

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Заболотного Олександра Віталійовича “Розвиток теорії діелекметричної вологометрії та алгоритмічних методів підвищення точності вимірювання вмісту вологи речовин”, поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Зернове господарство України є стратегічною і дуже важливою галуззю економіки. Недотримання вимог до вологості зерна, насіння овочевих культур призводить до зниження якості, зростанню втрат, а також енерговитрат на сушіння, впливає на собівартість продукту. Відсутність точних і водночас експресних засобів контролю призводить до неточної оцінки параметрів сипких речовин, пересушуванню, втратам під час зберігання, неоптимальності технологічних процесів виробництва. Змінний хімічний склад досліджуваних речовин є причиною появи так званої «сорової невизначеності» у зв'язку з тим, що результат вимірювання вмісту вологи істотно залежить від початкової діелектричної проникності (сорт) речовини, яка може суттєво відрізнятися навіть для різних її марок. На фізико-хімічний склад таких речовин впливає не тільки їх тип або сорт, але й умови видобутку, зберігання і переробки, тобто фактори, які є складними для аналітичного прогнозування. Відмінні гранулометричні характеристики також суттєво знижують точність вимірювань.

Визначення вмісту води в водно-паливних емульсіях дозволяє забезпечити економію палива і зменшити рівень викидів у атмосферу. Об'ємний вміст води у таких емульсіях може становити до 40 % і також є об'єктом контролю.

Проблема підвищення точності вимірювання вмісту вологи означених вище неоднорідних речовин і матеріалів при збереженні експресності контролю може бути вирішена шляхом розроблення нових методів визначення вмісту вологи, синтезу нових тестових алгоритмів для обчислення вмісту вологи, побудови

математичних моделей щодо характеристик перетворення, здатних враховувати вплив зміни сорту, температури і гранулометричного складу досліджуваної речовини, а також розробки нових первинних і вторинних перетворювачів вмісту вологи.

Тому дисертаційна робота Заболотного О.Б., присвячена розвитку теорії дієлькометричної вологометрії та алгоритмічних методів підвищення точності вимірювання вмісту вологи речовин, є актуальною.

Дисертація виконана у Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут” Міністерства освіти і науки України. Її актуальність також підтверджується 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 паливноенергетичних 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), де здобувач був одним з виконавців окремих етапів.

В першому розділі дисертації проведене обґрунтування доцільності і перспективності використання дієлькометричного принципу вимірювання вмісту вологи, враховуючи експресність вимірювань, можливість використання смісних вимірювальних перетворювачів в потоці речовини, при автоматизації технологічних процесів.

Приведені дані, які показують, що для сипких речовин найбільш розповсюдженими в світі є діелькометричні вологоміри (приблизно 33 % від загальної кількості). Стосовно нафтопродуктів ситуація є аналогічною - діелькометричні вологоміри займають 62% усіх моделей, які зараз виробляються. Було здійснено аналіз способів вимірювання вмісту вологи різних речовин в межах діелькометричного принципу з метою виявлення найбільш ефективних методів, що забезпечують високу точність контролю. Це дало можливість визначити напрями підвищення точності для наявних методів і технічних засобів вимірювання вмісту вологи.

Указано, що на точність результату вимірювання вмісту вологи має вплив значна кількість факторів: температура, хімічний склад (тип або сорт), гранулометричний склад (для сипких матеріалів) тощо. Вплив температури в більшості випадків враховують ручним або автоматичним введенням відповідних поправок, зміну гранулометричних характеристик компенсують за допомогою операцій подрібнення або ущільнення, а зміну хімічного складу враховують введенням в пам'ять вологомірів калібрувальних кривих або таблиць для максимально можливого переліку матеріалів. Усі наведені прийоми не забезпечують універсальності і є недостатньо ефективними.

У другому розділі дисертації здійснено порівняльний аналіз відомих способів вимірювання вмісту вологи, що передбачають тестові впливи на матеріал. Перевірено спроможність кожного з розглянутих способів зберігати однакове розрахункове значення вмісту вологи в визначених контрольних точках для речовин з різною діелектричною проникністю у зневодненому стані. Для розрахунку діелектричних проникностей бінарної суміші використано повну формулу Вінера.

