

НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. М. Є. ЖУКОВСЬКОГО
«ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Міністерство освіти і науки України

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ХАРКІВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЗАБОЛОТНИЙ ОЛЕКСАНДР ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 621.317.39

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНОЇ ВОЛОГОМЕТРІЇ ТА АЛГОРИТМІЧНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВМІСТУ ВОЛОГИ РЕЧОВИН

Спеціальність: 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення
складу речовин

Галузь знань: 15 – автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело.

_____ О.В. Заболотний
підпис

Науковий консультант Кошовий Микола Дмитрович
доктор технічних наук, професор

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Заболотний Олександр Віталійович Розвиток теорії діелькометричної вологометрії та алгоритмічних методів підвищення точності вимірювання вмісту вологи речовин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 "Прилади і методи контролю та визначення складу речовин". – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут" МОН України, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, Харків, 2018.

Дисертацію присвячено проблемі підвищення точності вимірювання вмісту вологи різних матеріалів шляхом розроблення нових методів визначення вмісту вологи, синтезу нових тестових алгоритмів для обчислення вмісту вологи і перевірки обумовленості рішень, отриманих завдяки використанню цих алгоритмів, побудови математичних моделей статичних характеристик перетворення, здатних враховувати вплив зміни сорту, температури і гранулометричного складу досліджуваної речовини, а також розробки нових первинних і вторинних перетворювачів вмісту вологи.

Об'єкт дослідження достатньо повно описаний у науковій літературі. В сучасних діелькометричних вологомірах вплив температури враховано шляхом використання поправочних коефіцієнтів, які автоматично або вручну вводяться у кінцевий результат вимірювання. Відмінні гранулометричні характеристики сипких речовин також знижують точність результату вимірювання. Змінний хімічний склад досліджуваних речовин є причиною появи так званої «сортової невизначеності» у зв'язку з тим, що результат вимірювання вмісту вологи істотно залежить від початкової діелектричної проникності (сорту) речовини, яка може суттєво відрізнитись не тільки для різних речовин, але й для різних марок одної речовини.

Предметом дослідження є методи, математичні моделі, а також технічні засоби підвищення точності вимірювань вмісту вологи сипких і рідинних речовин діелькометричними вологомірами. Було здійснено аналіз сучасних принципів вимірювання вмісту вологи сипких матеріалів, в наслідок чого було прийняте

рішення взяти на озброєння дієлькометричний принцип. В межах дієлькометричного принципу було знайдено кілька перспективних способів вимірювання вмісту вологи, але всі вони потребують удосконалення. Відповідно, потребують удосконалення і сучасні конструкції первинних і вторинних перетворювачів вмісту вологи, що підтверджено аналізом сучасних засобів вимірювання вмісту вологи матеріалів.

На точність результату вимірювання вмісту вологи має вплив значна кількість факторів: температура, хімічний склад (тип або сорт), гранулометричний склад (для сипких матеріалів) тощо. Було б цікаво забезпечити можливість компенсації усіх цих сторонніх впливів вже у первинному вимірювальному перетворювачі, що може бути більш ефективним, ніж програмна компенсація, розрахована на конкретні типи матеріалів.

В дисертаційній роботі здійснено порівняльний аналіз відомих способів вимірювання вмісту вологи, що передбачають тестові впливи на речовину. В результаті такого аналізу вдалось встановити наступне. Для більшості відомих методів, використаних для визначення вмісту вологи, вплив «сорової невизначеності» на результат вимірювання є дуже суттєвим. Було виявлено три методи вимірювання, які передбачають два тестових впливи на початковий зразок і дійсно є інваріантними по відношенню до зміни діелектричної проникності речовини ϵ_n . Але, як виявилось, ці методи є досить складними для технічної реалізації, а обчислені з їх допомогою значення вмісту вологи мають істотні розбіжності з номінальними.

З метою удосконалення наявних методів 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, в результаті введення якої у спрощену формулу Вінера вдалося забезпечити практично повний збіг спрощеної і оригінальної формул. Було сформовано новий тестовий алгоритм, який мав забезпечити зменшення розбіжності розрахункових і номінальних значень вмісту

вологи. Дійсно, рівень збігу результатів став дещо вищим, але зникла інваріантність до зміни сорту матеріалу, тому цю спробу не можна вважати вдалою.

Після цього було запропоновано метод вимірювання вмісту води з використанням методу найменших квадратів, який повинен здійснювати компенсацію впливу «сортової невизначеності» на результат вимірювання вмісту води. Такий метод забезпечив задовільну компенсацію «сортової невизначеності» тільки в діапазоні від 0 % до 20 %. Для решти досліджуваного діапазону отримані розрахункові значення не можна вважати адекватними. Далі було запропоновано два методи визначення вмісту води з використанням інтерполяційних поліномів Лагранжа. Це дозволило розширити діапазон працездатності утворених тестових алгоритмів до 30 %, але максимальна розбіжність розрахункових і номінальних значень вмісту води склала 7,4 % і ефективної компенсації «сортової невизначеності» на всьому діапазоні не відбулося.

Наступний метод вимірювання було сформовано з використанням одного адитивного і одного мультиплікативного тестів. За результатами порівняння з трьома найкращими аналогами виявилось, що рівень впливу сорту (зміни діелектричної проникності ϵ_n матеріалів у зневодненому стані) на розрахункові значення вмісту води є дещо більшим, але рівень близькості запропонованого тестового алгоритму до лінійної функції і до номінальних значень вмісту води є вищим, ніж у всіх згаданих аналогів (максимальна розбіжність складає 1,5 % вмісту води у порівнянні з 3,6 % для кращого з аналогів).

З метою зменшення розбіжності між номінальними і розрахунковими значеннями вмісту води було запропоновано метод вимірювання з використанням адитивного, мультиплікативного і додаткового тестів. Рівень впливу сорту на розрахункові значення вмісту води зменшився порівняно з методами вимірювань, розробленими раніше, але лишився більш істотним у порівнянні з кращими аналогами. В той же час ступінь близькості значень вмісту води до лінійної функції і до номінальних значень вмісту води є найвищою, ніж у всіх згаданих вище аналогів. Максимальна розбіжність складає 1,16 % вмісту води у порівнянні

з 1,5 % для методу вимірювання, сформованого з одного адитивного і одного мультиплікативного тестів, і 3,6 % для кращого з аналогів для діапазону вимірювання від 0 % до 40 %. Якщо розглянути діапазон вимірювання вмісту вологи від 0 % до 30 %, максимальна розбіжність складає всього 0,647 %, що набагато краще від решти аналогів.

Експериментальні значення електричних ємностей є випадковими результатами спостережень з природною варіацією. Збільшення варіації призводить до зниження обумовленості тестового алгоритму, а в певний момент – до втрати працездатності. Через це було вперше здійснено теоретичну перевірку обумовленості значень вмісту вологи, отриманих в результаті застосування запропонованих методів. Симетрична варіація уводилась в значення діелектричних проникностей, а рівні варіації було призначено в результаті аналізу метрологічних характеристик сучасних вимірювання електричної ємності, а саме: 0,05 %, 0,1 %, 0,2 % і 0,3 %. Для найкращих аналогів обумовленість рішень зберігається на всьому діапазоні вимірювання від 0 % до 40 %. Методи вимірювань, утворені з використанням методу найменших квадратів і поліномів Лагранжа виявились непридатними для використання через низьку обумовленість значень вмісту вологи (максимальна розбіжність між результатами складає більше 5 %). Запропоновані методи, що були утворені з одного адитивного і одного мультиплікативного тестів та з адитивного, мультиплікативного і додаткового тестів мають низьку обумовленість в контрольних точках 0 % і 10 % вмісту вологи. Тому було синтезовано новий метод визначення вмісту вологи, в якому тестовий алгоритм утворено з двох адитивних, двох мультиплікативних і одного додаткового тестів і використання якого дозволило забезпечити задовільний рівень обумовленості обчислених значень. Було здійснено порівняльний аналіз тестових алгоритмів для трьох найкращих аналогів і останнього з запропонованих варіантів за допомогою двох мір відстані. Показано, що новий метод визначення вмісту вологи забезпечує найменшу розбіжність із номінальними значеннями вмісту вологи і є найбільш придатним для використання.

