

ВІДГУК

офіційного опонента

Щапова Павла Федоровича

на дисертаційну роботу Заболотного Олександра Віталійовича
«Розвиток теорії дієлькометричної вологометрії та алгоритмічних методів
підвищення точності вимірювання вмісту вологи речовин»,
представлену на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук
за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Актуальність теми. В багатьох сферах діяльності людини існує необхідність визначення вмісту вологи. В будівельній, текстильній, харчовій, хімічній промисловості і сільському господарстві значна кількість технологічних процесів тісно пов'язана з контролем вмісту вологи матеріалів в процесі виготовлення і переробки. Так, вологість зерна і інших сільськогосподарчих продуктів є одним з основних факторів, які визначають якість, ефективність подальшої переробки і можливість тривалого зберігання. Тому контроль вмісту вологи різних речовин є актуальним завданням. Забезпечення цільового значення вологості багатьох речовин досягається, насамперед, операцією сушіння, при безпосередньому, в режимі реального часу, або опосередкованому вибірковому контролі поточних значень вологості. Процес сушіння бажано виконувати в автоматичному режимі, при мінімізації впливу на нього людського фактору, який часто буває не кваліфікованим, що може призвести до значних втрат, а це можливо тільки за наявності адекватних математичних моделей і відповідного обладнання. Так, приклади сушіння того ж зерна в автоматичному режимі майже відсутні, а управління вологістю на виході здійснюють за результатами застосування прогностичних алгоритмів.

Слід також відзначити, що одним з перспективних методів контролю вмісту вологи для випадку, коли речовина в процесі зволоження не утворює хімічних зв'язків з водою, є дієлькометричний. Але, окрім вологості на ефективну діелектричну проникність істотно впливають різні сторонні фактори, що викликають появу додаткових невизначеностей вимірювань, що належать до типу В. Типовими джерелами таких невизначеностей є зміна сорту досліджуваної речовини, змінна дисперсність і форма часток, густина, неідентичність процесу ущільнення, сегрегація під час ущільнення, відмінність умов заповнення первинного перетворювача тощо. Широкий спектр факторів, які негативно впливають на точність вимірювань, а також неможливість задовільної компенсації їх впливу є

причинами того, що сучасні експресні засоби вимірювання навіть за умов використання мікроконтролерів із зберіганням статистичних даних та градувальних кривих не здатні подолати бар'єр у 0,5% абсолютної похибки вимірювання вмісту вологи.

В сучасних вологомірах, представлених на ринку, хімічний склад (тобто сорт або тип матеріалу) у більшості випадків враховують шляхом уведення в пам'ять мікропроцесорного блоку калібрувальних кривих або нормуючих коефіцієнтів для максимально можливої кількості речовин, або шляхом використання градувальних таблиць або спеціального калібрування перед кожним вимірюванням (вологоміри Kett, ИВЗ-М1, ИВЗ-М1Т, ЦВЗ-ЗА, WILE-55/65, Sinar AP 6060, Капля, Grain Master, ВСН-100, ВСП-6П, Multi Grain, ФАУНА, Farmpoint, GAC500, HE-50, Superpoint тощо). Та нажаль, хімічний склад і особливості усіх досліджуваних матеріалів спрогнозувати неможливо. Тому згадані вище приклади компенсації зміни сорту речовини мають так звану локальну ефективність і не є універсальними.

Тому удосконалення відомих методів і засобів вимірювання вологості є актуальним і перспективним завданням.

Актуальність теми дисертації також доведено тим, що її етапи 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).