Виявилось, що результати розрахунків для способів, що підлягали аналізу, зберігають працездатність лише за суттєвих обмежень, наприклад якщо залежність між вмістом вологи і діелектричною проникністю бінарної суміші є лінійною. Було виявлено лише три тестових алгоритми, що передбачають два тестових впливи на речовину і є інваріантними до зміни діелектричної

проникності зневодненої речовини. Проте було встановлено, що розрахункові значення вмісту вологи істотно різняться з номінальними, а другий тестовий вплив є досить складним для технічної реалізації, а саме, не завжди можливо забезпечити потрібний рівень зневоднення досліджуваного зразка, не завжди можливо мати у наявності речовину, вміст вологи якої є визначеним.

Для формування більш досконалих тестових впливів була графічно визначена функція, яка описує відхилення спрощеного тесту від оригінальної формули Вінера, і здійснено її апроксимацію методом лінійної регресії загального виду. В результаті апроксимації вдалося отримати функцію поправки, При цьому максимальна розбіжність у контрольних точках склала 0,002 одиниці відносної діелектричної проникності. У відповідності с цим отримано новий тестовий алгоритм, який забезпечує зменшення розбіжності розрахункових і номінальних значень вмісту вологи. Проте погіршилась інваріантність до зміни сорту матеріалу.

Третій розділ дисертації присвячено розробці нових методів вимірювання вологи, здатних ефективно компенсувати зміну сорту речовини.

Досліджено метод вимірювання, що передбачає два адитивних тестових впливи на речовину, в якому вміст вологи визначають за виразом, отриманим з використанням методу найменших квадратів, і два методи визначення вмісту вологи з використанням інтерполяційних поліномів Лагранжа. Розроблено метод вимірювання, в якому використано два адитивних і два мультиплікативних тести, а вміст вологи обчислюють за спеціальним тестовим алгоритмом, більш наближеним до лінійного і до номінальних значень вмісту вологи, ніж усі згадані вище аналоги (максимальна розбіжність складає 1,5 % вмісту вологи у порівнянні з 4,9 %, 3,8 % і 3,6 % для найбільш досконалих аналогів). Метод вимірювання, в якому використано два адитивних, два мультиплікативних і два додаткових тести, забезпечив максимальну розбіжність у 1,16 % вмісту вологи для діапазону вимірювання від 0 % до 40 %. В діапазоні від 0 % до 30 % вмісту вологи, максимальна розбіжність обчислених значень складає 0,647 %, що набагато краще від решти аналогів.

В четвертому розділі дисертації здійснено перевірку обумовленості розрахункових значень, які отримані в результаті застосування наведених тестових алгоритмів. Значення електричних ємностей, які підставлені у обраний тестовий алгоритм і які формують результат вимірювання вмісту вологи, на практиці є випадковими результатами спостережень з випадковою варіацією. Збільшення варіації знижує обумовленість розрахункових значень і може привести до втрати працездатності тестового алгоритму.

В обчисленні значення діелектричних проникностей було введено симетричну варіацію 0,05 %, 0,1 %, 0,2 % і 0,3 % від обчислених значень. Для розрахункового значення вмісту вологи кожного тестового алгоритму було перевірено вісім можливих станів для обраних раніше контрольних значень діелектричних проникностей у зневодненому стані з урахуванням введеної варіації і контрольних точок вмісту вологи.

Результати перевірки на обумовленість виявились незадовільними для декількох запропонованих тестових алгоритмів. З метою виправлення ситуації було додатково запропоновано новий метод вимірювання, в якому використано два адитивних, два мультиплікативних та два додаткових тестових впливи на речовину і новий тестовий алгоритм для обчислення значень вмісту вологи. Було здійснено порівняльний аналіз найближчих аналогів із запропонованим методом вимірювання за значеннями середньої абсолютної похибки. Одержані відповідні значення дорівнюють: 3,14 %; 2,69 %; 2,61 %; 0,91 %. Новий метод забезпечує найменшу розбіжність з номінальними значеннями вмісту вологи і є найбільш придатним для використання. Цей висновок також підтверджено результатами перевірки усіх наведених тестових алгоритмів на адекватність.

Для мінімізації випадкової похибки опосередкованих вимірювань для різних тестових алгоритмів було використано двофакторний дисперсійний аналіз таблиць із розрахунковими значеннями вмісту вологи. Такий аналіз використовує перехресну класифікацію результатів відтворювання вмісту вологи для двох факторів впливу: власної діелектричної проникності речовини

і вологості . Для кожної з можливих комбінацій рівнів цих факторів має місце 8 спостережень. Здійснено обчислення відповідних F -статистик. Визначено найбільш важливу статистику і з її використанням проаналізовано тестову алгоритми, що досліджуються в роботі.

