

УДК 621.317.39

К. Ю. ГОЛУБ<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна<sup>2</sup> НВП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ РЕЧОВИН ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕСТОВИХ МЕТОДІВ

У статті проводиться порівняльний аналіз розроблених способів визначення вологості речовин з найбільш досконалими серед виявлених аналогів. При цьому розглядаються лише способи визначення вологості із застосуванням тестових методів. Основним завданням є вибір оптимального способу з точки зору його точніших характеристик, зокрема, компенсації основної складової невизначеності дієлькометричних вологомірів – «сортової невизначеності». В роботі описано основні ідеї, що стосуються суті визначення вологості кожним із запропонованих способів, наведено тестові алгоритми для розрахунку вологості і результати розрахунку, отримані для даних алгоритмів при перевірці їх на наявність сортової залежності. В якості параметрів для проведення порівняльного аналізу обрано величину «сортової невизначеності» вимірювань, величину розбіжності отриманих в результаті розрахунку за запропонованим тестовим алгоритмом значень вологості з дійсними, простоту реалізації способу. Проведений аналіз дозволив виявити спосіб, що задовольняє всім наведеним у статті вимогам.

**Ключові слова:** вологість, дієлькометричний метод, «сортова невизначеність», тестові методи, формула Вінера, адитивний тест, мультиплікативний тест.

### Стан проблеми

Підвищення якості продукції, зниження енерговитрат при виробництві та зберіганні готового продукту є однією з актуальних задач як сучасної науки, так і її різних застосувань в народному господарстві. Вирішення даної задачі неможливе без створення приладів для вимірювання показників якості речовин.

Одним з найбільш поширених показників якості речовини є вологість [1]. Вологість відіграє значну роль при контролі параметрів і управлінні технологічними процесами в промисловості та при виробництві різних матеріалів. Наприклад, вода, яка міститься в гідравлічних і змащувальних рідинах, може викликати серйозні пошкодження деталей, що потребують змащення [2, 3].

Контроль вологості є надзвичайно важливим також і в сільському господарстві. Для багатьох видів сільськогосподарської продукції (зерно та корми) вологість є чинником, що показує частку поживних речовин у продукції і тривалість її зберігання [4 – 6].

На сьогоднішній день існує велика кількість вологомірів для визначення вологості сипких та рідких речовин (наприклад, зерна або нафти) [7]. Серед них найбільшого поширення набули дієлькометричні вологоміри внаслідок їх досить хороших точнісних характеристик, високої чутливості, простоти виготовлення та експлуатації і низької вартості [8, 9]. Однак разом із перевагами даних вологомірів

слід відзначити їх суттєвий недолік – наявність так званої «сортової невизначеності» вимірювань, яка пов'язана з існуючою залежністю вимірюваних значень вологості від початкової дієлектричної проникності речовини [10]. Тобто для того, щоб визначити вологість необхідно заздалегідь знати електрофізичні характеристики, які залежать від сорту речовини, що у більшості випадків є неможливим через велику кількість існуючих матеріалів та їх видів.

Існує декілька підходів для розв'язання проблеми сортової залежності дієлькометричних вологомірів [11]. Одним з них є калібрування вологомірів на заданий склад речовини. Стосовно даного підходу потрібно сказати, що в цьому випадку враховується лише тип речовини, але не враховуються її особливості [12]. Іншим підходом є використання градувальних таблиць в комплекті з вологомірами. По суті, даний спосіб є аналогом калібрування, а тому має ті ж недоліки. В даний час підвищений інтерес викликає використання тестових методів для забезпечення інваріантності дієлькометричних вологомірів до сорту речовини [13]. Суть цих методів полягає в наступному. Проводяться декілька тестових впливів на досліджуваний зразок матеріалу. Ці впливи записують у вигляді математичних виразів з подальшим їх об'єднанням у систему рівнянь, розв'язуючи яку одержують вираз для визначення вологості без урахування початкової дієлектричної проникності речовини. На думку автора статті, використання такого підходу є найбільш перспективним напрямком для вирішення проблеми «сортової не-

значеності» вимірювань дієлькометричними вологомірами.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [14] проведено аналіз існуючих способів визначення вологості речовин дієлькометричними вологомірами з використанням тестових методів. Результати цього аналізу наведено в табл. 1.

