

В І Д Г У К

о ф і ц і й н о г о о п о н е н т а
на дисертаційну роботу Заболотного Олександра Віталійовича
**«Розвиток теорії діелькометричної вологометрії та алгоритмічних методів
підвищення точності вимірювання вмісту вологи речовин»**, що подана
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин

Актуальність теми.

Показник масової частки води в речовині широко поширений у технологічному, приймально-здавальному, екологічному, митному контролі, при сертифікаційних випробуваннях готової продукції за показниками якості та безпеки. В деяких випадках характеристики вмісту води встановлені як показники безпеки процесів виробництва та зберігання і як показники ідентифікації продукції. Вимірювальний контроль вологості різних матеріалів і речовин займає важливе місце в сучасній вимірювальній техніці. Ці виміри важливі для багатьох галузей народного господарства і в цілому ряді областей наукових досліджень. Все це свідчить щодо важливості наявності достовірних та надійних методів й приладів вологометрії. Переважну більшість серед відомих вологомірів рідинних, твердих, сипких і пастоподібних матеріалів займають діелькометричні прилади з емнісними датчиками. Для вологомірів цієї групи характерна додаткова похибка вимірювань, так звана «сортова невизначеність», спричинена різними початковими значеннями діелектричної проникності досліджуваних матеріалів. Вплив цієї похибки є істотним, а традиційні способи її компенсації досить ефективні, коли тип досліджуваного матеріалу відомий наперед. Але так буває далеко не завжди. В умовах, коли тип матеріалу може бути непрогнозованим, традиційні способи компенсації «сортової похибки» втрачають ефективність. Не менша увага також повинна приділятися іншим складовим похибкам вимірювань вмісту вологи, зокрема обумовленим гранулометричним складом досліджуваної речовини, її щільністю та домішками, температурними зовнішніми впливами. Тому цей напрямок розвитку теорії вологометрії є перспективним і актуальним та складає важливу науково-прикладну проблему, вирішення якої має суттєве

значення для приладобудування.

Актуальність теми дисертації підтверджується також й тим, що вона виконувалась у рамках завдань фундаментальних і прикладних держбюджетних науково-дослідницьких робіт: «Методологія проектування інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів енергоносіїв літальних апаратів і промислових паливно-енергетичних комплексів» (ДР № 0106U001053); «Методологія проектування елементів і інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів авіаційних двигунів і промислових паливно-енергетичних комплексів» (ДР № 0111U001072); «Енергоефективні і ресурсозберігаючі технології і засоби вимірювання, перетворення і використання енергоносіїв літальних апаратів і паливно-енергетичних комплексів» (ДР № 0109U001089); «Методологія удосконалення промислових паливно-енергетичних комплексів і авіаційних двигунів з використанням інформаційно-вимірювальних систем моніторингу змінних станів в умовах невизначеності вхідних даних» (ДР № 0115U000838).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Заболотного О.В., є досить високою й базується на поглибленому аналізі науково-технічних джерел за даною проблематикою, раціональній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів досліджень, кількісному порівнянні і критичному аналізу отриманих результатів відносно результатів інших дослідників, адекватному формулюванні запропонованих висновків. Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату для опису і моделювання процесів, які мають місце при вимірюванні вмісту вологи діелектричним методом. Отримані результати перевірено шляхом проведення серії експериментальних досліджень для різних діелектричних речовин, що підтверджує правильність наукових положень, висновків і рекомендацій,

сформульованих в дослідженнях.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановки математичних задач, застосуванням стандартних методів теоретичних і експериментальних досліджень. Отримані результати, висновки і рекомендації математично аргументовані і є логічними. Математичні методи в роботі обґрунтовані відповідними математичними викладками і підтверджуються співставленням отриманих результатів з експериментальними даними. Наукові результати здобувача успішно впроваджено у виробничий процес промислових підприємств України.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне.

Вперше:

- проведено перевірку обумовленості наявних тестових методів вимірювання вмісту вологи шляхом використання сформованих симетричних варіацій значень діелектричної проникності, що дозволило запропонувати новий метод визначення вмісту вологи, для якого обчислені значення вологості речовини мають кращі показники;
- розроблено новий метод визначення вмісту вологи, в якому використано два адитивних тестових впливи на речовину, а також два мультиплікативних і два додаткових тестових впливи, що дозволило зменшити вплив сорту речовини на результат вимірювання вмісту вологи і за рахунок цього підвищити точність вимірювань;
- розроблено новий метод створення ємнісних первинних вимірювальних перетворювачів, в якому адитивні тестові впливи на речовину реалізовано шляхом розміщення в міжелектродному просторі перетворювача електропровідного матеріалу певної товщини, що забезпечує експрес- вимірювання вмісту вологи;