П'ятий розділ дисертації присвячений розробці перспективних методів і засобів підвищення точності вологомірів сипких речовин. Досліджено спосіб вимірювання вмісту води, який дозволяє здійснювати ефективну компенсацію сортової невизначеності у первинному вимірювальному перетворювачі. Первинний перетворювач сформовано з чотирьох вимірювальних конденсаторів, призначених для занурення у досліджуваний матеріал або для заповнення цим матеріалом. При цьому два з них заповнюють пробою досліджуваної речовини, інші – пробою такої ж речовини, але попередньо зневодненої.

Визначені математичні моделі характеристик перетворення для одинарного первинного перетворювача, класичного диференційного та первинного перетворювача, сформованого з чотирьох конденсаторів з метою врахування впливу змін гранулометричного складу сипкого матеріалу на результат вимірювання вмісту води, а також впливу температури на інформаційний сигнал.

Наведено функціональну схему методу вимірювання вмісту води. Записане рівняння, що відображує процес вимірювання. Для порівняння використано метод безпосереднього оцінювання вмісту води, що описується моделлю Вінера. Вміст води зафіксовано на рівні 10%. Діелектричну проникність речовини змінювали в межах від 1 до 7. Показано, що запропонований метод дозволяє суттєво зменшити вплив варіації діелектричної проникності речовини на результат вимірювання вмісту води.

Оцінку впливу гранулометричного складу сипкої речовини на результати контролю вологості автор здійснив на основі формули Ліхтенекера. В результаті було отримано математичну модель, яка відображує залежність діелектричної проникності зволоженого матеріалу від діелектричних

проникностей сухої речовини і води, густини і об'єму компонентів зволоженого матеріалу, а також вмісту вологи. Для розрахунків було обрану сипку речовину з діелектричною проникністю, що дорівнює 2, радіусами сферичних часток 1 та 2,5мм і вологістю 20%. Одержано, що похибка від зміни гранулометричного складу для одинарного первинного перетворювача дорівнює 4%, для класичного диференційного – 2,38 % і для первинного перетворювача з чотирьох конденсаторів – 2,02 %.

Оцінено здатність запропонованого методу компенсувати вплив від зміни температури зразка речовини, що контролюється, за умови її збільшення на 20^0 відносно стандартних умов. Для одинарного первинного перетворювача відносна додаткова похибка від зміни температури складає 4,93 %, для класичного диференційного – 1,725 % і для первинного перетворювача з чотирьох конденсаторів – 1,9 %.

Шостий розділ дисертації присвячено розробленню ємнісних первинних перетворювачів, які дозволяють конструктивно реалізувати тестові впливи на речовину з використанням фіксованих добавок води.

Перший перетворювач утворено двома секціями, одна з котрих заповнена досліджуваною речовиною, а друга дозволяє конструктивно реалізувати один тестовий вплив на речовину. Здійснені також розрахунки конструкції, що передбачає використання трьох ідентичних секцій первинного перетворювача, причому в міжелектродний простір двох секцій ємнісного перетворювача вводять капсули певної форми і розмірів з водою, що дозволяє здійснити два тестових впливи на досліджувану речовину. Такі конструкції виключають необхідність використання зневоднених зразків досліджуваного матеріалу, що істотно спрощує вимірювальну процедуру.

Обчислено електричні ємності трьох секцій первинного перетворювача для стандартних температурних умов і перевірено працездатність відповідного тестового алгоритму для сухого матеріалу і вмісту вологи в 20%. Обчислені значення вмісту вологи дорівнюють 0,639% і 20,005% відповідно і знаходяться в межах методичної похибки тестового алгоритму. Після цього

було здійснено оцінку впливу зміни температури на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ для вмісту вологи матеріалу в 20%. Обчислене значення вологості дорівнює 19,707%.

Проте, як відмічає автор, виготовлення і використання у первинному перетворювачі герметичних капсул з водою є складним з точки зору технологічності виробництва. Тому в іншій конструкції первинного перетворювача запропоновано вводити у міжелектродний простір плоскі металічні пластини замість капсул з водою.

Було розраховано усереднені зміни діелектричної проникності бінарної суміші для різних речовин з діелектричними проникностями 2, 2.5, 3, 3.5 і вмістом вологи 0, 10, 20, 30 і 40%. Для цього використовувались формули Вінера, Нільсена, Бруггемана, Кубо-Накамури, Ботчера, Ліхтенеккера і Оделевського. Усереднені зміни діелектричної проникності в контрольних точках заданого вмісту вологи використані автором для обчислення товщин металевих пластин, введених у міжелектродний простір перетворювача.