Таблиця 1  
Результати порівняльного аналізу способів визначення вологості речовин із застосуванням тестових методів

Джерело, в якому описано спосіб	Характеристики		
	Інваріантність	Збіжність	Труднощі реалізації
[15]	немає	немає	немає
[16]	Варіант 1	є	є
	Варіант 2	є	є
	Варіант 3	є	є
[17]	немає	немає	немає
[18]	є	є	немає
[19]	є	є	немає
[20]	є	є	немає
[21]	немає	немає	немає
[21]	немає	немає	немає

З даних табл. 1 видно, що з усіх наведених способів найбільш перспективними з точки зору компенсації «сортової невизначеності», наявності збіжності отриманих результатів розрахунку вологості з дійсними значеннями і простоти реалізації є способи, описані в джерелах [16, 18 – 20]. У зв'язку з цим далі будемо розглядати саме ці способи.

### Формулювання мети статті

Метою статті є проведення порівняльного аналізу запропонованих способів визначення вологості із застосуванням тестових методів з найбільш досконалими серед виявлених аналогів та вибір оптимального способу з точки зору його точнісних характеристик (зокрема, компенсації «сортової невизначеності»).

### Найбільш досконали способи визначення вологості речовин із застосуванням тестових методів

#### 1. Спосіб №1

Даний спосіб представлений авторським свідоцтвом [16] і використовується для визначення вологості рідинних середовищ. Для отримання розрахункового виразу вологості автори пропонують вико-

ристовувати тестовий алгоритм, згідно з яким проводять три відліки з вимірювача вологості: перший – з досліджуваним матеріалом; другий – з досліджуваним матеріалом після добавки в нього відомої кількості води (перший тест) і третій – з досліджуваним матеріалом при добавці в нього фіксованого об'єму рідкого середовища того ж складу, що і досліджуваний зразок з відомою вологістю або зневодненого середовища (другий тест).

Можливі три варіанти реалізації запропонованого способу. Перший варіант – для другого тесту фіксовану добавку речовини з відомою вологістю вводять в суміш, отриману після першого тесту. Тестовий вираз для розрахунку вологості має вигляд:

$$W_{\text{розр}} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot k_1 \cdot \Delta W_1 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \times}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot (k_2 - k_1) -} \times k_1 \cdot \Delta W_1 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \Delta W_1 \cdot \Delta W_2 \cdot W_d \cdot k_2, \quad (1)$$

$$- (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \cdot (k_1 - 1),$$

де  $\varepsilon_1$  – діелектрична проникність досліджуваної речовини;

$\varepsilon_2$  – діелектрична проникність досліджуваної речовини після добавки фіксованого об'єму води;

$\varepsilon_3$  – діелектрична проникність досліджуваної речовини після добавки фіксованого об'єму середовища, що контролюється, з відомою вологістю (або зневодненого середовища);

$k_1 = 1/(1 + \Delta W_1)$ ,  $k_2 = 1/(1 + \Delta W_1 + \Delta W_2)$  – коефіцієнти, прийняті для спрощення запису виразу;

$\Delta W_1$  – відношення доданого об'єму води до повного об'єму досліджуваної суміші;

$\Delta W_2$  – відношення доданого фіксованого об'єму середовища, що контролюється, з відомою вологістю до повного об'єму досліджуваної суміші;

$W_d$  – вологість середовища, що контролюється.

Іншим варіантом реалізації даного способу є використання для другого тесту фіксованої добавки речовини з відомою вологістю, яку вводять у початкову суміш. Тоді вираз (1) може бути записаний як:

$$W_{\text{розр}} = [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \Delta W_2 \cdot W_d \cdot k_2' - (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \cdot \Delta W_1 \cdot k_1] / [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot (1 - k_2') - (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \cdot (1 - k_1)], \quad (2)$$

де  $k_2' = 1/(1 + \Delta W_2)$  – коефіцієнт, прийнятий для спрощення запису виразу.

І третій варіант – для другого тесту вводять фіксовану добавку зневодненого зразка речовини. Вираз для розрахунку вологості має вигляд:

$$W_{\text{розр}} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot k_1 \cdot \Delta W_1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \cdot (1 - k_1) - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot (1 - k_2'')}, \quad (3)$$

де  $k_2'' = 1/(1 + \Delta W_2'')$  – коефіцієнт, прийнятий для спрощення запису виразу.