Далі було запропоновано диференційний метод вимірювання вмісту вологи сипких і рідинних матеріалів, що передбачає використання чотирьох вимірювальних конденсаторів, два з яких заповнюють пробою досліджуваної речовини, а інші два – пробою такої ж речовини, але попередньо зневодненої, який має меншу чутливість до зміни сорту речовини ($\bar{\Delta}_{\Sigma} = 0,72\%$) у порівнянні з класичною диференційною схемою ($\bar{\Delta}_{\Sigma} = 1,16\%$). Вперше отримано математичні моделі статичних характеристик перетворення для ємнісних первинних вимірювальних перетворювачів вмісту вологи, які дозволили провести порівняльний аналіз термокомпенсаційних властивостей одинарного первинного перетворювача, класичного диференційного та первинного перетворювача, сформованого з чотирьох вимірювальних конденсаторів. Також за допомогою отриманих математичних моделей було здійснено порівняльний аналіз спроможності трьох конструкцій первинних перетворювачів компенсувати додаткову невизначеність від зміни гранулометричного складу і доведено доцільність використання запропонованого диференційного методу, який забезпечує більш ефективну компенсацію «сортової невизначеності» при вимірюванні вмісту вологи різних речовин і забезпечує більш якісну компенсацію зміни гранулометричного складу.

Було здійснено розробку ємнісних первинних перетворювачів, які дозволяють конструктивно реалізувати потрібну кількість тестових впливів на матеріал у формі добавок води. Перший первинний перетворювач передбачає використання трьох ідентичних секцій, причому в міжелектродний простір двох секцій уводять капсули з водою певної форми і розмірів, що дозволяє здійснити два тестових впливи на досліджувану речовину. Обчислено електричні ємності трьох секцій первинного перетворювача для температури стандартних умов перевірено працездатність нового методу визначення вмісту вологи з тестовим алгоритмом, утвореним з двох адитивних, двох мультиплікативних і одного додаткового тестів. Показано, що результати обчислень вмісту вологи знаходяться в межах методичної невизначеності тестового алгоритму. Після цього було здійснено оцінку впливу зміни температури на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ для вмісту вологи матеріалу $W = 20\%$. Обчислене

значення дорівнює $W = 19,707\%$, а максимальне відносне значення додаткової температурної невизначеності складає $\delta_w = 1,49\%$. Отже, зміну температури необхідно враховувати у вимірювальній процедурі.

В другій конструкції первинного перетворювача запропоновано вводити у міжелектродний простір плоскі металічні пластини замість капсул з водою. Удосконалений первинний перетворювач також 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 $59,74\%$.

Показано, що результати обчислень вмісту вологи також знаходяться в межах методичної невизначеності тестового алгоритму нового методу визначення вмісту вологи. Максимальне відносне значення додаткової температурної невизначеності складає $\delta_w = 5,09\%$, тому для зменшення температурної складової невизначеності у значення електричних ємностей також необхідно вводити температурні поправки.

Після того, як було розроблено і виготовлено дослідний зразок і макет вторинного вимірювального перетворювача, проведено серію експериментів для визначення рівня впливу сорту речовини на результат вимірювання вмісту вологи з використанням диференційного методу і методу з тестовим алгоритмом, утвореним з двох адитивних, двох мультиплікативних і одного додаткового тестів.

Результати експериментів показали низьку чутливість до зміни сорту речовини.

Результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень використані у практиці таких підприємств і організацій: ТОВ «ВО ОВЕН» (Харків, Україна); ПП «ЄС - Автоматика» (Харків, Україна); УА ТОВ ФІРМА «КОДА» (Харків, Україна); навчальний процес Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Ключові слова: контроль вмісту вологи, діелектрична проникність, сортова невизначеність, тестовий алгоритм, тестові методи вимірювань, обумовленість.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Заболотний О.В. Методы и устройства для измерения влажности бетона / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий, В.М. Тимошенко, А.С. Оганесян, В. А. Гаєвий // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 15. – Полтава: ПолтНТУ. – 2005. – С 145 – 148.
2. Заболотний О.В. Вимірювач вологості матеріалів / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий // Вісник черкаського державного технологічного університету. – Черкаси: ЧДТУ. – 2005. - №3. – С. 128-130.
3. Заболотний О.В. Аналіз метрологічних характеристик ємнісного давача вологості нафтопродуктів / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий // Український метрологічний журнал. – Харків: ННЦ “Інститут метрології”. – 2005. – №4. – С. 54-57.
4. Заболотный А.В. Эволюция первичных измерительных преобразователей влажности нефтепродуктов / А.В. Заболотный, В.А. Заболотный, Н.Д. Кошевой // Радиоэлектронні і комп’ютерні системи. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – 2007. – №5(24). – С. 99 – 102.
5. Заболотний О.В. Спосіб вимірювання вологості сипких матеріалів / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Вип. 57. – Том 2. – Харків: ХНТУСГ, 2007. – С. 247 – 251.
6. Заболотний О.В. Вимірювання вологості нафтопродуктів / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий // Метрологія та прилади. – Харків: ДП «Харківстандартметрологія». – 2008. - № 1 (9). – С. 36 – 41.
7. Заболотный А.В. Лабораторный измеритель влажности нефтепродуктов повышенной точности / А.В. Заболотный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – Москва: «Научтехиздат». – 2008. – №3. – С. 48 – 52.
8. Заболотний О.В. Оцінювання технічної ефективності одного способу вимірювання вологості нафтопродуктів / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий // Вісник

Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – Вип. 73. – Т. 2. – С. 91-92.

9. Заболотный А.В. Поиск эффективного способа измерения влажности сыпучих материалов / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой, А.Н. Сатаров // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. – Вип. 15. – К.: ВІКНУ, 2008. – С. 50 – 57.

10. Заболотный А.В. Построение тестовой зависимости для автоматической коррекции начальной диэлектрической проницаемости вещества в емкостных влагомерах / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой, А.Н. Сатаров // Вісник СевДТУ. – Вип. 95. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – С 40 – 43.

11. Заболотний О.В. Дослідження одного способу компенсації зміни початкової діелектричної проникності речовини у ємнісних вологомірах / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий, А.Н. Сатаров // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – Вип. 87. – С. 61-62.

12. Заболотний О.В. Оцінювання впливу змінного гранулометричного складу сипкого матеріалу на результат вимірювання вологості / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий, А.Н. Сатаров // Метрологія та прилади. – Харків: ДП «Харківстандартметрологія». – 2010. - № 1. – С. 25 – 31.

13. Заболотний О.В. Аналіз метрологічних характеристик перетворювача вологості сипких матеріалів / О.В. Заболотний, В.А. Заболотний, М.Д. Кошовий, А.Н. Сатаров // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. – Вип. 24. – К.: ВІКНУ, 2009. – С. 30 – 37.

14. Заболотный А.В. Экспериментальное исследование суммарной погрешности измерения влажности сыпучих материалов / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, А.Н. Сатаров // Системи обробки інформації. – Вип. 1(91). – Харків: Харківський університет Повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 2011. – С. 95 – 98.

15. Заболотный А.В. Нюансы компенсации «сортовой» неопределенности при формировании тестов для адаптивных влагомеров / А.В. Заболотный // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков: Технологический центр. – 2012. - № 2/9 (56). – С. 47 – 50.

16. Заболотний О.В. Забезпечення задовільного рівня інваріантності адаптивних вологомірів з використанням методу найменших квадратів / О.В. Заболотний // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси: ЧДТУ. – 2012. – № 4. – С. 13 – 17.

17. Заболотный А.В. Техническая реализация аддитивных тестов в емкостном первичном преобразователе диэлькометрического влагомера нефтепродуктов / А.В. Заболотный // Вимрювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - Хмельницький: Хмельницький національний університет. – 2013. – № 3. – С 48-53.

18. Заболотний О.В. Забезпечення інваріантності діелькометричних вологомірів до зміни сорту матеріалу із використанням поліномів Лагранжа / О.В. Заболотний, К.Ю. Голуб, М.Д. Кошовий // Вісник НТУУ «КПІ». – Київ: НТУУ «КПІ». – 2013. – Вип. 45. – С. 116 – 122.

19. Заболотний О.В. Розроблення методики визначення вологовмісту пилу під час випробувань апаратури системи управління різного призначення на стійкість до впливу пилу / О.В. Заболотний, К.Ю. Голуб, О.В. Чумаченко // Метрологія та прилади. – Харків: ДП «Харківстандартметрологія». – 2014. – № 1 (45). – С. 18 – 23.