- розроблено математичні моделі статичних характеристик перетворення для первинних вимірювальних перетворювачів ємнісного типу, які дають можливість враховувати вплив температури і гранулометричного складу сипких речовин на результат вимірювання вмісту вологи;

Удосконалено:

- диференційний метод вимірювання вмісту вологи речовин шляхом використання чотирьох вимірювальних каналів електричної ємності, який дозволяє підвищити точність вимірювання за рахунок ефективної компенсації впливу сорту і гранулометричного складу досліджуваної речовини на результат вимірювання;

Отримали подальший розвиток:

- адаптивні методи вимірювання вмісту вологи за рахунок використання нових тестових алгоритмів, нових первинних і вторинних вимірювальних перетворювачів, що дозволило у значній мірі компенсувати вплив сорту речовини на результат вимірювання і забезпечити підвищення точності.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Розроблені здобувачем нові методи вимірювання вмісту вологи з використанням тестових впливів на речовину дозволяють компенсувати вплив сорту речовини на результат вимірювання вмісту вологи для діапазону вимірювання від 0 % до 40 %. Диференційний метод вимірювання вмісту вологи з використанням чотирьох вимірювальних конденсаторів, два з яких заповнюють пробою досліджуваної речовини, а інші два – пробою такої ж речовини, але попередньо зневодненої, забезпечує зменшення методичної похибки у порівнянні з класичною диференційною схемою. Розроблено ємнісні первинні перетворювачі, які дозволяють конструктивно реалізувати необхідну кількість тестових впливів на речовину і забезпечити експрес-вимірювання. Як наслідок, отримали подальший розвиток методи вимірювання вмісту вологи за рахунок

використання нових тестових алгоритмів, нових первинних і вторинних вимірювальних перетворювачів, що дозволило у значній мірі компенсувати вплив сорту речовини на результат вимірювання і забезпечити підвищення точності.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у промисловість в організаціях ТОВ «ВО ОВЕН»; ПП «ЄС - Автоматика»; УА ТОВ ФІРМА «КОДА» та навчальний процес кафедри авіаційних приладів і вимірювань Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані у 53 наукових працях, серед яких: 30 статей у наукових фахових виданнях України, 7 з яких входять до наукометричних баз (одна до бази Scopus), 2 статті у іноземних наукових спеціалізованих виданнях; 9 патентів України, з яких 5 патентів на винахід і 4 на корисну модель; 14 матеріалів і тез доповідей наукових конференцій. В цілому рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Заболотного Олександра Віталійовича складається з вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел і десяти додатків.

У **вступі** обґрунтовано необхідність розробки нових і удосконалення вже відомих методів визначення вмісту вологи, більш досконалих первинних і вторинних вимірювальних перетворювачів вмісту вологи. Показано взаємозв'язок проведених досліджень із науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, показано наукову новизну і практичну цінність отриманих у роботі результатів. Наведено дані про впровадження, публікації, апробації й особистий внесок автора.

В першому розділі проведено аналіз принципів вимірювання вмісту вологи сипких і рідинних речовин та обрано для подальшого розвитку метод вимірювання. Проведено аналіз вітчизняного і закордонного ринку вологомірів сипких матеріалів і нафтопродуктів, показано, що найбільш розповсюдженими є діелькометричні вологоміри. Також проведено аналіз способів вимірювання вмісту вологи в межах діелькометричного принципу і виявлено способи вимірювання, які дозволяють максимально ефективно компенсувати вплив різних сторонніх факторів на результат вимірювань. Було охоплено способи вимірювання вологості сипких, твердих, пастоподібних і рідинних діелектриків. Також було за певною кількістю загальних ознак класифіковано ці способи і поділено на окремі групи. В результаті аналізу охоплених літературних джерел обрано найбільш перспективну групу способів вимірювання вмісту вологи, визначено мету і задачі досліджень.

У другому розділі проведено кількісний порівняльний аналіз відомих способів вимірювання вмісту вологи, в яких реалізують тестові впливи на досліджувану речовину. Переверено спроможність кожного з розглянутих способів зберігати однакове розрахункове значення вмісту вологи в обраних контрольних точках для різних речовин з різною діелектричною проникністю у зневодненому стані.