Удосконалений первинний перетворювач ділиться на три зони, в одній з яких не відбувається тестових впливів на речовину, в другій здійснюється імітація десятивідсоткової добавки води, для чого необхідно забезпечити збільшення ємності цієї зони на 27.64 %. В третій зоні імітують добавку води у двадцять відсотків, для чого електричну ємність цієї зони необхідно збільшити на 59.74 %. З використанням цих даних було обчислено товщину металічних пластин і обчислені електричні ємності конденсаторів в зонах 1,2 і 3 у повітрі. В результаті підстановки значень цих ємностей у вираз для тестового алгоритму, що пропонується, виявилось, що обчислені значення вмісту вологи в точках 0% і 20% дорівнюють, відповідно, 0,77% і 20,157% , тобто знаходяться в межах методичної похибки тестового алгоритму .

Проведено оцінку впливу зміни температури на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ для вмісту вологи матеріалу в 20%. При цьому обчислене значення вологості дорівнює 19,132%. Для зменшення температурної похибки автор рекомендує вводити температурні поправки.

У цьому розділі дисертації наведені результати експериментальних досліджень розроблених методів і засобів вологометрії.

Розроблено чотириканальний перетворювач ємності в напругу, який дозволяє працювати з ємностями від кількох пФ до кількох тисяч пФ. Незважаючи на задовільну роботу цього пристрою, його метрологічні і експлуатаційні характеристики виявились невисокими. Для підвищення точності контролю розроблено ще один макет вторинного вимірювального перетворювача, в якому пасивні RC-фільтри на виходах одновібраторів було замінено на активні фільтри Баттерворта другого порядку, споряджені нормуючими перетворювачами, які дозволяють регулювати вихідні напруги кожного каналу у широких межах.

Проведені експерименти дозволили ще більше удосконалити схему вторинного вимірювального перетворювача вмісту вологи. Зокрема використання активних фільтрів нижніх частот з підключеними до них цифровими потенціометрами, керованими від мікроконтролера, дозволило подавати на входи фільтрів компенсаційні сигнали. Ці сигнали пов'язані з «дрейфом нуля» і наявністю сталої складової на виходах одновібраторів. Використання аналогового мультиплексора, керованого від мікроконтролера, дозволило використати один підсилювач для обох каналів вимірювання і у такий спосіб зменшити інструментальну похибку вторинного перетворювача. Використання у зворотному зв'язку підсилювача цифрового потенціометра, керованого мікроконтролером, дозволило програмно регулювати коефіцієнт підсилення і здійснювати нормування вихідного аналогового сигналу.

За допомогою цього вторинного вимірювального перетворювача проведено серію експериментів. В дисертації докладно описана методика їх проведення. В якості речовин для дослідження використовувались пшенична і перлова крупи, мак, пшоно, горох, а також автомобільне масло і мазут.

Автор відзначає, що сумарну невизначеність вимірювання змісту вологи утворено двома складовими: випадковою, обчисленою за методикою опосередкованих вимірювань, і систематичною, яка виражена середньою

абсолютною похибкою відхилення від номінальних значень вмісту вологи. Визначено основне рівняння вимірювань і формулу для обчислення випадкової складової. Обчислені точкові й інтервальні оцінки для електричних ємностей первинного вимірювального перетворювача і кореляційні зв'язки між ними.

Сумарна невизначеність для запропонованого методу дорівнює 0,72%, а для класичної диференційної схеми – 1,16%. Таким чином, запропонований метод вологометрії має меншу чутливість до зміну сорту матеріалу у порівнянні з класичною диференційною схемою.

Для оцінки точності вимірювання автор також використовує похибку вимірювання вмісту вологи, де систематичну (методичну) складову було виражено через міру відстані обчислених і номінальних значень вмісту вологи, а випадкову складову – як результат опосередкованих вимірювань. Одержані оцінки показують, що запропонований метод забезпечує підвищення точності вимірювання вмісту вологи у порівнянні з найближчим аналогом.

У десяти додатках дисертації наведено результати перевірки обумовленості обчислених значень вмісту вологи, перевірки адекватності запропонованих тестових алгоритмів, результати дисперсійного аналізу різних тестових алгоритмів, результати вимірювання ємностей первинного перетворювача з речовинами у зневодненому стані, речовинами з об'ємним вмістом вологи 10, 20 і 30%, результати впровадження матеріалів дисертаційної роботи і список публікацій здобувача.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовано достатньо чітко, з наведенням кінцевих результатів досліджень.