20. Заболотний О.В. Оцінка точнісних характеристик методики визначення вологовмісту під час випробувань апаратури системи управління різного призначення на стійкість до впливу пилу / О.В. Заболотний, К.Ю. Голуб, О.В. Чумаченко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький: Хмельницький національний університет. – 2014. - № 3 (213). – С. 7 – 14.

21. Заболотный А.В. Применение тестового подхода для обеспечения инвариантности диэлькометрических влагомеров к сорту вещества /

А.В. Заболотный, Е.Ю. Голуб, Н.Д. Кошевой // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – Харків: «ХАІ». – 2014. - № 4. – С. 60 – 66.

22. Zabolotnyi A. Synthesis of test actions for capacitive moisture meter that is invariant to change of substance type / A. Zabolotnyi, E. Golub, N. Koshevoj, I. Kirichenko // Teka. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international quarterly journal on motorization, vehicle operation, energy efficiency and mechanical engineering. – Lublin-Rzeszów. – 2014, Vol. 14, No.2, p. 43-52.

23. Заболотний О.В. Synthesis of test actions for capacitive moisture meter that is invariant to substance type change / О.В. Заболотний, К.Ю. Голуб // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: інформаційні системи та мережі. – Львів: Видавництво Львівської політехніки. – 2014. – № 805. – С. 70 – 79.

24. Заболотный А.В. Компенсация «сортовой неопределенности» измерений влажности диэлькометрическими влагомерами. Часть 1. Сравнительный анализ методов определения влажности веществ / А.В. Заболотный, Е.Ю. Голуб // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – Харків: «ХАІ». – 2015. - № 2. – С. 28 – 35.

25. Заболотний О.В. Порівняльний аналіз тестових методів підвищення точності діелькометричних вологомірів / О.В. Заболотний, К.Ю. Голуб // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, ІФНТУНГ. – 2015. – № 1(54). – С. 112 – 119.

26. Заболотний О.В. Експериментальні дослідження перспективного способу визначення вологості речовин / О.В. Заболотний, К.Ю. Голуб, В.А. Заболотний // Метрологія та прилади. – Харків: ДП «Харківстандарт-метрологія». – 2015. - № 4 (54). – С. 12 – 20.

27. Заболотний О.В. Способи компенсації «сортової невизначеності» діелькометричних вологомірів / О.В. Заболотний, К.Ю. Голуб // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія: автоматика, вимірювання та керування. – Львів: Львівська політехніка. – 2015. - № 821. – С. 105 – 113.

28. Заболотный А.В. Компенсация «сортовой неопределенности» измерений влажности диэлькометрическими влагомерами. Поиск способа / А.В. Заболотный, Е.Ю. Голуб // Вісник Дніпропетровського університету. – Дніпропетровськ: Видавництво ПП «Ліра ЛТД». – 2015. – № 4. – Том 23. – С. 24 – 32.

29. Заболотний О.В. Експериментальні дослідження перспективного способу вимірювання вмісту вологи сипких речовин / О.В. Заболотний // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – Одеса: ОДАТРЯ, – 2017. – Вип. 2(11). – С. 32 – 39.

30. Zabolotnyi O. V. Conditionality examination of the new testing algorithms for coal-water slurries moisture measurement / O. V. Zabolotnyi, V. A. Zabolotnyi, M. D. Koshevoi // Scientific bulletin of National mining university. – Dnipro: PP KF “Gerda”. – 2018. – № 1 (163). – P. 51 – 59.

31. Пат. UA 69824 А Україна, МПК G01N 27/22. Датчик вологості нафтопродуктів / Заболотний О. В., Кошовий М. Д. Казимов Р.А.; заявник і патентовласник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», № 20031211248; заявл. 09.12.2003; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 10. – 3 с., іл.

32. Пат. UA 78115 Україна, МПК G01N 27/22. Вимірювач вологості матеріалів / Заболотний О. В., Заболотний В. А., Кошовий М. Д.; заявник і патентовласник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», № a2005034425; заявл. 12.04.2005; опубл. 15.02.2007, Бюл. №2. – 3 с., іл.

33. Пат. UA 33704 Україна, МПК G01N 27/22. Первинний вимірювальний перетворювач вологості нафтопродуктів / Заболотний О. В.; заявник і патентовласник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», № u200802016; заявл. 18.02.2008; опубл. 10.07.2008, Бюл. №13. – 3 с., іл.

34. Пат. UA 40939 Україна, МПК G01N 27/22. Первинний перетворювач вологості нафтопродуктів / Заболотний О. В., Кошовий М. Д., Саттаров А.Н.; заявник і патентовласник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», № u200814590; заявл. 18.12.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8. – 3 с., іл.

35. Пат. UA 89376 Україна, МПК G01N 27/22. Перетворювач вологості / Заболотний О. В., Кошовий М. Д., Саттаров А.Н.; заявник і патентовласник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», № а200701506; заявл. 12.02.2007; опубл. 25.01.2010, Бюл. № 2. – 7 с., іл.

36. Пат. UA 50763 Україна, МПК G01N 27/22. Вторинний вимірювальний перетворювач вологості матеріалів / Заболотний О. В., Кошовий М. Д., Саттаров А.Н.; заявник і патентовласник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», № u200912832; заявл. 10.12.2009; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12. – 3 с., іл.

37. Пат. UA 104201 Україна, МПК G01N 27/22. Спосіб вимірювання вологості матеріалів / Заболотний О. В.; заявник і патентовласник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», № а201201992; заявл. 21.02.2012; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 8 с., іл.

38. Пат. UA 107722 Україна, МПК G01N 27/22. Первинний перетворювач вологості нафтопродуктів адаптивного вологоміра / Заболотний О. В., Голуб К.Ю.; заявник і патентовласник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», № а201303175; заявл. 15.03.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3. – 4 с., іл.

39. Пат. UA 116577 Україна, МПК G01N 27/22. Спосіб вимірювання вологості матеріалів / Заболотний О. В.; заявник і патентовласник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», № а201603949; заявл. 11.04.2016; опубл. 10.04.2018, Бюл. № 7. – 8 с., іл.

40. Заболотний, О. В. Вимірник вологості нафтопродуктів / О.В. Заболотний, В.А. Заболотний, М.Д. Кошовий // Датчики, прилади та системи – 2008: тез. доп. IV Міжнар. наук.-техніч. конф., 20 – 23 вересня 2008 р. – Черкаси – Гурзуф, 2008. – С. 73–74.

41. Заболотный, А.В. Методология проектирования информационно-измерительных систем контроля параметров энергоносителей летательных аппаратов и промышленных топливно-энергетических комплексов / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой, В.А. Кныш // Управление, автоматизация и

окружающая среда: тез. док. Междунар. науч.-технич. конф., 8 – 13 сентября 2008 г., – Севастополь, 2008. – С. 25–27.

42. Заболотный, О. В. Измерительные преобразователи систем контроля параметров энергоносителей летательных аппаратов и промышленных топливно-энергетических комплексов / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой, А.Г. Михайлов и др. // Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки: тез. доп. VII Міжнар. наук.-технич. конф., 23 – 24 квітня 2009 р. – Київ, 2008. – Частина 1. – С. 73–74.

43. Заболотный, О. В. Первинний перетворювач вологості нафтопродуктів / О.В. Заболотный, М.Д. Кошовий, А.Н. Саттаров // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2009): тез. доп. II Міжнар. наук.-практич. конф., 25 – 28 травня 2009 р. – Київ, 2009. – С. 303–305.

44. Заболотный, А.В. Способ частичной компенсации сортовой погрешности при измерении влажности материалов диэлькометрическим методом / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошевой, А.Н. Саттаров // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: тез. док. Междунар. науч.-технич. конф., 7 – 12 сентября 2009 г., – Севастополь, 2009. – С. 199–201.

45. Заболотный, А. В. Построение математической модели измерений для термогравиметрического метода определения влагосодержания веществ / Е. Ю. Голуб, А. В. Заболотный, А. В. Чумаченко // Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке : материалы XVIII Междунар. молодёжн. форума, 14 – 16 апреля 2014 г. / М-во образования и науки Украины, Харьк. Нац. ун-т радиоэлектроники. – Харьков, 2014. – Т. 1. – С. 39–40.