Обґрунтованість результатів та висновків і їх достовірність. Достовірність і обґрунтованість одержаних автором результатів та висновків підтверджено наведеними нижче фактами:

- рукопис містить фундаментальні положення і результати класичних теоретичних досліджень, наведених у науковій літературі, при синтезі й дослідженні нових методів вимірювання вмісту вологи, розробці нових первинних і вторинних вимірювальних перетворювачів, перевірці адекватності нових тестових алгоритмів, дисперсійному аналізі нових тестових алгоритмів, побудові зазначених вище математичних моделей тощо;

- результатами, отриманими при проведенні теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень з використанням запропонованих методів;

- практичною перевіркою результатів теоретичних досліджень на виготовлених дослідних зразках і експериментальних установках;

Вихідні положення дисертації є коректними. Одержані результати, висновки та рекомендації логічно та математично аргументовані, їх справедливість підкріплюється практичним впровадженням.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання. Отримані результати мають важливе значення для практики, зокрема:

- розроблено нові методи вимірювання вмісту вологи з використанням тестових впливів на речовину, які дозволяють зменшити вплив сорту речовини на результат вимірювання вмісту вологи;

- запропоновано диференційний метод вимірювання вмісту вологи з використанням чотирьох вимірювальних конденсаторів, два з яких заповнюють пробою досліджуваної речовини, а інші два – пробою цієї ж речовини, але попередньо зневодненої, який має меншу сумарну невизначеність у порівнянні з класичною диференційною схемою, дозволяє компенсувати вплив сорту речовини і зменшити вплив зміни її гранулометричного складу на результат вимірювання;

- розроблено ємнісні первинні перетворювачі, які дозволяють конструктивно реалізувати потрібну кількість тестових впливів на матеріал і забезпечити експресність вимірювань;

- результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено у практику промислових підприємств і навчальний процес.

Повнота представлення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи 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. Вважаю, що рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях відповідають вимогам МОН України.

Зміст дисертації і основні результати. За результатами аналізу рукопису дисертації Заболотного О.В. можна зробити висновок, що роботу виконано на досить високому науковому рівні, а структура представлених матеріалів є послідовною і логічною.

Вступна частина містить обґрунтування актуальності теми досліджень, вказано об'єкт, предмет і методи дослідження. Зазначено наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, наведено інформацію щодо особистого внеску здобувача, кількості публікацій, структури дисертаційної роботи і кількості публікацій.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану проблеми вимірювання вмісту вологи сипких і рідинних речовин. Проведено досить глибокий аналіз

- практичною перевіркою результатів теоретичних досліджень на виготовлених дослідних зразках і експериментальних установках;

Вихідні положення дисертації є коректними. Одержані результати, висновки та рекомендації логічно та математично аргументовані, їх справедливість підкріплюється практичним впровадженням.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання. Отримані результати мають важливе значення для практики, зокрема:

- розроблено нові методи вимірювання вмісту вологи з використанням тестових впливів на речовину, які дозволяють зменшити вплив сорту речовини на результат вимірювання вмісту вологи;

- запропоновано диференційний метод вимірювання вмісту вологи з використанням чотирьох вимірювальних конденсаторів, два з яких заповнюють пробою досліджуваної речовини, а інші два – пробою цієї ж речовини, але попередньо зневодненої, який має меншу сумарну невизначеність у порівнянні з класичною диференційною схемою, дозволяє компенсувати вплив сорту речовини і зменшити вплив зміни її гранулометричного складу на результат вимірювання;

- розроблено ємнісні первинні перетворювачі, які дозволяють конструктивно реалізувати потрібну кількість тестових впливів на матеріал і забезпечити експресність вимірювань;

- результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено у практику промислових підприємств і навчальний процес.

Повнота представлення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи 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. Вважаю, що рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях відповідають вимогам МОН України.

Зміст дисертації і основні результати. За результатами аналізу рукопису дисертації Заболотного О.В. можна зробити висновок, що роботу виконано на досить високому науковому рівні, а структура представлених матеріалів є послідовною і логічною.

