

УДК 621.317.39

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНВАРІАНТНОСТІ ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНИХ ВОЛОГОМІРІВ ДО ЗМІНИ СОРТУ МАТЕРІАЛУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІНОМІВ ЛАГРАНЖА

*Голуб К.Ю., Заболотний О.В., Кошовий М.Д.
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна*

У статті запропоновано спосіб ефективної компенсації «сортової невизначеності» під час вимірювання вологості різних матеріалів із використанням тестових методів. Метою дослідження є синтез тестових виразів, що дозволяють задовільно компенсувати «сортову невизначеність» досліджуваних матеріалів під час вимірювання вологості останніх діелектричними вологомірами.

Тестові впливи на початковий зразок матеріалу реалізують додаванням у нього відомої кількості води і вимірювання діелектричних проникностей обох зразків (початкового та з доданою водою). За цими даними складання системи рівнянь можна обчислити вміст вологи початкового зразка. У статті досліджено можливість формування тестових виразів для розрахунку вмісту вологи з використанням поліномів Лагранжа першого та другого порядків. У результаті проведених досліджень доведено, що тестовий вираз, сформований із поліному Лагранжа другого порядку, забезпечує високий рівень інваріантності розрахункового значення вмісту вологи до «сортової невизначеності» досліджуваного матеріалу.

***Ключові слова:** вміст вологи, тестовий метод, сортова невизначеність, поліном Лагранжа, інваріантність.*

Постановка проблеми, її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями

Необхідність контролю вмісту вологи є властивою для багатьох технологічних операцій видобування, переробки та виробництва широкого спектру речовин. Наприклад, активація паливної суміші шляхом додавання певного відсотка води в органічне рідинне паливо і подальшого емульгування дає можливість отримати підвищену повноту згорання та теплотворну здатність під час спалювання отриманих у такий спосіб водно-паливних емульсій [1]. Схожу ситуацію маємо із водовугільним паливом – рідинним паливом, що може бути виготовлене з вугілля будь-яких марок і що використовують як паливо для потужних енергоблоків великих ТЕЦ, промислових котлоагрегатів малої та середньої потужності і навіть у судових дизелях. Під час виробництва та зберігання найважливіших видів сільгосппродукції (зерна та кормів) вміст вологи також має важливе значення.

Приблизно 75 % серед відомих вологомірів рідинних, твердих, сипких і пастоподібних матеріалів займають діелектричні прилади з ємнісними первинними перетворювачами. Для вологомірів цієї групи характерною є додаткова невизначеність вимірювань, спричинена різними значеннями початкових діелектричних проникностей досліджуваних матеріалів (далі – «сортова невизначеність»).

Вплив «сортової невизначеності» є істотним, і традиційні способи її компенсації досить ефективними, коли тип досліджуваного матеріалу наперед відомий. Але так буває далеко не завжди, і в умовах, коли тим матеріалу може не прогнозовано змінюватись, традиційні способи компенсації «сортової невизначеності» втрачають ефективність. Тому цей напрямок удосконалення відомих способів вимірювання вологості є актуальним і перспективним.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій

У наявних на ринку вологомірах хімічний склад (тобто сорт або тип матеріалу) зазвичай враховують уведенням у пам'ять мікропроцесорного обчислювального блоку калібрувальних кривих або нормуючих коефіцієнтів для максимально можливої кількості досліджуваних матеріалів. Також сучасні вологоміри забезпечують калібрувальними таблицями або проводять спеціальну процедуру 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).

Але спрогнозувати хімічний склад і особливості усіх матеріалів, які можуть підлягати вимірюванню, просто неможливо, бо усі чинники, що впливають на хімічний склад, практично не підлягають аналітичному прогнозуванню і можуть бути враховані лише в конкретних одиничних випадках. Зрозуміло, що спрогнозувати хімічний склад і особливості усіх матеріалів, які можуть підлягати вимірюванню, просто неможливо.

Тому наведені вище прийоми компенсації «сортової невизначеності» не є на сто відсотків досконалыми, тобто у даному напрямку можливо отримати покращені результати.

Здійснений за авторськими свідоцтвами СРСР, патентами України та Російської Федерації аналіз способів вимірювання вологості різних матеріалів [2] дав змогу звернути увагу на ті з них, де для визначення початкового вмісту вологи досліджувану речовину піддають тестовим впливам додатковим уведенням у неї відомих об'ємів води або речовин із відомими діелектричними проникностями [3 – 5]. Теоретичні дослідження, представлені у джерелі [6], дозволили здійснити порівняльний аналіз найбільш цікавих способів із означеної вище групи та встановити, що компенсація зміни діелектричної проникності зневоднених матеріалів здійснюється незадовільно.