46. Заболотный, А. В. Оценка точностных характеристик диэлькометрического метода определения влагосодержания твёрдых веществ / Е. Ю. Голуб, А. В. Заболотный, А. В. Чумаченко // Людина і Космос : тез. докл. XVI Междунар. молодёжн. науч.-практич. конф., 9 – 11 апреля 2014 г. – Днепропетровск, 2014. – С. 225.

47. Заболотный, О. В. Вологість як показник якості матеріалів, призначених для використання в Космосі. Спосіб визначення вологості / К. Ю. Голуб,

О. В. Заболотний // Сергеевські читання : тез. доп. наук.-техніч. конф., 11 – 12 вересня 2014 р. / Нац. техніч. ун-т «ХПІ», НВП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД. – Харків, 2014. – С. 40–41.

48. Заболотний, О. В. Аналіз сучасного стану проблеми вимірювання вологості речовин / К. Ю. Голуб, О. В. Заболотний // Technical Using of Measurement – 2015 : тез. доп. Всеукр. наук.-техніч. конф. молодих вчених у царині метрології, 2 – 6 лютого 2015 р. – Славське, 2015. – С. 32–34.

49. Заболотний, О. В. Пошук ефективного способу компенсації «сортової невизначеності» вимірювань діелькометричними вологомірами з використанням тестових методів / К. Ю. Голуб, О. В. Заболотний // Інформатика, математика, автоматика ІМА–2015 : тез. доп. наук.-техніч. конф., 20 – 25 квітня 2015 р. – Суми, 2015. – С. 112.

50. Заболотний, О. В. Проведення порівняльної оцінки способів компенсації «сортової невизначеності» діелькометричних вологомірів / К. Ю. Голуб, О. В. Заболотний // Людина і Космос : тез. доп. XVII Міжнар. молодіжн. наук.-практич. конф., 8 – 10 квітня 2015 р. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 185.

51. Заболотний, О. В. Апробація обраного способу компенсації «сортової невизначеності» вимірювань діелькометричними вологомірами / К. Ю. Голуб, О. В. Заболотний // Приладобудування : стан і перспективи : тез. доп. XIV Міжнар. наук.-техніч. конф., 22 – 23 квітня 2015 р. / М-во освіти і науки України, Нац. техніч. ун-т України «КПІ». – К., 2015. – С. 77–78.

52. Заболотний, О. В. Первинний вимірювальний перетворювач вмісту вологи речовин, в якому конструктивно реалізовано принцип додавання води / О. В. Заболотний // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: тез. доп. IV Міжнар. наук. конф., 31 жовтня – 2 листопада 2017 року / М-во освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2017. – С. 125 – 126.

53. Заболотний, О. В. Метод вимірювання вмісту вологи для адаптивних вологомірів ємнісного типу / О. В. Заболотний // International Trends in Science and Technology: materials of V International Scientific and Practical Conference, august 31 /

Research and Scientific Group RS Global Sp.z O.O. – Warsaw, Poland, 2018. –
P. 6 – 12.

ANNOTATION

Zabolotnyi Oleksandr. Theory of Dielectric Moisture Metering and Algorithmic Methods of Accuracy Increase Development for Different Substances Moisture Metering. – Qualification scientific work at the manuscript rights.

Dissertation for Doctor Degree of Technical Science (Doctor of Science) in specialty 05.11.13 “Devices and Methods of Control and Defining the Composition of Materials”. – National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” Ministry of Education and Science of Ukraine, National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The dissertation is dedicated to the problem of different materials moisture measurement accuracy increase in a way of new methods of moisture measurement development, synthesis of a new testing algorithms to calculate the quantity of moisture, conditionality examination for the solutions, received with a help of new testing algorithms, development of a new mathematical models of a static transformation characteristics, able to consider the influence of material’s type, temperature and granulometric composition of a material under research, and new initial and secondary transducers of moisture measurement development.

The object of investigation has been widely documented, described and implemented in the scientific literature. For modern dielectric moisture meters temperature influence can be considered by using adjusting coefficients, implemented automatically or by hands to the result of measurement. Different granulometric structure of dry materials decrease the accuracy of measurements. Variable chemical composition of the materials under research is a reason for so-called “type uncertainty”, because the result of measurement strongly depends from the dielectric permittivity (type) of a material, and it can be significantly different not only for different materials, but for the various types of the same material.

Subject of the research are methods, mathematical models and technical means of capacitance moisture meters for dry and liquid materials accuracy increase. The analysis of modern moisture measurement principles for dry and liquid materials with capacitance

moisture meters had been carried out. As a result the dielectric principle of measurement had been taken for the research. Inside the dielectric principle several perspective methods of moisture measurement had been found, but all of them have to be improved. Accordingly, modern initial and secondary transducers of moisture quantity have to be improved too, and it was confirmed by the results of modern moisture meters analysis.

Significant number of factors influence the accuracy of moisture measurement result: temperature, chemical composition (type of a material), granulometric structure (for dry materials), etc. It would be interesting to provide the possibility to compensate all that negative effects directly inside the initial transducer, what can be more effective, than the program compensation applied for certain list of materials.

In the dissertation we can find a comparative analysis of already developed methods of moisture measurement, provided for testing influences on the material under research. As a result, it was determined that for most of already developed testing algorithms used to calculate the result of moisture measurement the influence of “type uncertainty” is significant. Only three methods of measurement had been found with two testing influences on the material, that are really invariant to the variation of material’s initial dielectric permittivity. But these methods are complicated for technical implementation and give the values of moisture, rather different from standard values for the taken control points.

To synthesize more adequate methods the function, which describes deviation of a simplified test from the universal Wiener equation, had been graphically defined with its approximation by the instruments of general type linear regression. The function of amendment had been received after approximation. Adding it to the simplified Wiener equation allowed to provide complete overlap of simplified and original Wiener formulas. The new testing algorithm, that should decrease variation between calculated and standard moisture values had been created. Really, decrease of variation had been provided, but invariance to the type of material disappeared. These attempt can not be called successful.

After that a new principle of moisture measurement using least squares method had been suggested, able to compensate the “type uncertainty” influence on the result of

moisture measurement. These method provided satisfactory “type uncertainty” compensation only for the 0...20 % moisture range. For the rest of the moisture range, taken under research, calculated moisture values are not adequate. Two more methods, using different Lagrange polynomials, had been researched. It allowed to wide the adequate range of moisture values up to 30 %, but maximal variation still has a value of 7,4 % and we don't have effective “type uncertainty” compensation.

Next method of measurement had been synthesized from one additive and one multiplicative test. Comparison with three best analogues show, that the material's type influence on the calculated moisture values is stronger, but the deviation from linear function and standard moisture values is lower (maximal deviation has a value of 1,5 % in comparison with 3,6 % for the best analogue).

To decrease variation between standard and calculated values of moisture new method of measurement with one additive, one multiplicative and one complementary tests was suggested. Level of “type uncertainty” decreased in comparison with previous testing algorithms, but remained bigger than for the best analogues. At the same time level of concurrence for that method to the linear function and standard moisture values is the best among all the taken analogues. Maximal variation has a value of 1,16 % in comparison with 1,5 % for the previous method and 3,6 % for the best of three mentioned analogues taking the full range of moisture measurement from 0 % to 40 %. If we take a range from 0 % to 30 %, maximal variation will take a value of 0,647 %, what is much better than all the analogues have.

Experimental values of electrical capacitances are random results with natural variation. Variation increase leads to the decrease of testing algorithm conditionality up to the moment when it stops working. Because of that for the first time it was done theoretical verification of the moisture values conditionality, obtained with a help of developed testing algorithms application. Symmetric variation had been implemented to the values of dielectric permittivity, and the lewels of variation were appointed after modern capacitance meters metrological characteristics analysis: 0,05 %, 0,1 %, 0,2 % and 0,3 %. Best three analogues, mentioned before, have good conditionality of calculated moisture values for the whole range of measurement from 0 % to 40 %. Methods, created

with a help of least squares method and Lagrange polynomials happened to be unusable because of low moisture values conditionality (maximal divergence between the results overcomes 5 %). methods, created from one additive and one multiplicative test and from additive, multiplicative and complementary tests, have low moisture values conditionality in a points 0 % and 10 % of moisture control. That's why the new method of moisture measurement, where a testing algorithm had been constructed from two additive, two multiplicative and two complementary tests had been developed. It's application allowed to provide conditionality of calculated moisture values at satisfactory level. A comparison analysis had been fulfilled for three best analogues and the last testing algorithm with a help of two measures of distance. It allowed to see that new method of moisture measurement provides the smallest deviation with standard moisture values and is preferable to use.