Виявлено три найкращих аналога для визначення вмісту вологи. За результатами перевірки зроблено висновки щодо забезпечення ними високого ступеня компенсації сортової невизначеності, але відзначено низьку точність та складність реалізації тестових впливів. Висунуто гіпотезу, що методичну похибку спричиняє спрощення формули Вінера, за якою обчислено значення діелектричної проникності бінарної суміші «матеріал-вода». Запропонована функція поправки на методичну похибку з застосуванням лінійної регресії загального виду та отримано вираз для побудови тестового алгоритму, максимально наближений до оригінальної формули Вінера. Здійснено перевірку ефективності застосування уточненого виразу, головний недолік якого проявився в відсутності інваріантності до зміни діелектричної проникності речовини.

Третій розділ присвячено створенню нових методів вимірювання вмісту вологи, що здатні ефективно компенсувати зміну сорту речовини. Запропоновано групу методів, зокрема з використанням методу найменших квадратів, інтерполяційних поліномів Лагранжа першого і другого порядку, одного адитивного і одного мультиплікативного тестового впливу на речовину, а також одного адитивного, мультиплікативного і додаткового тестового впливу на речовину. Результати порівняння методу, в якому використано один адитивний і один мультиплікативний тест, з аналогами показали його певні переваги та недоліки. Подібний аналіз виконано також для методу з використанням адитивного, мультиплікативного і додаткового тестів.

У **четвертому розділі** здійснено перевірку робастності запропонованих методів вимірювання. Для цього значення діелектричної проникності збурювалися симетричною варіацією на стандартизованих рівнях. Під час аналізу було передбачено перебування кожного зі значень діелектричної проникності, а відповідно й електричної ємності, у двох станах, що обумовлені нижньою і верхньою границями випадкової варіації. В якості мір стійкості було використано корінь середньоквадратичної похибки і середню абсолютну похибку відстані між обчисленими й номінальними значеннями вмісту вологи. Також було проаналізовано максимальну розбіжність обчислених значень вмісту вологи для відповідних номінальних контрольних точок. Верифікація показала, що кращі серед запропонованих методів визначення вмісту вологи мають низький рівень обумовленості, особливо для контрольних точок 0 % і 10 % вмісту вологи.

Обумовленість перевірених тестових алгоритмів було покращено шляхом розробки нового методу визначення вмісту вологи, в якому використано два адитивних тестових впливи на речовину з добавками певної кількості води, а також два мультиплікативних і два додаткових тестових впливи. Порівняльний аналіз аналогів і нового методу показав, що останній забезпечує найменшу розбіжність із номінальними значеннями вмісту вологи у порівнянні з найбільш досконалими аналогами. Крім того, метод забезпечує найменшу дисперсію адекватності серед усіх розглянутих тестових алгоритмів. Результати

двохфакторного дисперсійного аналізу для різних тестових алгоритмів з точки зору метрологічних вимог показали найкращі показники для цього ж тестового алгоритму визначення вмісту вологи.

П'ятий розділ присвячений розробці перспективного методу вимірювання вмісту вологи, що також дозволяє суттєво зменшити вплив типу досліджуваної речовини на результат вимірювання. Особливістю методу є використання чотирьох вимірювальних каналів електричної ємності з відповідною кількістю чутливих ємнісних елементів, два з яких заповнено пробою досліджуваної речовини, а інші два – зневодненою порцією цієї ж речовини. Оцінювання показало, що метод забезпечує зменшення впливу зміни сорту речовини на результат вимірювання майже на два порядки порівняно з методом безпосередньої оцінки. Також проаналізовано вплив змінного гранулометричного складу сипкої речовини на результат вимірювання вмісту вологи. Для цього було створено математичну модель, що описує залежність діелектричної проникності суміші від діелектричної проникності, густини і об'єму її окремих компонентів. Показано, що похибка від зміни гранулометричного складу для запропонованого методу менше ніж для класичної диференційної схеми та методу безпосереднього оцінювання. Тобто метод забезпечує зменшення додаткової похибки від зміни гранулометричного складу речовини. Також було оцінено здатність запропонованого методу компенсувати вплив від зміни температури досліджуваного зразка речовини за умови її збільшення відносно стандартних умов. В результаті моделювання виявилось, що компенсація зміни температури здійснюється на такому ж рівні, як і для класичного диференційного методу вимірювання.

Шостий розділ містить опис нових ємнісних первинних перетворювачів, конструкція яких передбачає реалізацію тестових впливів на речовину у вигляді добавок потрібної кількості води. Першу з описаних конструкцій утворено двома секціями, одна з яких заповнена досліджуваною речовиною, а друга дозволяє реалізувати один тестовий вплив на цю речовину завдяки особливості конструкції. За необхідності більшої кількості тестових впливів кількість секцій

потрібно збільшувати. В другій конструкції первинного перетворювача для реалізації тестових впливів використано металеві пластини певної товщини, які вводяться в міжелектродний простір для імітації наявності вологи. Також запропоновано методику визначення потрібної товщини цих пластин. Сумісне використання таких первинних перетворювачів разом із запропонованим ефективним тестовим методом вимірювання дозволяє забезпечити експрес-контроль вмісту вологи.