Для перевірки виразів (1)–(3) на інваріантність до зміни початкової діелектричної проникності речовини будемо використовувати формулу Вінера, записану в повному вигляді, оскільки вона найбільш повно відображає залежність вологості речовини від її діелектричної проникності:

$$\varepsilon = \varepsilon_n \left( 1 + \frac{3W}{\frac{\varepsilon_b + 2\varepsilon_n - W}{\varepsilon_b - \varepsilon_n}} \right), \quad (4)$$

де  $\varepsilon_n$  – діелектрична проникність зневодненого зразка речовини;

$W$  – вологість досліджуваної речовини;

$\varepsilon_b$  – діелектрична проникність води (за довідковими даними дорівнює 80).

Виберемо конкретну групу речовин з початковими діелектричними проникностями  $\varepsilon_n$ , що змінюються від 2 до 4 (наприклад, зерно). В якості контрольних точок вологості будемо використовувати наступні: 0; 0,1; 0,2 і 0,3 (або 0%; 10%; 20% і 30% відповідно). Суть такої перевірки полягає в тому, що для різних  $\varepsilon_n$  розрахункові значення вологості в однакових контрольних точках об'ємного вмісту вологи повинні бути однаковими. Результати розрахунку вологості речовини для виразів (1)–(3) з урахуванням діелектричних проникностей  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  і  $\varepsilon_3$ , обчислених згідно з (4), наведено в табл. 2–4 (де  $W_n$  – нормоване розрахункове значення вологості).

Таблиця 2

Результати розрахунку вологості речовини для виразу (1)

$\varepsilon_n$	$W$	$W_{розр}$	$W_n$
2,0	0,0	-0,925	0,0
2,0	0,1	-0,741	0,149
2,0	0,2	-0,629	0,24
2,0	0,3	-0,556	0,299
2,5	0,0	-0,925	0,0
2,5	0,1	-0,741	0,149
2,5	0,2	-0,629	0,24
2,5	0,3	-0,556	0,299
3,0	0,0	-0,925	0,0
3,0	0,1	-0,742	0,148
3,0	0,2	-0,629	0,24
3,0	0,3	-0,555	0,3
3,5	0,0	-0,925	0,0
3,5	0,1	-0,742	0,148
3,5	0,2	-0,629	0,24
3,5	0,3	-0,555	0,3

Таблиця 3

Результати розрахунку вологості речовини для виразу (2)

$\varepsilon_n$	$W$	$W_{розр}$	$W_n$
2,0	0,0	-0,034	0,001
2,0	0,1	0,1	0,138
2,0	0,2	0,192	0,232
2,0	0,3	0,257	0,298
2,5	0,0	-0,034	0,001
2,5	0,1	0,1	0,138
2,5	0,2	0,193	0,233
2,5	0,3	0,257	0,298
3,0	0,0	-0,034	0,001
3,0	0,1	0,1	0,138
3,0	0,2	0,193	0,233
3,0	0,3	0,258	0,299
3,5	0,0	-0,035	0
3,5	0,1	0,1	0,138
3,5	0,2	0,193	0,233
3,5	0,3	0,259	0,3

Таблиця 4

Результати розрахунку вологості речовини для виразу (3)

$\varepsilon_n$	$W$	$W_{розр}$	$W_n$
2,0	0,0	-0,273	0,0
2,0	0,1	-0,244	0,136
2,0	0,2	-0,224	0,23
2,0	0,3	-0,21	0,295
2,5	0,0	-0,273	0,0
2,5	0,1	-0,244	0,136
2,5	0,2	-0,224	0,23
2,5	0,3	-0,21	0,295
3,0	0,0	-0,273	0,0
3,0	0,1	-0,244	0,136
3,0	0,2	-0,224	0,23
3,0	0,3	-0,209	0,3
3,5	0,0	-0,273	0,0
3,5	0,1	-0,244	0,136
3,5	0,2	-0,224	0,23
3,5	0,3	-0,209	0,3

З аналізу даних табл. 2–4 видно, що результати розрахунку вологості є достатньою мірою інваріантними до зміни початкової діелектричної проникності речовини. Так, наприклад, для табл. 2 при одній і тій же заданій вологості  $W = 0$  отримаємо нормовані розрахункові значення вологості  $W_n$ , що дорівнюють 0 у всіх точках початкової діелектричної проникності  $\varepsilon_n$ . При  $W = 0,1$  для різних  $\varepsilon_n$  (2,0; 2,5; 3,0 і 3,5) отримаємо  $W_n$ , що дорівнюють 0,149; 0,149; 0,148 і 0,148 відповідно. Як видно, в даному випадку вже є невелика залежність розрахованих значень вологості від початкової діелектричної проникності речовини, тобто є «сортова неви-

значеність вимірювань, яка дорівнює 0,1 %. Якщо проаналізувати всі дані табл. 2 на наявність «сортової невизначеності», то отримуємо, що максимальне значення для даного варіанта реалізації способу становить 0,1 %. При проведенні аналогічних розрахунків для табл. 3 і 4 отримуємо максимальні значення розбіжностей, що дорівнюють 0,2 % і 0,5 % в контрольній точці  $W = 0,3$ .