Вступна частина містить обґрунтування актуальності теми досліджень, вказано об'єкт, предмет і методи дослідження. Зазначено наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, наведено інформацію щодо особистого внеску здобувача, кількості публікацій, структури дисертаційної роботи і кількості публікацій.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану проблеми вимірювання вмісту вологи сипких і рідинних речовин. Проведено досить глибокий аналіз

принципів вимірювання вмісту вологи, проаналізовано ринок наявних вологомірів, що випускаються вітчизняними і закордонними виробниками для сипких речовин і нафтопродуктів. Показано, що найбільш розповсюдженими лишаються діелькометричні вологоміри (приблизно 33 % від загальної кількості для сипких матеріалів і 62 % для нафтопродуктів). Крім того, проведено аналіз наявних способів вимірювання вмісту вологи різних матеріалів діелектричної природи: сипких, твердих, пастоподібних і рідинних. Обрано найбільш перспективну з точки зору здобувача групу способів вимірювання вмісту вологи, визначено мету і задачі досліджень.

В другому розділі наведено порівняльний аналіз тестових методів вимірювання вмісту вологи. Виявилось, що відомі методи забезпечують компенсацію зміни сорту речовини лише за суттєвих обмежень, коли зв'язок між вмістом вологи і діелектричною проникністю бінарної суміші вважають лінійним. Нажаль, такі умови мають місце лише для малих значень вмісту вологи обмеженої групи речовин. Здійснений аналіз дозволив виявити три тестових алгоритми, які є дійсно інваріантними до зміни сорту речовини. Але результати обчислення вмісту вологи з їх використанням мають істотні розбіжності з номінальними значеннями в точках 10 % і 20 %. Також мають місце технічні складнощі при формуванні третього тестового впливу на досліджувану речовину. Для формування більш адекватних тестових алгоритмів була графічно визначена функція, яка описує відхилення спрощених аналогів від оригінальної формули Вінера, і здійснено її апроксимацію методом лінійної регресії загального виду. Вдалося забезпечити практично повний збіг спрощеної і оригінальної формул. Це дозволило отриманий новий тестовий алгоритм, але інваріантність до зміни сорту матеріалу забезпечити не вдалося.

Третій розділ містить опис нових методів визначення вмісту вологи з використанням тестових впливів на речовину. Так, спроби отримати нові тестові алгоритми з використанням методу найменших квадратів і поліномів Лагранжа не забезпечили бажаний результат. Наблизитись до вирішення проблеми дозволили методи вимірювання вмісту вологи з використанням одного адитивного і одного мультиплікативного тестів, а також адитивного, мультиплікативного і додаткового тестів. Виявилось, що останній з запропонованих методів забезпечує мінімальну розбіжність між обчисленими і номінальними значеннями вмісту вологи.

В четвертому розділі здійснено теоретичну перевірку обумовленості обчислених значень вмісту вологи, які отримані в результаті застосування запропонованих тестових алгоритмів. Для цього у значення діелектричної проникності зневоднених речовин, обраних для досліджень, уведено випадкову варіацію і перевірено, який вплив ця варіація має на результат обчислення вмісту вологи. Збільшення варіації призводить до зниження обумовленості розрахункових значень, а в певний момент – до втрати працездатності тестового алгоритму. В якості мір обумовленості результатів обчислень вмісту вологи з використанням

запропонованих методів і найближчих аналогів було використано такі міри відстані між обчисленими W_i і номінальними W_n значеннями вмісту вологи як корінь середньоквадратичної похибки $S(W)$ і середня абсолютна похибка $\bar{\Delta}_m$. Також було проаналізовано максимальну розбіжність обчислених значень вмісту вологи $\Delta W_{i \max}$ для відповідних номінальних контрольних точок.

Виявилось, що запропоновані тестові алгоритми мають незадовільну обумовленість, але ситуацію вдалося виправити шляхом синтезу нового тестового алгоритму з набору адитивних, мультиплікативних і додаткових тесових впливів на речовину. Перевірка показала, що новий тестовий алгоритм має найменшу дисперсію адекватності, яка дорівнює $S_{ad\Sigma}^2 = 0,97$. Також було здійснено двофакторний дисперсійний аналіз з повтореннями для вибору найкращої моделі тестового алгоритму шляхом обчислення відповідних F-статистик. Згідно з отриманими даними найкращим з точки зору метрологічних вимог також є тестовий алгоритм.

