Тараненко (ССРСР). – №3256519; заявл. 02.03.1981; опубл. 07.11.83, Бюл. №41. – 4 с. : ил.1
32. А.с. 1120172 ССРСР, МКИ³ G01F 23/28. Вибрационный уровнемер / Ю.К. Тараненко (ССРСР). – №323252509; заявл. 02.03.1981; опубл. 23.10.84, Бюл. №39. – 4 с. : ил.1
33. А.с. 1226173 ССРСР, МКИ⁴ G01N 15/02, G01N 9/00. Устройство для определения гранулометрического состава / В.И. Снегур, Ю.К.Тараненко,

И.В. Мозодевский, И.С.Шур, Н.А.Гордиенко (СССР).– №3765962/24-25; заявл. 04.07.84; опубл. 23.04. 86, Бюл. № 15. – 4 с. : ил.2

Здобувач є автором ідеї використання високочастотного та низькочастотного резонаторів для визначення масової концентрації вузької фракції твердої фази.

34. А.с. 1291867 СССР, МКИ⁴ G01N 29/00. Способ дифференциального измерения плотности / Ю.К.Тараненко (СССР). – №3798544/25-28; заявл. 03.10.84; опубл. 23.02. 87, Бюл. № 7. – 2 с..

35. А.с. 1332189 СССР, МКИ⁴ G01N 9/00. Дифференциальный вибрационный плотномер /Ю.К.Тараненко, В.И. Снегур, М.В.Кулаков, И.В. Кораблёв (СССР). – №3910477/31-25; заявл. 13.06.85; опубл. 23.08.87, Бюл. №31. . – 3 с. : ил.4

Здобувач є автором ідеї використання дискримінатору тривалості періодів резонаторів диференційного датчика, та побудував математичну модель і випробувальний зразок приладу.

36. А.с. 1343297 СССР МКИ⁴ G01N 9/00. Дифференциальный вибрационный плотномер / Ю.К.Тараненко, М.В.Кулаков, В.И. Снегур, И.В. Кораблёв (СССР). – №3989473/31-25; заявл. 16.12.85; опубл. 07.10.87. Бюл. №37. – 3 с. : ил.1

Здобувач запропонував ідею виділення інформаційної складової частотно-модульованого сигналу.

37. А.с. 1392451 СССР, МКИ³ G01N 9/00. Дифференциальный вибрационный плотномер / Ю.К.Тараненко, В.И. Снегур, М.В.Кулаков, И.В. Кораблёв (СССР). – №3911436/31-25; заявл. 10.06.85; опубл. 30.04.88. Бюл. №16. – 3 с. : ил.1

Здобувач є автором ідеї управління власними частотами диференційного датчика, та побудував математичну модель і випробувальний зразок приладу.

38. А.с. 1467451 СССР, МКИ⁴ G01N 15/04. Частотный способ седиментационного анализа суспензий / В.И. Снегур, Ю.К.Тараненко, А.С. Топоренко, О.И. Школа (СССР). – №4219643/24-25; заявл. 03.02.87; опубл. 23.03. 89, Бюл. № 11. – 3 с. : ил.1

Здобувач є автором ідеї стабілізації амплітуди коливань резонатора та побудував математичну модель для визначення концентрації твердої фази суспензії.

39. А.с. 1837210 СССР, МКИ⁵ G01N 15/04. Частотный способ седиментационного анализа суспензий / Ю.К.Тараненко, В.И. Снегур, О.И. Школа (СССР).– №4852173/25; заявл. 17.07.90; опубл. 30.08. 93, Бюл. № 23. – 4 с. : ил.1

Здобувач є автором ідеї додаткового визначення швидкості зміни густини суспензії.

40. Taranenko J. Equipment complex for mass-exchange process and classification in disperse liquid system [Text]/ J. Taranenko, O. Shkola // The 11 th International Congress of Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation. CHISA 93 29 August-3 September 1993 Praha, Czech Republic/ ABSTRACTS E s.11-12

Здобувачем розроблено систему контролю концентрації узької фракції твердої фази суспензії для управління технологічним апаратом відмивання люмінофорів