Формулювання мети і задач дослідження

Метою описаного у даній статті дослідження є синтез та випробування ефективних способів формування тестових алгоритмів, що дозволили б достатньою мірою якісно компенсувати «сортovu невизначеність» досліджуваних матеріалів в умовах, близьких до реальних поляризаційних процесів у діелектриках і з мінімумом обмежень. У приведеному конкретному випадку йдеться про спосіб формування та дослідження інваріантного тестового алгоритму із використанням поліномів Лагранжа.

Основні результати досліджень

Науковий підхід до формування тестових впливів під час вимірювання вологості рідинних діелектриків, суть якого полягає у додаванні відомої кількості води у досліджувану пробу, досить вичерпно наведено у джерелі [4]. Маючи дві ідентичні проби досліджуваної речовини, можливо контролювати діелектричну проникність початкового матеріалу з невідомим вмістом вологи (наприклад, це буде перша проба), а також суміші початкового матеріалу із попередньо доданою відомою кількістю води (друга проба). Тобто саме додаванням відомої кількості води і здійснюють тестовий вплив. Такий тестовий вплив на початковий матеріал може бути один, а може бути декілька. Далі складають систему рівнянь, розв'язуючи яку, обчислюють вміст вологи першої (початкової) проби.

Вважаючи такий підхід справедливим і цікавим, авторами було прийняте рішення отримати більш досконалий з точки зору інваріантності тестовий вираз, використавши розповсюджені методи апроксимації або інтерполяції. Серед маси інших було звернено увагу на інтерполяційні поліноми Лагранжа.

Результати попередніх досліджень показали, що тестових впливів повинно бути мінімум два. Для нашого випадку матимемо діелектричну проникність початкової проби ε_1 , діелектричну проникність цієї ж проби після додавання відомої кількості води ε_2 (перший тестовий вплив), і, наприклад, діелектричну проникність ε_3 , отриману внаслідок додавання до другої проби ще такої ж кількості води (другий тестовий вплив). Під W_1 розуміємо початковий вміст вологи в матеріалі, саме його потрібно визначити, під W_2 розуміємо вологість тієї ж проби після додавання відомого об'єму води (перший тестовий вплив), а під W_3 розуміємо вологість матеріалу після додавання до W_2 такого ж об'єму води, як і під час першого тестового впливу (другий тестовий вплив). Також домовимось, що під час кожного тестового впливу до початкового зразка матеріалу буде додано 10% води, тобто $W_2 = W_1 + 0,1$, $W_3 = W_1 + 0,2$.

Інтерполяційний поліном Лагранжа першого порядку має таку форму:

$$L_1(x) = \frac{x - x_1}{x_0 - x_1} y_0 + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} y_1.$$

Якщо побудувати такий поліном для нашого випадку (як інтерполяційну залежність вологості матеріалу W від його діелектричної проникності для трьох контрольних точок) і здійснити певні перетворення, він виглядатиме так:

$$W_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3} W_2 + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} W_3,$$

$$W_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3} (W_1 + 0,1) + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} (W_1 + 0,2). \quad (1)$$

Отримавши з виразу (1) невідому вологість W_1 і здійснивши певні перетворення, матимемо:

$$W_1 = 59,2 - \frac{10 \cdot \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} + 20 \cdot \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}}{100 - 90 \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - 70 \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}} \quad (2)$$

Перевіримо, наскільки істотно впливатиме зміна сорту речовини на зміну параметра W_1 , згідно з методикою, наведеною у [6]. В якості математичної залежності, що достатньо адекватно описує поляризаційні процеси для широкого класу бінарних діелектричних систем, візьмемо формулу Вінера. Для теоретичної перевірки оберемо віртуальну групу матеріалів із діелектричними проникностями ε_n , що відповідно дорівнюють: 2; 2,5; 3 та 3,5 (див. табл. 1). Вологість цих матеріалів будемо обчислювати в точках 0, 10, 20, 30 і 40 % об'ємного вмісту вологи.