During further researches a new differential method of moisture measurement for dry and liquid materials had been suggested. It provides the usage of four measuring capacitors, where two of them are filled with a probe of the material under research and the rest of capacitors should be filled with same material, but previously dehydrated. The method provides low sensitivity to the type of researched material ($\bar{\Delta}_{\Sigma} = 0,72\%$) in comparison with traditional differential method of measurement ($\bar{\Delta}_{\Sigma} = 1,16\%$).

New mathematical models of a static transformation characteristics for the capacitance initial measuring transducers have been received for the first time, that allowed to fulfill the comparison analysis of thermal compensation properties for single initial transducer, classic differential transducer and a transducer, created from four measuring capacitors. Besides, new mathematical models helped to analyse the ability of three initial transducers to compensate the variable granulometric structure complementary error and to prove the expediency of the new differential method of moisture measurement usage, because it provides more effective "type uncertainty" compensation for the process of different materials moisture measurement and better compensation of granulometric structure variation.

New capacitance initial transducers had been developed that allow to implement necessary number of testing influences on the materials in a form of water supplements. First initial transducer foresees usage of three identical sections, where the capsules with water of a certain form and dimensions are introduced into the space between electrodes of two sections. It allows to create two testing influences on the material under research. Electrical capacitances for the three sections of initial transducer had been calculated for the standard conditions temperature. The operability of a new method of moisture measurement with a testing algorithm, created from two additive, two multiplicative and one complementary tests had been tested. It has been shown that the results of moisture calculation belong to the range testing algorithm's methodical uncertainty. The temperature variation in a range of 20 °C influence for $W = 20\%$ moisture value had been estimated. Calculated moisture value happened to be equal $W = 19,707\%$, and maximal relative value of a complementary temperature error has a value $\delta_W = 1,49\%$. It means that temperature variation has to be accounted during the process of measurement.

Another capacitance initial transducer's design foresees introduction of flat metallic plates into the space between electrodes instead of capsules with water. Modified initial transducer still consists of three zones, where the first zone is free from testing influences on the material. Second zone performs 10 % of water supplement simulation and the capacitance of that zone should be increased on 27,64 %. In the third zone 20 % of water supplement is being simulated and its capacitance should be increased in 59,74 %.

It was proved that calculated moisture values still belong to the range of testing algorithm's methodical uncertainty for the new method of moisture measurement. Maximal value of relative complementary temperature error is $\delta_W = 5,09\%$. To reduce the temperature error it is necessary to implement temperature corrections to the values of electric capacitances.

After the secondary transducer pilot sample had been developed, some number of experiments had been carried out to define the level of material's type influence on the result of moisture measurement when using the new differential method and a method with testing algorithm, synthesized from two additive, two multiplicative and one

complementary tests. Results of these experiments showed low sensitivity to the material's type variation.

Results of fulfilled theoretical and experimental researches are implemented in practice of such a firms and organizatios: limited company “VO OVEN” (Kharkiv, Ukraine); industrial enterprise “ES – Automatica” (Kharkiv, Ukraine); limited company “KODA” (Kharkiv, Ukraine); in the learning process of National Aerospace University (Kharkiv, Ukraine).

Keywords: moisture control, dielectric permittivity, type uncertainty, testing algorithm, testing methods of measurement, conditionality.

List of publications at the topic of dissertation

1. Zabolotnij O.V. Metody i ustrojstva dlja izmerenija vlazhnosti betona / O.V. Zabolotnij, M.D. Koshovij, V.M. Timoshenko, A.S. Oganjesjan, V. A. Gaevij // Zbirnik naukovih prac' (galuzeve mashinobuduvannja, budivnictvo). – Vip. 15. – Poltava: PoltNTU. – 2005. – S. 145 – 148.

2. Zabolotnij O.V. Vimirjuvach vologosti materialiv / O.V. Zabolotnij, M.D. Koshovij // Visnik cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. – Cherkasi: ChDTU. – 2005. - №3. – S. 128-130.

3. Zabolotnij O.V. Analiz metrologichnih harakteristik emnisnogo davacha vologosti naftoproduktiv / O.V. Zabolotnij, M.D. Koshovij // Ukraïns'kij metrologichnij zhurnal. – Harkiv: NNC “Institut metrologii”. – 2005. – №4. – S. 54-57.

4. Zabolotnyj A.V. Jevoljucija pervichnyh izmeritel'nyh preobrazovatelej vlazhnosti nefteproduktov / A.V. Zabolotnyj, V.A. Zabolotnyj, N.D. Koshevoj // Radioelektronni i komp'juterni sistemi. – Harkiv: Nacional'nij aerokosmichnij universitet im. M.C. Zhukovs'kogo «HAI». – 2007. – №5(24). – S. 99 – 102.

5. Zabolotnij O.V. Sposib vimirjuvannja vologosti sipkih materialiv / O.V. Zabolotnij, M.D. Koshovij // Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka. – Vip. 57. – Tom 2. – Harkiv: HNTUSG, 2007. – S. 247 – 251.

6. Zabolotnij O.V. Vimirjuvannja vologosti naftoproduktiv / O.V. Zabolotnij, M.D. Koshovij // Metrologija ta priladi. – Harkiv: DP «Harkivstandartmetrologija». – 2008. - № 1 (9). – S. 36 – 41.

7. Zabolotnyj A.V. Laboratornyj izmeritel' vlazhnosti nefteproduktov povyshennoj tochnosti / A.V. Zabolotnyj // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – Moskva: «Nauchtehizdat». – 2008. – №3. – S. 48 – 52.

8. Zabolotnij O.V. Ocinjuvannja tehnicnoiï effektivnosti odnogo sposobu vimirjuvannja vologosti naftoproduktiv / O.V. Zabolotnij, M.D. Koshovij // Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka. – Harkiv: HNTUSG, 2008. – Vip. 73. – T. 2. – S. 91-92.

9. Zabolotnyj A.V. Poisk jeffektivnogo sposobu izmerenija vlazhnosti sypuchih materialov / A.V. Zabolotnyj, N.D. Koshevoj, A.N. Satarov // Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiïvs'kogo nacional'nogo universitetu im. Tarasa Shevchenka. – Vip. 15. – K.: VIKNU, 2008. – S. 50 – 57.

10. Zabolotnyj A.V. Postroenie testovoj zavisimosti dlja avtomaticheskoy korrekcii nachal'noj dijelektricheskoy pronicaemosti veshhestva v emkostnyh vlagomerah / A.V. Zabolotnyj, N.D. Koshevoj, A.N. Satarov // Visnik SevDTU. – Vip. 95. – Sevastopol': SevNTU, 2009. – S 40 – 43.

11. Zabolotnij O.V. Doslidzhennja odnogo sposobu kompensaciiï zmini pochatkovoï dielektrichnoiï proniknosti rehovini u emnisnih vologomirah / O.V. Zabolotnij, M.D. Koshovij, A.N. Sattarov // Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka. – Harkiv: HNTUSG, 2009. – Vip. 87. – S. 61-62.

12. Zabolotnij O.V. Ocinjuvannja vplivu zminnogo granulometricnogo skladu sipkogo materialu na rezul'tat vimirjuvannja vologosti / O.V. Zabolotnij, M.D. Koshovij, A.N. Sattarov // Metrologija ta priladi. – Harkiv: DP «Harkivstandartmetrologija». – 2010. - № 1. – S. 25 – 31.

13. Zabolotnij O.V. Analiz metrologichnih harakteristik peretvorjuvacha vologosti sipkih materialiv / O.V. Zabolotnij, V.A. Zabolotnij, M.D. Koshovij, A.N. Sattarov //

Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiivs'kogo nacional'nogo universitetu im. Tarasa Shevchenka. – Vip. 24. – K.: VIKNU, 2009. – S. 30 – 37.

14. Zabolotnyj A.V. Jeksperimental'noe issledovanie summarnoj pogreshnosti izmerenija vlazhnosti sypuchih materialov / A.V. Zabolotnyj, N.D. Koshevoj, E.M. Kostenko, A.N. Satarov // Sistemi obrobki informacii. – Vip. 1(91). – Harkiv: Harkivs'kij universitet Povitrijanij sil im. Ivana Kozheduba, 2011. – S. 95 – 98.