Якщо говорити про збіжність отриманих результатів розрахунку вологості з дійсними значеннями, то, наприклад, для табл. 1 видно, що для  $W = 0,1$  при різних початкових діелектричних проникностях отримуємо нормовані значення вологості 0,149; 0,149; 0,148 і 0,149. Очевидно, що жодне з цих значень не збігається із заданим значенням 0,1. Максимальні значення розбіжностей для табл. 2 становлять 4,9 %, для табл. 3 – 3,8 % і для табл. 4 – 3,6 %.

## 2. Спосіб №2

Автори даного способу (описаний у патенті [18]) пропонують проводити три відліки: перший – з ємнісного первинного перетворювача, заповненого досліджуваною речовиною; другий – з ємнісного первинного перетворювача, заповненого тією ж речовиною, при додаванні відомої кількості води; третій – при додаванні у пробу, отриману після другого відліку, ще такої ж кількості води.

Вираз для визначення вологості речовини має вигляд:

$$W_{\text{розн}} = \frac{0,17\varepsilon_1 + 0,17\varepsilon_3 - 0,33\varepsilon_2}{10\varepsilon_3}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_1$  – діелектрична проникність речовини, отримана в результаті першого відліку;

$\varepsilon_2$  – діелектрична проникність речовини, отримана в результаті другого відліку;

$\varepsilon_3$  – діелектрична проникність речовини, отримана в результаті третього відліку.

Перевірку виразу (5) на інваріантність будемо здійснювати так само, як і для способу №1. Результати даної перевірки наведено в табл. 5.

З даних табл. 5 видно, що при вологості  $W = 0,3$  нормовані значення вологості  $W_n$  дорівнюють 0,341; 0,3; 0,261 і 0,225 відповідно (максимальне значення становить 0,341, мінімальне – 0,225). В цьому випадку «сортова невизначеність» вимірювання може бути розрахована наступним чином:  $\Delta = (0,341 - 0,225) \cdot 100\%$  і дорівнює 11,6 %. Це значення є максимальним для даного способу визначення вологості. Щодо стосується збіжності отриманих результатів з дійсними значеннями вологості, то максимальна розбіжність спостерігається при  $W = 0,2$  ( $\varepsilon_n = 3,5$ ) і досягає 8,8 %.

Таблиця 5

Результати розрахунку вологості речовини для виразу (5)

$\varepsilon_n$	W	$W_{\text{розн}}$	$W_n$
2,0	0,0	0,00148	0,04
2,0	0,1	0,00154	0,104
2,0	0,2	0,00164	0,198
2,0	0,3	0,00178	0,341
2,5	0,0	0,00146	0,02
2,5	0,1	0,00152	0,079
2,5	0,2	0,00161	0,168
2,5	0,3	0,00174	0,3
3,0	0,0	0,00144	0
3,0	0,1	0,0015	0,057
3,0	0,2	0,00158	0,14
3,0	0,3	0,0017	0,261
3,5	0,0	0,00143	0,018
3,5	0,1	0,00148	0,034
3,5	0,2	0,00155	0,112
3,5	0,3	0,00166	0,225

## 3. Спосіб №3

Спосіб №3, описаний у роботі [19], є аналогічним способу №2. Однак у цьому випадку вираз для розрахунку вологості отримують напівемпіричним шляхом при проведенні аналізу виразу (5) з точки зору характеру зміни діелектричних проникностей  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  залежно від зміни вологості:

$$W_{\text{розн}} = \frac{100(0,17\varepsilon_1 + 0,17\varepsilon_3 - 0,33\varepsilon_2)}{\varepsilon_3 - 0,013\varepsilon_3^2}. \quad (6)$$

Результати розрахунку вологості речовини, отримані при проведенні перевірки даного способу на наявність «сортової невизначеності» наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Результати розрахунку вологості речовини для виразу (6)