Таблиця 1. Розрахункові значення діелектричних проникностей

W_1	ε_n			
	2	2,5	3	3,5
0,0	2,0	2,5	3,0	3,5
0,1	2,614	3,252	3,885	4,512
0,2	3,368	4,173	4,963	5,741
0,3	4,317	5,324	6,305	7,262
0,4	5,545	6,806	8,022	9,197
0,5	7,2	8,784	10,295	11,738
0,6	9,548	11,558	13,447	15,226

Суть перевірки полягатиме у тому, що для різних ε_n розрахункові значення вологості у обраних контрольних точках 0, 10, 20, 30 і 40 % об'ємного вмісту вологи повинні бути однаковими. Результати показані у табл. 2.

Таблиця 2. Результати перевірки залежності розрахункової вологості W_1 від сорту матеріалу ε_n

ε_n	ε_1	ε_2	ε_3	W	W_1	$\Delta W = W_1 - W$
2,0	2,0	2,614	3,368	0,0	0,0	0,0
2,0	2,614	3,368	4,317	0,1	0,1	0,0
2,0	3,368	4,317	5,545	0,2	0,3	0,1
2,0	4,317	5,545	7,200	0,3	0,4	0,1
2,0	5,545	7,200	9,548	0,4	0,6	0,2
2,5	2,5	3,252	4,173	0,0	0,0	0,0
2,5	3,252	4,173	5,324	0,1	0,1	0,0
2,5	4,173	5,324	6,806	0,2	0,2	0,0

Продовження таблиці 2

ε_n	ε_1	ε_2	ε_3	W	W_1	$\Delta W = W_1 - W$
2,5	5,324	6,806	8,784	0,3	0,4	0,1
2,5	6,806	8,784	11,558	0,4	0,6	0,2
3,0	3,0	3,885	4,963	0,0	0,0	0,0
3,0	3,885	4,963	6,305	0,1	0,1	0,0
3,0	4,963	6,305	8,022	0,2	0,2	0,0
3,0	6,305	8,022	10,295	0,3	0,3	0,0
3,0	8,022	10,295	13,447	0,4	0,5	0,1
3,5	3,5	4,512	5,741	0,0	0,0	0,0
3,5	4,512	5,741	7,262	0,1	0,1	0,0
3,5	5,741	7,262	9,197	0,2	0,2	0,0
3,5	7,262	9,197	11,738	0,3	0,3	0,0
3,5	9,197	11,738	15,226	0,4	0,5	0,1

Як видно з таблиці 2, в діапазоні зміни вологості від 0 до 10% вираз (2) є повністю інваріантним до зміни ε_n (за умови, коли зміна діелектричної проникності матеріалу залежно від вмісту води відповідає формулі Вінера), далі ситуація погіршується. Значення сортової невизначеності ΔW для вмісту води 20% ($\varepsilon_n = 2$), а особливо 30 та 40% є занадто великими і тому неприйнятними.

Тому було прийняте рішення використати для аналогічних початкових умов поліном Лагранжа другого порядку. Він повинен виглядати так:

$$L_2(x) = \frac{(x - x_1) \cdot (x - x_2)}{(x_0 - x_1) \cdot (x_0 - x_2)} y_0 + \frac{(x - x_0) \cdot (x - x_2)}{(x_1 - x_0) \cdot (x_1 - x_2)} y_1 + \frac{(x - x_0) \cdot (x - x_1)}{(x_1 - x_0) \cdot (x_2 - x_1)} y_2.$$

Для нашого випадку:

$$W(\varepsilon) = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_3)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} W_1 + \frac{(\varepsilon - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_3)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)} W_2 + \frac{(\varepsilon - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)} W_3. \quad (3)$$

Зважаючи на те, що тестових впливів у нас як і раніше 2, значення $W(\varepsilon)$ повинно бути всередині досліджуваного діапазону, а значення ε повинно відповідати $W(\varepsilon)$, запишемо:

$$W(\varepsilon) = W_1 + 0,05; \quad \varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2.$$

Перепишемо формулу (3) і виразимо W_1 :

$$\begin{aligned}
 W_1 + 0,05 &= \frac{\left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \varepsilon_2\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \varepsilon_3\right)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} W_1 + \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \varepsilon_1\right) \times \\
 &\times \frac{\left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \varepsilon_3\right)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)} (W_1 + 0,1) + \frac{\left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \varepsilon_1\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} - \varepsilon_2\right)}{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)} (W_1 + 0,2), \\
 W_1 &= \frac{5 \cdot \left(\frac{0,5\varepsilon_1 + 0,5\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3} + \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)} - 1\right)}{1,2 - \frac{\varepsilon_3^2 + \varepsilon_1\varepsilon_2 - \varepsilon_3\varepsilon_2 - \varepsilon_1\varepsilon_3}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}} - 1. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Тепер необхідно здійснити таку ж саму перевірку, як і для математичного виразу (2). Її результати подані у таблиці 3.