41. Тараненко Ю.К. Виброчастотные методы измерения технологических параметров промышленных производств [Текст]/ Ю.К. Тараненко// Матеріали 1-ої міжнародної науково-практичної конференції “Наука: теорія та практика – 2006”. – Том 3 – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – С.38-40.
42. Тараненко Ю.К. Дифференциальный виброчастотный метод измерения плотности жидких, газообразных, дисперсных сред [Текст]/ Ю.К. Тараненко// Матеріали 1-ої міжнародної науково-практичної конференції “Передові наукові розробки – 2006”. – Том 5 – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – С.66-68.
43. Петренко О.М. Інформаційно-вимірювальні системи на основі диференційних виброчастотних датчиків складу і властивостей рідких та газоподібних речовин [Текст]/ О.М. Петренко, Ю.К. Тараненко// Матеріали 3-й международной научно-практической конференции “Дни науки — 2007”. – Том 11. Технические науки. Строительство и архитектура. – Днепропетровск: Наука и образование, 2007. – С. 55-67.
Здобувачем розроблені структурні схеми інформаційно-вимірювальних систем, доопрацьовано програмне забезпечення та проведені експериментальні дослідження.
44. Тараненко Ю.К. Автоколебательная система виброчастотных датчиков с нелинейным механическим резонатором [Текст]/ Ю.К. Тараненко// Матеріали 5-й международной научно-практической конференции “Наука и образование – 2007”. – Том 12. Технические науки. – Днепропетровск: Наука и образование, 2007. – С. 70 -74.
45. Тараненко Ю.К. Диференційний виброчастотний метод контролю та визначення складу рідких та газоподібних речовин [Текст] / Ю.К.Тараненко// Збірник тез доповідей 6-ої науково-технічна конференції "Приладобудування: стан і перспективи". – Київ: НТУУ "КПІ"-2007.– С.177.
46. Тараненко Ю.К. Виброчастотные методы неразрушающего контроля физико-химических параметров жидких и газообразных сред [Текст] /Ю.К.Тараненко //Збірник доповідей 10-ої конференції ”Неруйнівний контроль - 2008”. – Київ: Асоціація «ОКО» –2008.– С. 94–100.

АНОТАЦІЇ

Тараненко Ю.К. Виброчастотні методи контролю та визначення складу рідких та газоподібних речовин (теоретичні основи розробки та впровадження).— Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю: 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Дніпропетровський національний університет. Дніпропетровськ, 2008.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-прикладної проблеми – розширенню галузі застосування виброчастотних методів контролю на

визначення густини рідин та газів, положення межі розподілу рідин або рідини та газу, концентрації вузької фракції суспензій, в умовах коливань температури, тиску, швидкості течії рідини або газу, густини та в'язкості рідкої фази суспензій.

Вирішення цієї проблеми застосовано на створенні наукових основ розробки датчиків густини з двома механічними резонаторами (трубчастими, пластинчастими, циліндричними), датчиків положення межі розподілу рідин (з трубчастими замкнутими камертонними резонаторами), експрес аналізаторів концентрації вузької фракції твердої фази суспензій (з прямолінійними вертикально встановленими трубчастими резонаторами), розробці вимірювальних автоколивальних систем механічних резонаторів з мінімальним відхиленням частоти автоколивань від власної частоти резонатора, розробці методів управління власними частотами резонаторів для адаптацію датчиків до умов експлуатації, розробці методики проектування датчиків, розробці методики визначення похибок датчиків в умовах експлуатації, розробці методики побудови інформаційно-вимірювальних систем на основі віброчастотних датчиків.

Розроблені математичні моделі віброчастотних датчиків густини рідин і газів, концентрації суспензій, положення межі розподілу рідин, які дозволили отримати умови інваріантності датчиків до коливань температури, тиску, швидкості течії вимірювальної речовини, густини та в'язкості рідкої фази суспензій.

Здійснені дослідження автоколивальних систем віброчастотних датчиків, які дозволили визначити параметри усіх елементів систем (приймача та збудника коливань, підсилювача зворотного зв'язку, ланцюга зворотного зв'язку), що забезпечують мінімальну похибку контролю.

Розроблена регресійна модель для оцінювання похибки контролю віброчастотних датчиків в умовах експлуатації.

Ключові слова: метод виміру складу рідин, малих домішок корисних і шкідливих речовин, метод визначення складу газового середовища

Тараненко Ю.К. Виброчастотные методы контроля и определения состава жидких и газообразных веществ (Теоретические основы разработки и внедрения). – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности: 05.11.13 — приборы и методы контроля и определения состава и свойств веществ. Днепропетровский национальный университет. 2008

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной проблемы – расширению области применения виброчастотных методов контроля на определение плотности жидкостей и газов, положения границы раздела жидкостей или жидкости и газа, массовой концентрации суспензий, в условиях колебаний температуры, давления, скорости течения контролируемой среды, плотности и вязкости жидкой фазы суспензий.