У п'ятому розділі розроблено перспективний метод вимірювання вмісту вологи, що дозволяє забезпечити незалежність процесу вимірювання від типу досліджуваної речовини. Теоретична оцінка чутливості запропонованого диференційного методу до зміни діелектричної проникності речовини показала, що вплив зміни сорту досліджуваної речовини зменшується майже у 100 разів у порівнянні з методом безпосереднього оцінювання. Запропоновано математичну модель, що описує залежність діелектричної проникності суміші від діелектричної проникності, густини і об'єму її окремих компонентів і дозволяє оцінити вплив змінного гранулометричного складу речовини на результат вимірювання вмісту вологи. Показано, що похибка від зміни гранулометричного складу для запропонованого методу дорівнює 2 %, для класичної диференційної схеми – 2,38 %, а для методу безпосереднього оцінювання – 4 %, тобто метод забезпечує зменшення додаткової похибки від зміни гранулометричного складу речовини.

В шостому розділі здійснено розробку ємнісних первинних перетворювачів, які дозволяють конструктивно реалізувати потрібну кількість тестових впливів на матеріал у формі добавок води. Запропоновані конструкції виключають необхідність безпосереднього додавання порцій води у досліджувану речовину, що істотно спрощує вимірювальну процедуру. Також перевірено працездатність первинних перетворювачів разом із запропонованим тестовим методом вимірювань і оцінено вплив температури на результат вимірювання.

Сьомий розділ присвячено експериментальним дослідженням запропонованих методів вимірювання вмісту вологи. Створені експериментальні для реалізації удосконаленого диференційного і тестового методів вимірювання вмісту вологи. Проведено серію експериментів для визначення рівня впливу сорту речовини на результат вимірювання вмісту вологи з використанням удосконаленого диференційного методу вимірювання вмісту вологи. У порівнянні з класичним диференційним запропонований метод показав меншу чутливість до зміни сорту

речовини. Міра відстані між обчисленими і номінальними значеннями вмісту вологи склала $\bar{\Delta}_m = 0,558\%$ для запропонованого способу і $\bar{\Delta}_m = 1,051\%$ для диференційної схеми вимірювання.

Також було оцінено похибку вимірювання вмісту вологи за умови використання найбільш досконалого серед запропонованих тестових методів вимірювання, де систематичну (методичну) складову сумарної невизначеності було виражено через міру відстані обчислених і номінальних значень вмісту вологи у формі кореня середньоквадратичної похибки, а випадкову складову – як результат обробки багатократних опосередкованих вимірювань. Сумарна невизначеність вимірювання дорівнює $\Delta_\Sigma(W) = 1,24\%$, а для найбільш вдалого з аналогів $\Delta_\Sigma(W) = 2,29\%$. Показано, що запропонований метод забезпечує підвищення точності вимірювання вмісту вологи.

У додатках наведено: результати перевірки обумовленості обчислених значень вмісту вологи для різних тестових алгоритмів; перевірку адекватності запропонованих тестових алгоритмів; зведені результати дисперсійний аналізу різних тестових алгоритмів; результати вимірювання ємностей первинного перетворювача з вологими речовинами; результати вимірювання ємностей первинного перетворювача з речовинами у зневодненому стані; результати вимірювання ємностей первинного перетворювача з речовинами з об'ємним вмістом вологи $W = 10\%$, $W = 20\%$ і $W = 30\%$; результати впровадження матеріалів дисертаційної роботи і список публікацій здобувача.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовано коректно.

Нові наукові результати. В дисертації представлено такі основні пункти наукової новизни.

Вперше проведено перевірку обумовленості наявних методів вимірювання вмісту вологи, що дозволило синтезувати новий метод визначення вмісту вологи, для якого обчислені значення вологості речовини мають кращу обумовленість у порівнянні з наведеними аналогами.

Розроблено новий тестовий метод визначення вмісту вологи, в якому використано два адитивних, два мультиплікативних і два додаткових тестових впливи, використання яких дозволило зменшити вплив від зміни сорту речовини на результат вимірювання вмісту вологи.