Таблиця 3. Результати перевірки залежності розрахункової вологості W_1 від сорту матеріалу ε_H для виразу (4)

ε_H	ε_1	ε_2	ε_3	W	W_1	$\Delta W = W_1 - W$
2,0	2,0	2,614	3,368	0,0	0,0	0,0
2,0	2,614	3,368	4,317	0,1	0,1	0,0
2,0	3,368	4,317	5,545	0,2	0,2	0,0
2,0	4,317	5,545	7,200	0,3	0,4	0,1
2,0	5,545	7,200	9,548	0,4	0,5	0,1
2,5	2,5	3,252	4,173	0,0	0,0	0,0
2,5	3,252	4,173	5,324	0,1	0,1	0,0
2,5	4,173	5,324	6,806	0,2	0,2	0,0
2,5	5,324	6,806	8,784	0,3	0,3	0,0
2,5	6,806	8,784	11,558	0,4	0,5	0,1
3,0	3,0	3,885	4,963	0,0	0,0	0,0
3,0	3,885	4,963	6,305	0,1	0,1	0,0
3,0	4,963	6,305	8,022	0,2	0,2	0,0
3,0	6,305	8,022	10,295	0,3	0,3	0,0
3,0	8,022	10,295	13,447	0,4	0,5	0,1
3,5	3,5	4,512	5,741	0,0	0,0	0,0
3,5	4,512	5,741	7,262	0,1	0,1	0,0
3,5	5,741	7,262	9,197	0,2	0,2	0,0

Продовження таблиці 3

3,5	7,262	9,197	11,738	0,3	0,3	0,0
3,5	9,197	11,738	15,226	0,4	0,4	0,0

Висновки

Як видно з табл. 3, підвищення порядку поліному виявилось ефективним: в діапазоні зміни вологості від 0 до 20% вираз (4) є повністю інваріантним до зміни ε_n у діапазоні від 2,0 до 3,5. А для зміни ε_n у діапазоні від 2,5 до 3,5 інваріантність забезпечено в діапазоні від 0 до 30% об'ємного вмісту вологи. Таким чином, математичний вираз (4) здатен ефективно компенсувати «сортову невизначеність» під час вимірювання вологості достатньо широкою групи матеріалів. Наприклад, якщо розглянути нафтопродукти, діелектрична проникність останніх у зневодненому стані рідко перевищує значення 3,5, а вміст вологи зазвичай не буває більшим ніж 20%.

Література

1. Заболотний О.В. Поліпшення техніко-економічних та екологічних характеристик засобів реалізації процесу спалювання рідкого палива в котельних / О.В. Заболотний, М.Д. Кошовий // Нафтова і газова промисловість. – 2006. – № 5. – С. 47 – 50.
2. Заболотный А.В. Поиск эффективного способа измерения влажности сыпучих материалов / А.В. Заболотный, Н.Д. Кошовой, А.Н. Сатаров // Збірник наукових праць військового інституту Київського національного університету ім. Т.Г. Шевченка. – 2008. – Вип. № 15. – С. 50 – 57.
3. А.с. 1423952 СССР, МКИ³ G01 N27/22. Способ определения влажности жидких сред / А.В. Кудрявцев, В.И. Шевченко (СССР). – № 3987554/24-25: заявл. 11.12.85; опубл. 23.08.87, Бюл. № 31. – 4 с.: ил.
4. Кудрявцев А.В. Емкостные измерители влажности жидких сред / А.В. Кудрявцев, В.И. Шевченко. – Фрунзе: «Илим», 1989. – 53 с.
5. Pat. 4916940 US, Int. Cl.⁴ G01N 27/22, G01 N 33/22. Method and apparatus for measuring and calculating bulk water in crude oil / Marcel L. Mounge. – № 215058; filed 05.07.1988; date of patent 17.04.1990. – 15 p.
6. Заболотный А.В. Нюансы компенсации «сортовой» неопределенности при формировании тестов для адаптивных влагомеров / А.В. Заболотный // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/9 (56). – С. 47 – 50.

Надійшла до редакції
15 грудня 2012 року

© Голуб К.Ю., Заболотний О.В., Кошовий М.Д., 2013