15. Zabolotnyj A.V. Njuansy kompensacii «sortovoj» neopredelennosti pri formirovanii testov dlja adaptivnyh vlagomerov / A.V. Zabolotnyj // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – Har'kov: Tehnologicheskij centr. – 2012. – № 2/9 (56). – S. 47 – 50.

16. Zabolotnij O.V. Zabezpechennja zadovil'nogo rivnja invariantnosti adaptivnih vologomiriv z vikoristannjam metodu najmenshij kvadrativ / O.V. Zabolotnij // Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. – Cherkasi: ChDTU. – 2012. – № 4. – S. 13 – 17.

17. Zabolotnyj A.V. Tehnicheskaja realizacija additivnyh testov v emkostnom pervichnom preobrazovatele dijel'kometricheskogo vlagomera nefteproduktov / A.V. Zabolotnyj // Vimrjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnijh procesah. – Hmel'nic'kij: Hmel'nic'kij nacional'nij universitet. – 2013. – № 3. – S. 48 – 53.

18. Zabolotnij O.V. Zabezpechennja invariantnosti diel'kometrichnijh vologomiriv do zmini sortu materialu iz vikoristannjam polinomiv Lagranzha / O.V. Zabolotnij, K.Ju. Golub, M.D. Koshovij // Visnik NTUU «KPI». – Kiiv: NTUU «KPI». – 2013. – Vip. 45. – S. 116 – 122.

19. Zabolotnij O.V. Rozroblennja metodiki viznachennja vologovmistu pilu pid chas viprobuvan' aparaturi sistemi upravlinnja riznogo priznachennja na stijkist' do vplivu pilu [Tekst] / O.V. Zabolotnij, K.Ju. Golub, O.V. Chumachenko // Metrologija ta priladi. – Harkiv: DP «Harkivstandartmetrologija». – 2014. – № 1 (45). – S. 18 – 23.

20. Zabolotnij O.V. Ocinka tochnisnijh karakteristik metodiki viznachennja vologovmistu pid chas viprobuvan' aparaturi sistemi upravlinnja riznogo priznachennja na stijkist' do vplivu pilu / O.V. Zabolotnij, K.Ju. Golub, O.V. Chumachenko // Visnik

Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. – Hmel'nic'kij: Hmel'nic'kij nacional'nij universitet. – 2014. - № 3 (213). – S. 7 – 14.

21. Zabolotnyj A.V. Primenenie testovogo podhoda dlja obespechenija invariantnosti dijel'kometricheskikh vlagomerov k sortu veshhestva / A.V. Zabolotnyj, E.Ju. Golub, N.D. Koshevoj // Radioelektronni i komp'juterni sistemi. – Harkiv: «HAI». – 2014. - № 4. – S. 60 – 66.

22. Zabolotnyi A. Synthesis of test actions for capacitive moisture meter that is invariant to change of substance type / A. Zabolotnyi, E. Golub, N. Koshevoj, I. Kirichenko // Tekh. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international quarterly journal on motorization, vehicle operation, energy efficiency and mechanical engineering. – Lublin-Rzeszów. – 2014, Vol. 14, No.2, p. 43-52.

23. Zabolotnij O.V. Synthesis of test actions for capacitive moisture meter that is invariant to substance type change / O.V. Zabolotnij, K.Ju. Golub // Visnik Nacional'nogo universitetu «L'vivs'ka politehnika». Serija: informacijni sistemi ta merezhi. – L'viv: Vidavnictvo L'vivs'koï politehniki. – 2014. – № 805. – S. 70 – 79.

24. Zabolotnyj A.V. Kompensacija «sortovoj neopredelennosti» izmerenij vlazhnosti dijel'kometricheskimi vlagomerami. Chast' 1. Sravnitel'nyj analiz metodov opredelenija vlazhnosti veshhestv / A.V. Zabolotnyj, E.Ju. Golub // Radioelektronni i komp'juterni sistemi. – Harkiv: «HAI». – 2015. - № 2. – S. 28 – 35.

25. Zabolotnij O.V. Porivnjal'nij analiz testovih metodiv pidvishhennja tochnosti diel'kometrichnih vologomiriv / O.V. Zabolotnij, K.Ju. Golub // Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovishh. – Ivano-Frankivs'k, IFNTUNG. – 2015. – № 1(54). – S. 112 – 119.

26. Zabolotnij O.V. Eksperimental'ni doslidzhennja perspektivnogo sposobu viznachennja vologosti rechovin / O.V. Zabolotnij, K.Ju. Golub, V.A. Zabolotnij // Metrologija ta priladi. – Harkiv: DP «Harkivstandart-metrologija». – 2015. - № 4 (54). – S. 12 – 20.

27. Zabolotnij O.V. Sposobi kompensacii «sortovoï neviznachenosti» diel'kometrichnih vologomiriv / O.V. Zabolotnij, K.Ju. Golub // Visnik nacional'nogo

universitetu «L'vivs'ka politehnika». Serija: avtomatika, vimirjuvannja ta keruvannja. – L'viv: L'vivs'ka politehnika. – 2015. – № 821. – S. 105 – 113.

28. Zabolotnyj A.V. Kompensacija «sortovoj neopredelennosti» izmerenij vlazhnosti dijel'kometricheskimi vlagomerami. Poisk sposoba / A.V. Zabolotnyj, E.Ju. Golub // Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. – Dnipropetrovs'k: Vidavnictvo PP «Lira LTD». – 2015. – № 4. – Tom 23. – S. 24 – 32.

29. Zabolotnij O.V. Eksperimental'ni doslidzhennja perspektivnogo sposobu vimirjuvannja vmistu vologi sipkih rechovin / O.V. Zabolotnij // Zbirnik naukovih prac' Odes'koï derzhavnoï akademii tehničnogo reguljuvannja ta jakosti. – Odesa: ODATRJa, – 2017. – Vip. 2(11). – S. 32 – 39.

30. Zabolotnyi O. V. Conditionality examination of the new testing algorithms for coal-water slurries moisture measurement / O. V. Zabolotnyi, V. A. Zabolotnyi, M. D. Koshevoi // Scientific bulletin of National mining university. – Dnipro: PP KF “Gerda”. – 2018. – № 1 (163). – P. 51 – 59.

31. Pat. UA 69824 A Ukraïna, MPK G01N 27/22. Datchik vologosti naftoproduktiv / Zabolotnij O. V., Koshovij M. D. Kazimov R.A.; zajavnik i patentovlasnik Nac. aerokosmich. un-t im. M. Ć. Zhukovs'kogo «Hark. aviac. in-t»), № 20031211248; zajavl. 09.12.2003; opubl. 15.09.2004, Bjul. № 10. – 3 s., il.

32. Pat. UA 78115 Ukraïna, MPK G01N 27/22. Vimirjuvach vologosti materialiv / Zabolotnij O. V., Zabolotnij V. A., Koshovij M. D.; zajavnik i patentovlasnik Nac. aerokosmich. un-t im. M. Ć. Zhukovs'kogo «Hark. aviac. in-t»), № a2005034425; zajavl. 12.04.2005; opubl. 15.02.2007, Bjul. №2. – 3 s., il.

33. Pat. UA 33704 Ukraïna, MPK G01N 27/22. Pervinnij vimirjuval'nij peretvorjuvach vologosti naftoproduktiv / Zabolotnij O. V.; zajavnik i patentovlasnik Nac. aerokosmich. un-t im. M. Ć. Zhukovs'kogo «Hark. aviac. in-t»), № u200802016; zajavl. 18.02.2008; opubl. 10.07.2008, Bjul. №13. – 3 s., il.

34. Pat. UA 40939 Ukraïna, MPK G01N 27/22. Pervinnij peretvorjuvach vologosti naftoproduktiv / Zabolotnij O. V., Koshovij M. D., Sattarov A.N.; zajavnik i patentovlasnik Nac. aerokosmich. un-t im. M. Ć. Zhukovs'kogo «Hark. aviac. in-t»), № u200814590; zajavl. 18.12.2008; opubl. 27.04.2009, Bjul. № 8. – 3 s., il.