Розроблено математичні моделі статичних характеристик перетворення для первинних перетворювачів ємнісного типу, які дозволяють враховувати вплив температури і гранулометричного складу речовини на результат вимірювання вмісту вологи.

Удосконалено диференційний метод вимірювання вмісту вологи сипких і рідинних речовин шляхом використання чотирьох ємнісних чутливих елементів, який дозволяє підвищити точність вимірювання за рахунок ефективної компенсації впливу

сорту і гранулометричного складу досліджуваної речовини на результат вимірювання;

Отримали подальший розвиток тестові методи вимірювання вмісту вологи за рахунок використання нових тестових алгоритмів, нових первинних і вторинних вимірювальних перетворювачів, що дозволило компенсувати вплив сорту речовини на результат вимірювання і забезпечити підвищення точності.

Автореферат дисертації ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і досить повно відображає основні наукові положення, практичну значимість і основні висновки. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з встановленими вимогами.

Зауваження до дисертаційної роботи. В результаті детального вивчення матеріалів рукопису дисертації, поданої на відгук, можна зробити такі зауваження.

1. У першому розділі бракує інформації щодо порівняльного кількісного аналізу метрологічних показників існуючих вітчизняних та закордонних вологомірів (таблиця 1.1) . Лише у двох випадках (сторінка 19 та 22) термін «точність» супроводжується кількісним аналізом (відповідно $\pm 0,1\%$ та $\pm 0,05\%$), але наведені числа стосуються похибок вимірювання, а не точності окрім того, незрозуміло яка вологість (відносна чи приведена) мається на увазі.

2. Висновок щодо істотної різниці розрахункових значень вологості для таблиць 2.2 та 2.3 (рівняння, відповідно, (2.6) та (2.7)) є суб'єктивним і не базується на кількісному статистичному аналізі (розділ 2). Аналогічне зауваження стосується і висновків щодо перевірки незалежності розрахункових значень вологості від діелектричної проникливості (таблиці 2.5 та 2.6).

3. Використання методу найменших квадратів у підрозділі 3.1 не супроводжується перевіркою початкових умов (нормальність або хоча б симетричність) для вибірових даних.

4. Використання в розділі 4 виразу «корінь середньоквадратичного похибки» (сторінки 122, 127, 132 .. 153 – загалом на 10 сторінках) не є коректним. Середньоквадратична похибка це вже корінь з дисперсії випадкових значень вибірових похибок. Більш того, розраховані точкові оцінки середньоквадратичних похибок не є незміщеними, оскільки відсутня корекція на зміщеність оцінок дисперсії похибок при її невеликій кількості. А змішаність вносить адитивну складову в точкову оцінку середньоквадратичної похибки, як міри розбіжності результатів обчислень вологості.

5. В тексті дисертацій не наведено значень діелектричних проникностей досліджуваних речовин у зневодненому стані і не пояснено, згідно з якою методикою їх було визначено.

6. В тексті сьомого розділу не пояснено, чому саме таку схему вторинного перетворення електричної ємності використано під час проведення експериментів. Слід додати також, що маючи описану в розділі 7 експериментальну установку для диференційного методу вимірювань, бажано було б підтвердити підвищення

точності у порівнянні з класичною диференційною схемою експериментальним шляхом, а не лише теоретично.

7. В тексті рукопису дисертації відсутні посилання на повірочні схеми або стандартні методики визначення вмісту вологи зерна і нафтопродуктів. Вважаю також, що необхідно було б додати метрологічну довідку в формі таблиці характеристик точності вимірювальних засобів та методів оцінювання невизначеності результатів експериментальних вимірювань.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Дисертаційна робота здобувача Заболотного О. В. «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 працею, яка у розв'язує важливу науково-технічну проблему підвищення точності вимірювання вмісту вологи сипких і рідинних речовин шляхом зменшення впливу найбільш вагомих сторонніх факторів на результат вимірювання. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р., № 567(зі змінами), 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 промислової та
біомедичної електроніки
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
доктор технічних наук, професор

23.05.2019

Щапов П.Ф.



Відзив надійшов «__» _____ р.
Вчений секретар спец. ради _____