Решение этой проблемы основано на создании научных основ разработки датчиков плотности с двумя механическими резонаторами (трубчатыми, пластинчатыми, цилиндрическими), датчиков положения границы раздела жидкостей (на основе трубчатых замкнутых камертонных резонаторов), экспрес-анализаторов концентрации узкой фракции твёрдой фазы суспензий (с

прямолинейными вертикально установленными трубчатыми резонаторами), разработки измерительных автоколебательных систем механических резонаторов с минимальным отклонением частоты автоколебаний от собственной частоты резонатора, разработки методов управления собственными частотами резонатора для адаптации датчиков к условиям эксплуатации, разработки методики проектирования датчиков, разработки методики определения погрешностей датчиков в условиях эксплуатации, разработки методики построения информационно-измерительных систем на основе виброчастотных датчиков.

Разработаны математические модели датчиков плотности жидкости и газа, концентрации суспензий, положения границы раздела жидкостей, которые позволили получить условия инвариантности датчиков к колебаниям температуры, давления, скорости течения измеряемого вещества, плотности и вязкости жидкой фазы суспензий.

Проведены исследования измерительных автоколебательных систем виброчастотных датчиков, которые позволили определить параметры всех элементов системы (возбудителя и приёмника колебаний, усилителя обратной связи, цепи обратной связи), которые обеспечивают минимальную погрешность измерения.

Разработана регрессионная модель для оценки погрешностей измерения виброчастотными датчиками в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: метод измерения состава жидкости, малых примесей полезных и вредных веществ, метод определения состава газовых сред

Taranenko J.K. Vibrating methods of the control both definition of structure of liquids and gases (Theoretical bases of development and introduction). - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of engineering science on a specialist: 05.11.13 - devices both methods of the control and definition of structure and properties of substances. The Dnepropetrovsk national university. 2008

The dissertation is devoted to the decision of the important scientific - applied problem - expansion of area of application of vibrating methods of the control on definition of density of liquids and gases, rule of border of the unit of liquids or liquid and gas, mass concentration of systems a liquid - firm in conditions of fluctuations of temperature, pressure, speed of current of controllable environment, density and viscosity of a liquid phase.

The decision of this problem is based on creation of scientific bases of development of gauges of density with two mechanical resonators (tubular, from plates, cylindrical), gauges of a rule(situation) of border of the unit of liquids (on the basis of the tubular closed tuning forks), express train of analyzers of concentration of systems a liquid - firm (with the rectilinear vertically established tubular resonators), development of measuring auto oscillatory systems of mechanical resonators with the minimal deviation(rejection) of frequency of auto fluctuations from own frequency of the resonator, development of methods of management of own frequencies of the resonator for adaptation of gauges to conditions of operation, development of a technique of designing of gauges, development of a technique of definition of errors of gauges under

operating conditions, development of a technique of construction of information measuring systems on the basis of vibrating gauges.

The mathematical models of gauges of density of a liquid and gas, concentration of systems a liquid - firm, rule(situation) of border of the unit of liquids are developed which have allowed to receive conditions of invariance of gauges to fluctuations of temperature, pressure, speed of current of substance, density and viscosity of a liquid phase.

The researches of measuring auto oscillatory systems of vibrating gauges are carried out(spent) which have allowed to define(determine) parameters of all elements of system (activator and receiver of fluctuations, amplifier of a feedback, circuit of a feedback), which provide the minimal error of measurement.

The statistical model for an estimation of errors of measurement by vibrating gauges under operating conditions is developed.

Key words: Method of measurement of structure of a liquid, small impurity of useful and harmful substances, method of definition of structure of gas environments

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АКСМР – автоколивальна система механічного резонатора;

ВЗЖ – вузол зміни жорсткості резонатора;

ВМК – віброчастотний метод контролю;

ВД – віброчастотний датчик;

ДДГ – диференційний датчик густини;

ДЧ – дільник частоти;

ЗКР – збудник коливань резонатора;

ЗК – звукова картка персонального комп'ютера;

КГ – кварцовий генератор;

КЗ – канал зв'язку;

МР – механічний резонатор;

МЧ – помножувач частоти;

ПВП – проміжний вимірювальний перетворювач;

ПЗЗ – підсилювач зворотного зв'язку;

ПМР – пластинчастий механічний резонатор;

ПКР – приймач коливань резонатора;

ТМР – трубчастий механічний резонатор;

ЦМР – циліндричний механічний резонатор.