35. Pat. UA 89376 Ukraïna, MPK G01N 27/22. Peretvorjuvach vologosti / Zabolotnij O. V., Koshovij M. D., Sattarov A.N.; zajavnik i patentovlasnik Nac. aerokosmich. un-t im. M. Ć. Zhukovs'kogo «Hark. aviac. in-t», № a200701506; zajavl. 12.02.2007; opubl. 25.01.2010, Bjul. № 2. – 7 s., il.

36. Pat. UA 50763 Ukraïna, MPK G01N 27/22. Vtorinnij vimirjuval'nij peretvorjuvach vologosti materialiv / Zabolotnij O. V., Koshovij M. D., Sattarov A.N.; zajavnik i patentovlasnik Nac. aerokosmich. un-t im. M. Ć. Zhukovs'kogo «Hark. aviac. in-t», № u200912832; zajavl. 10.12.2009; opubl. 25.06.2010, Bjul. № 12. – 3 s., il.

37. Pat. UA 104201 Ukraïna, MPK G01N 27/22. Sposib vimirjuvannja vologosti materialiv / Zabolotnij O. V.; zajavnik i patentovlasnik Nac. aerokosmich. un-t im. M. Ć. Zhukovs'kogo «Hark. aviac. in-t», № a201201992; zajavl. 21.02.2012; opubl. 10.01.2014, Bjul. № 1. – 8 s., il.

38. Pat. UA 107722 Ukraïna, MPK G01N 27/22. Pervinnij peretvorjuvach vologosti naftoproduktiv adaptivnogo vologomira / Zabolotnij O. V., Golub K.Ju.; zajavnik i patentovlasnik Nac. aerokosmich. un-t im. M. Ć. Zhukovs'kogo «Hark. aviac. in-t», № a201303175; zajavl. 15.03.2013; opubl. 10.02.2015, Bjul. № 3. – 4 s., il.

39. Pat. UA 116577 Ukraïna, MPK G01N 27/22. Sposib vimirjuvannja vologosti materialiv / Zabolotnij O. V.; zajavnik i patentovlasnik Nac. aerokosmich. un-t im. M. Ć. Zhukovs'kogo «Hark. aviac. in-t», № a201603949; zajavl. 11.04.2016; opubl. 10.04.2018, Bjul. № 7. – 8 s., il.

40. Zabolotnij, O. V. Vimirnik vologosti naftoproduktiv / O.V. Zabolotnij, V.A. Zabolotnij, M.D. Koshovij // Datchiki, priladi ta sistemi – 2008: tez. dop. IV Mizhnar. nauk.-tehnič. konf., 20 – 23 veresnja 2008 r. – Cherkasi – Gurzuf, 2008. – S. 73–74.

41. Zabolotnyj, A.V. Metodologija proektirovanija informacionno-izmeritel'nyh sistem kontrolja parametrov jenergonositelej letatel'nyh apparatov i promyshlennyh toplivno-jenergetičeskijh kompleksov / A.V. Zabolotnyj, N.D. Koshevoj, V.A. Knysh // Upravlenie, avtomatizacija i okružhajushhaja sreda: tez. dok. Mezhdunar. nauk.-tehnič. konf., 8 – 13 sentjabrja 2008 g., – Sevastopol', 2008. – S. 25–27.

42. Zabolotnij, O. V. Izmeritel'nye preobrazovately sistem kontrolja parametrov jenergonositelej letatel'nyh apparatov i promyshlennyh toplivno-jenergeticheskikh kompleksov / A.V. Zabolotnyj, N.D. Koshevoj, A.G. Mihajlov i dr. // Girotehnologii, navigacija, keruvannja ruhom ta konstrujuvannja aviacijno-kosmichnoï tehniki: tez. dop. VII Mizhnar. nauk.-tehnič. konf., 23 – 24 kvitnja 2009 r. – Kiïv, 2008. – Chastina 1. – S. 73–74.

43. Zabolotnij, O. V. Pervinnij peretvorjuvach vologosti naftoproduktiv / O.V. Zabolotnij, M.D. Koshovij, A.N. Sattarov // Integrovani intelektual'ni robototehnični kompleksi (IIRTK-2009): tez. dop. II Mizhnar. nauk.-praktič. konf., 25 – 28 travnja 2009 r. – Kiïv, 2009. – S. 303–305.

44. Zabolotnyj, A.V. Sposob chastichnoj kompensacii sortovoj pogreshnosti pri izmerenii vlazhnosti materialov dijel'kometricheskim metodom / A.V. Zabolotnyj, N.D. Koshevoj, A.N. Sattarov // Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: tez. dok. Mezhdunar. nauk.-tehnič. konf., 7 – 12 sentjabrja 2009 g., –Sevastopol', 2009. – S. 199 – 201.

45. Zabolotnyj, A. V. Postroenie matematicheskoy modeli izmerenij dlja termogravimetriceskogo metoda opredelenija vlagosoderzhanija veshhestv / E. Ju. Golub, A. V. Zabolotnyj, A. V. Chumachenko // Radioelektronika i molodjozh' v HHI veke : materialy XVIII Mezhdunar. molodjozhn. foruma, 14 – 16 aprelja 2014 g. / M-vo obrazovanija i nauki Ukrainy, Har'k. Nac. un-t radioelektroniki. – Har'kov, 2014. – T. 1. – S. 39–40.

46. Zabolotnyj, A. V. Ocenka tochnostnyh harakteristik dijel'kometricheskogo metoda opredelenija vlagosoderzhanija tvjordyh veshhestv / E. Ju. Golub, A. V. Zabolotnyj, A. V. Chumachenko // Ljudina i Kosmos : tez. dokl. XVI Mezhdunar. molodjozhn. nauch.-praktič. konf., 9 – 11 aprelja 2014 g. – Dnepropetrovsk, 2014. – S. 225.

47. Zabolotnij, O. V. Vologist' jak pokaznik jakosti materialiv, priznachenih dlja vikoristannja v Kosmosi. Sposib viznachennja vologosti / K. Ju. Golub, O. V. Zabolotnij // Sergeevs'ki chitannja : tez. dop. nauk.-tehnič. konf., 11 – 12 veresnja 2014 r. / Nac. tehnič. un-t «HPI», NVP HARTRON-ARKOS LTD. – Harkiv, 2014. – S. 40–41.

48. Zabolotnij, O. V. Analiz suchasnogo stanu problemi vimirjuvannja vologosti rechovin / K. Ju. Golub, O. V. Zabolotnij // Technical Using of Measurement – 2015 : tez. dop. Vseukr. nauk.-tehnic. konf. molodih vchenih u carini metrologii, 2 – 6 ljutogo 2015 r. – Slavs'ke, 2015. – S. 32–34.

49. Zabolotnij, O. V. Poshuk effektivnogo sposobu kompensacii «sortovoï nevznachenosti» vimirjuvan' diel'kometrichnimi vologomirami z vikoristannjam testovih metodiv / K. Ju. Golub, O. V. Zabolotnij // Informatika, matematika, avtomatika IMA–2015 : tez. dop. nauk.-tehnic. konf., 20 – 25 kvitnja 2015 r. – Sumi, 2015. – S. 112.

50. Zabolotnij, O. V. Provedennja porivnjal'noï ocinki sposobiv kompensacii «sortovoï nevznachenosti» diel'kometrichnih vologomiriv / K. Ju. Golub, O. V. Zabolotnij // Ljudina i Kosmos : tez. dop. XVII Mizhnar. molodizhn. nauk.-praktich. konf., 8 – 10 kvitnja 2015 r. – Dnipropetrovs'k, 2015. – S. 185.

51. Zabolotnij, O. V. Aprobacija obranogo sposobu kompensacii «sortovoï nevznachenosti» vimirjuvan' diel'kometrichnimi vologomirami / K. Ju. Golub, O. V. Zabolotnij // Priladobuduvannja : stan i perspektivi : tez. dop. XIV Mizhnar. nauk.-tehnic. konf., 22 – 23 kvitnja 2015 r. / M-vo osviti i nauki Ukraïni, Nac. tehnic. un-t Ukraïni «KPI». – K., 2015. – S. 77–78.