Результати проведених в дисертаційній роботі досліджень впроваджено у практику таких підприємств і організацій: ТОВ «ВО ОВЕН», ПП «ЄС - Автоматика», УА ТОВ ФІРМА «КОДА», а також в навчальний процес Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Основні наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, є обґрунтованими. Розроблені тестові алгоритми, призначені для

підвищення точності вимірювання вмісту вологи, отримано з використанням методів регресійного аналізу і тестових методів підвищення точності, а результати експериментальних досліджень – у відповідності з положеннями теорії вимірювань. Результати теоретичних досліджень підтверджено практичною перевіркою на виготовлених дослідних зразках і експериментальних установках.

Достовірність результатів досліджень забезпечено коректністю постановки математичних задач, застосуванням стандартних методів теоретичних і експериментальних досліджень, підтвердженням теоретичних положень результатами експериментів та успішним впровадженням у виробничі процеси промислових підприємств України. Їх новизна підтверджується 53 науковими публікаціями: 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 на наукових конференціях. Основні результати наукових досліджень, методики їх проведення, одержані результати, розроблені методи і засоби контролю достатньо повно описані в опублікованих працях.

Зміст автореферату є ідентичним основним положенням дисертації. Дисертація відповідає спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин і є завершеною науковою роботою.

До недоліків дисертації слід віднести наступне.

1. Для розрахунку діелектричних поникностей бінарних систем матеріал – вода в підрозділі 2.1 було обрано формулу Вінера. Доцільно було б проаналізувати інші формули сумішей, визначити їх обмеження для конкретних умов застосування.
2. Аналогічним є зауваження до використання формули Ліхтенекера при визначенні впливу гранулометричного стану речовини на її діелектричну проникність в підрозділі 5.4.1. Тут теж доцільно було б провести обґрунтування як, наприклад, здійснено автором в підрозділі 6.3.

3. Розрахунки щодо кількості часток речовини сферичної форми, спроможних розміститись у корисному об'ємі первинного перетворювача (підрозділ 5.4.1) потребують уточнення. Кубічний, як приймає автор, спосіб укладення часток на практиці не завжди витримується.
4. В дисертації не здійснено оцінку впливу електричної провідності вологої речовини і діелектричних втрат на точність вимірювання вмісту вологи.
5. Слід більш докладно пояснити значення терміну «адаптивний первинний вимірювальний перетворювач», вжитого у другому розділі.
6. Доцільно було б більш докладно обґрунтувати діапазон вимірювання вмісту вологи і діапазон зміни діелектричної проникності зневодненої речовини.
7. Потребує пояснення оптимальність введених у вирази 3.18 і 3.25 поправок.
8. В переліку літератури приведено ряд авторських свідоцтв і патентів зі значним терміном існування. Їх кількість можна було б скоротити.
9. Щодо оформлення дисертації. В тексті дисертації присутня значна кількість числових розрахунків. При цьому проміжні розрахунки в формулах не є потрібними, їх можна скоротити без втрати вірогідності результатів. Немає сенсу в такій значній кількості ілюстрацій щодо процесу вимірювань в розділі 7 – наприклад рис. 7.30 - 7.32, 7.34 – 7.36, 7.42 – 7.46 можна виключити.

Указані недоліки не знижують суттєво цінність дисертаційної роботи.

В дисертаційній роботі Заболотного О.В. на основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовано нові підходи до вирішення науково-технічної проблеми підвищення точності вимірювання вмісту вологи сипких і рідинних речовин при збереженні експресності; розроблені нові методи визначення вмісту вологи, які дозволяють суттєво зменшити вплив зміни сорту речовини на результат вимірювання; здійснено перевірку обумовленості рішень, отриманих завдяки використанню цих методів; створені математичні моделі статичних характеристик перетворення, здатні враховувати вплив зміни сорту, температури і гранулометричного складу досліджуваної речовини; розроблені нові конструкції первинних і схеми вторинних перетворювачів вмісту вологи.

Автором дисертації отримані нові науково обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, що в сукупності є значним досягненням для розвитку дієлькометричної вологометрії речовин агропромислового комплексу і паливно-енергетичної галузі.

Тому вважаю, що дисертація Заболотного О.В. «Розвиток теорії дієлькометричної вологометрії та алгоритмічних методів підвищення точності вимірювання вмісту вологи речовин» відповідає встановленим вимогам п.п. 9, 10, 12 “Порядку присудження наукових ступенів” щодо докторських дисертацій, а її автор О.В. Заболотний заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри електронних обчислювальних
машин Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара



Хандецький В.С.
17.05.2019.

Підпис професора Хандецького В.С. засвідчую.
Вчений секретар Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара



Ходанен Т.В.