У цьому розділі реалізовано оцінку ефективності запропонованих методів і засобів підвищення точності вимірювання вмісту вологи за результатами експериментальних досліджень. Описано виготовлені конструкції первинних перетворювачів для диференційного і тестового методів вимірювання, також описано лабораторні установки для вимірювання вмісту вологи з диференційним первинним перетворювачем і з адаптивним первинним перетворювачем. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що сумарна невизначеність для запропонованого диференційного методу практично вдвоє менша ніж для класичної диференційної схеми. Показано, що запропонований диференційний метод вимірювання має меншу чутливість до зміни сорту матеріалу у порівнянні з класичною диференційною схемою і забезпечує підвищення точності вимірювань. Для оцінки точності вимірювання вмісту вологи для запропонованого тестового методу було використано метод математичного програмування, для якого максимальні і мінімальні значення електричних ємностей було обрано за результатами багатократних спостережень проб перлової крупи з певним вмістом вологи. Цей метод вимірювання вмісту вологи також забезпечив підвищення точності вимірювання у порівнянні з аналогом.

Висновки до розділів та за результатами роботи в цілому сформульовано логічно і достатньо чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації із 359 найменувань.

Зміст автореферату є ідентичним основним положенням дисертації та

достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичні здобутки досліджень.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. В пункті 6 наукової новизни здобувачем задекларовано «отримали подальший розвиток **адаптивні** методи вимірювання вмісту вологи за рахунок використання нових тестових алгоритмів, нових первинних і вторинних вимірювальних перетворювачів....», але жодної згадки щодо **адаптивності** в тексті дисертації, крім назви другого розділу, не міститься. Якщо щодо ємнісних первинних перетворювачів це можна сприймати як наслідок конструктивної можливості забезпечити потрібну кількість тестових впливів на досліджувану речовину, а для методів вимірювання як можливість в певній мірі ігнорувати «сорт», то все це потребує пояснень в явному вигляді та має бути відображено в тексті дисертації, а не ґрунтуватися на здогадках;

2. Розділ 4 дисертації присвячено «перевірці рівня обумовленості **рішень**, отриманих за допомогою запропонованих тестових алгоритмів». На мою думку, мову скоріше слід вести щодо перевірки обумовленості, тобто робастності, стійкості до похибки вхідних даних, **методів** визначення вмісту вологи як складової коректності задачі вимірювального контролю. Було би доречно попередньо надати визначення цього терміну та пояснити, що собою представляє погано обумовлений метод вимірювання;

3. Другий розділ дисертації у відповідності до його назви має бути присвячено **синтезу статичної характеристики** перетворення адаптивного вологоміра. Але значну його частину займає порівняльний аналіз можливості відомих тестових алгоритмів компенсувати «сортovu невизначеність». Вважаю, що цю інформацію потрібно було розміщувати у першому розділі, де проводився критичний аналіз досягнень в цій області, а другий розділ за прийнятою зазвичай структурою дисертацій повинен містити вже нові наукові результати;

4. Розрахункові вирази (3.4), (3.6) отримано напівтеоретичним та напівемпіричним методами із суб'єктивних міркувань, що залишає невпевненість в тому чи є їх модифікація найкращою;

5. У виразах (3.17), (3.18) і (3.25) права частина має бути безрозмірною, але це не так;

6. Здобувачем не окреслено чітко області переважного застосування запропонованих ним у розділах 4 та 5 підходів до вимірювання вмісту вологи в речовинах. Було би доцільно надати такі рекомендації.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну в цілому оцінку виконаної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота **Заболотного Олександра Віталійовича** «Розвиток теорії діелькометричної вологометрії та алгоритмічних методів підвищення точності вимірювання вмісту вологи речовин» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-технічну проблему, суть якої полягає у підвищенні точності вимірювання вмісту вологи сипких і рідинних речовин.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 “Порядку присудження наукових ступенів” щодо докторських дисертацій, а здобувач **Заболотний Олександр Віталійович** заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Офіційний опонент,
професор кафедри приладобудування,
мехатроніки та комп'ютеризованих
технологій Черкаського державного
технологічного університету,
доктор технічних наук, професор

В.Я. Гальченко

Владимир Гальченко

Директор кафедри *Гальченко* *С.В. Ковальчук*