52. Zabolotnij, O. V. Pervinnij vimirjuval'nij peretvorjuvach vmistu vologi rechovin, v jakomu konstruktivno realizovano princip dodavannja vodi / O. V. Zabolotnij // Vimirjuvannja, kontrol' ta diagnostika v tehnicnih sistemah: tez. dop. IV Mizhnar. nauk. konf., 31 zhovtnja – 2 listopada 2017 roku / M-vo osviti i nauki Ukraïni, Vinnic'kij nacional'nij tehnicnij universitet. – Vinnicja, 2017. – S. 125 – 126.

53. Zabolotnij, O. V. Metod vimirjuvannja vmistu vologi dlja adaptivnih vologomiriv emnisnogo tipu / O. V. Zabolotnij // International Trends in Science and Technology: Materials of V International Scientific and Practical Conference, august 31 / Research and Scientific Group RS Global Sp.z O.O. – Warsaw, Poland, 2018. – P. 6 – 12.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ	
ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ РІДИННИХ І СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ.....	15
1.1 Аналіз фізичних принципів вимірювання вологості рідинних і сипких матеріалів.....	15
1.1.1 Методи висушування (термогравіметричні)	18
1.1.2 Хімічні принципи.....	19
1.1.3 Електричні принципи.....	20
1.1.4 Фізичні принципи.....	22
1.2 Обґрунтування вибору принципу вимірювання вмісту вологи матеріалів.....	23
1.3 Аналіз способів вимірювання вологості речовин.....	36
1.4 Висновки за розділом і постановка задач дослідження.....	46
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ СТАТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
ПЕРЕТВОРЕННЯ АДАПТИВНОГО ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНОГО ВОЛОГОМІРА.....	48
2.1 Порівняльний аналіз відомих тестових методів підвищення точності дієлькометричних вологомірів.....	48
2.1.1 Перевірка найбільш простого серед виявлених тестових алгоритмів з розділенням досліджуваної речовини на два потоки	52
2.1.2 Перевірка тестового алгоритму, наближеного до формули Вінера	54
2.1.3 Перевірка способу з уведенням в досліджувану речовину діелектричних циліндрів.....	56
2.1.4 Перевірка способу з трьома вимірюваннями діелектричної проникності.....	59
2.2 Синтез статичної характеристики перетворення адаптивного первинного вимірювального перетворювача дієлькометричного вологоміра.....	68
2.2.1 Побудова нового тестового алгоритму для автоматичної компенсації зміни початкової діелектричної проникності речовини в ємнісних вологомірах	68

2.2.2 Перевірка ефективності уточненого виразу для визначення вмісту вологи і оцінювання зачення методичної складової невизначеності вимірювань	72
2.3 Висновки за розділом.....	78
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНВАРІАНТНОСТІ ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНИХ ВОЛОГОМІРІВ ДО ЗМІНИ СОРТУ РЕЧОВИНИ.....	81
3.1 Принцип визначення вмісту вологи речовини з використанням методу найменших квадратів.....	81
3.2 Метод визначення вмісту вологи речовини з використанням інтерполяційних поліномів Лагранжа.....	86
3.3 Метод визначення вмісту вологи речовини з використанням одного адитивного і одного мультиплікативного тестів.....	91
3.4 Метод визначення вмісту вологи речовини з використанням адитивного, мультиплікативного і додаткового тестів.....	103
3.5 Висновки за розділом.....	112
РОЗДІЛ 4. ПЕРЕВІРКА РІВНЯ ОБУМОВЛЕНOSTІ РІШЕНЬ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕСТОВИХ АЛГОРИТМІВ	115
4.1 Перевірка рівня обумовленості рішень, отриманих за допомогою першого з найближчих аналогів.....	116
4.2 Перевірка рівня обумовленості рішень, отриманих за допомогою другого з найближчих аналогів	123
4.3 Перевірка рівня обумовленості рішень, отриманих за допомогою третього з найближчих аналогів	128
4.4 Перевірка рівня обумовленості рішень для тестового алгоритму, отриманого з використанням методу найменших квадратів.....	133
4.5 Перевірка рівня обумовленості рішень для тестового алгоритму, отриманого з використанням інтерполяційного поліному Лагранжа першого порядку.....	136
4.6 Перевірка обумовленості рішень для тестових алгоритмів, утворених з одного адитивного, мультиплікативного і додаткового тестів.....	140
4.7 Перевірка рівня обумовленості рішень для тестового алгоритму, утвореного з	

одного адитивного, мультиплікативного і додаткового тестів	145
4.8 Перевірка рівня обумовленості рішень для знаменника тестового алгоритму, утвореного з одного адитивного і мультиплікативного тестів	149
4.9 Перевірка рівня обумовленості рішень для тестового алгоритму, сформованого шляхом усереднення попередніх варіантів.....	152
4.10 Результати розрахунків середньої абсолютної похибки для запропонованих тестових алгоритмів	155
4.11 Перевірка адекватності запропонованих тестових алгоритмів.....	160
4.12 Вибір моделі тестового алгоритму за мінімумом похибки відворювання.....	164
4.13 Висовки за розділом.....	169
РОЗДІЛ 5. ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЧІВ ВМІСТУ ВОЛОГИ СИПКИХ І РІДИННИХ РЕЧОВИН.....	
5.1 Перспективний метод вимірювання вологості сипких матеріалів.....	172
5.2 Вимірювальний перетворювач вологості, побудований на основі наведеного вище методу.....	176
5.3 Побудова математичних моделей статичних характеристик перетворення первинного вимірювального перетворювача, здатних враховувати вплив температури на результат перетворення вологості.....	179
5.4 Оцінка впливу змінного гранулометричного складу речовини на результат перетворення вмісту вологи речовини в електричну ємність.....	192
5.4.1 Оцінка рівня впливу змінного гранулометричного складу речовини на діелектричну проникність цієї речовини.....	192
5.4.2 Оцінка рівня впливу гранулометричного складу речовини на електричну ємність первинного перетворювача.....	197
5.5 Висновки за розділом.....	202
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА ЄМНІСНИХ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВМІСТУ ВОЛОГИ, ЩО КОНСТРУКТИВНО РЕАЛІЗУЮТЬ ТЕСТОВІ ВПЛИВИ НА МАТЕРІАЛ У ФОРМІ ДОБАВОК ПЕВНОЇ КІЛЬКОСТІ ВОДИ.....	
6.1 Розробка первинного вимірювального перетворювача вмісту вологи	

речовини, в якому конструктивно реалізовано принцип добавки відомої кількості води.....	204
6.2 Аналіз працездатності нового первинного вимірювального перетворювача вологості речовин і нового тестового алгоритму	207
6.3 Розробка удосконаленого первинного вимірювального перетворювача вологості речовин, в якому конструктивно реалізовано принцип добавки відомої кількості води.....	216
6.4 Оцінка впливу температури на результат вимірювання вмісту вологи ємнісним первинним перетворювачем.....	222
6.5 Висновки за розділом.....	232
РОЗДІЛ 7. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВМІСТУ ВОЛОГИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	235
7.1 Розробка вторинного вимірювального перетворювача вмісту вологи.....	235
7.2 Визначення ступеня впливу сорту речовини на результат вимірювання вмісту вологи у відповідності з методом, запропонованим в розділі 5.....	250
7.3 Визначення ступеня впливу сорту речовини на результат вимірювання вмісту вологи з використанням найбільш ефективного тестового алгоритму	272
7.4 Висновки за розділом.....	285
ВИСНОВКИ.....	288
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	293
Додаток А. Результати перевірки обумовленості обчислених значень.....	333
Додаток Б. Перевірка адекватності запропонованих тестових алгоритмів.....	348
Додаток В. Результати дисперсійного аналізу різних тестових алгоритмів.....	362
Додаток Г. Результати вимірювання ємностей первинного перетворювача з вологими речовинами.....	376
Додаток Д. Результати вимірювання електричних ємностей первинного перетворювача, заповненого досліджуваними речовинами у зневодненому стані.....	380
Додаток Е. Результати вимірювання електричних ємностей первинного	

перетворювача, заповненого досліджуваними речовинами з об'ємним вмістом води $W = 10\%$	384
Додаток З. Результати вимірювання електричних ємностей первинного перетворювача, заповненого досліджуваними речовинами з об'ємним вмістом води $W = 20\%$	388
Додаток І. Результати вимірювання електричних ємностей первинного перетворювача, заповненого досліджуваними речовинами з об'ємним вмістом води $W = 30\%$	392
Додаток К. Результати впровадження матеріалів дисертаційної роботи	396
Додаток Л. Список публікацій здобувача	401