$\varepsilon_n$	W	$W_{\text{розн}}$	$W_n$
2,0	0,0	1,551	0,007
2,0	0,1	1,637	0,068
2,0	0,2	1,765	0,16
2,0	0,3	1,959	0,298
2,5	0,0	1,547	0,004
2,5	0,1	1,634	0,066
2,5	0,2	1,764	0,159
2,5	0,3	1,96	0,299
3,0	0,0	1,544	0,002
3,0	0,1	1,633	0,066
3,0	0,2	1,763	0,158
3,0	0,3	1,961	0,299
3,5	0,0	1,541	0
3,5	0,1	1,631	0,064
3,5	0,2	1,764	0,159
3,5	0,3	1,962	0,3

З даних, представлених у табл. 6, видно, що максимальне значення «сортової невизначеності» спостерігається при заданому значенні вологості  $W = 0$  і становить 0,7 %. Максимальне значення розбіжності між розрахованими і дійсними значеннями вологості дорівнює 4,2 % (при  $W = 0,2$  і  $\varepsilon_n = 3,0$ ).

**4. Спосіб №4**

Автори способу №4 (представлений в роботі [20]) пропонують проводити три відліки з вимірювача вологості, аналогічні тим, які проводяться у способі №2. Для отримання тестового виразу розрахунку вологості речовини використовують інтерполяційний поліном Лагранжа другого порядку:

$$W_{\text{розрах}} = 59,2 - \frac{10 \cdot \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} + 20 \cdot \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}}{100 - 90 \cdot \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - 70 \cdot \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}} \quad (7)$$

Після підстановки діелектричних проникностей  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , розрахованих відповідно з повною формулою Вінера (4), у вираз (7) отримаємо розрахункові значення вологості речовини (див. табл. 7).

Таблиця 7

Результати розрахунку вологості речовини для виразу (7)

$\varepsilon_n$	W	$W_{\text{розрах}}$	$W_n$
2,0	0,0	58,608	0,034
2,0	0,1	58,609	0,102
2,0	0,2	58,611	0,188
2,0	0,3	58,612	0,3
2,5	0,0	58,608	0,023
2,5	0,1	58,609	0,088
2,5	0,2	58,61	0,169
2,5	0,3	58,612	0,275
3,0	0,0	58,608	0,013
3,0	0,1	58,609	0,088
3,0	0,2	58,61	0,18
3,0	0,3	58,611	0,3
3,5	0,0	58,608	0
3,5	0,1	58,609	0,071
3,5	0,2	58,61	0,16
3,5	0,3	58,611	0,273

Якщо проаналізувати отримані в табл. 7 дані, то видно, що при одному і тому ж заданому значенні вологості для різних діелектричних проникностей отримаємо різні нормовані значення вологості. Максимальна розбіжність між такими значеннями спостерігається при заданому значенні вологості 0,3 і дорівнює 6,9 %. Великих значень досягають також розбіжності між дійсними значеннями вологості і отриманими (максимальна – 4,6 %).

**5. Спосіб №5**

Спосіб №5 запропоновано та детально описано у роботі [22]. Для його реалізації спочатку вимірюють ємність первинного вимірювального перетворювача з початковим зразком речовини, потім ємність первинного перетворювача з цим же зразком після добавки відомої кількості води (адитивний тест) і ємність первинного перетворювача з досліджуваним зразком речовини при проведенні вимірювань k-разів (мультиплікативний тест). Цього достатньо для формування системи з трьох рівнянь, розв'язуючи яку одержують вираз для визначення вологості речовини. В результаті синтезу декількох виразів, отриманих при різних добавках води і коефіцієнтах мультиплікативного тесту, отримано тестовий вираз для визначення вологості речовин:

$$W_{\text{розрах}} = \frac{W_{2\text{розрах}} + W_{1\text{розрах}}}{(W_{2\text{розрах}} - W_{1\text{розрах}}) \cdot (1 + 0,0029 \cdot C_1)} \quad (8)$$

де  $W_{1\text{розрах}} = \frac{\Delta W \cdot (C_3 - C_1)}{(k - 1) \cdot (C_2 - C_1)} - \frac{1}{3}$  – перший розрахунковий вираз, отриманий для випадку добавки води 10 % і коефіцієнта мультиплікативного тесту, що дорівнює 2;

$$W_{2\text{розрах}} = \frac{\Delta W' \cdot (C_3' - C_1)}{(k' - 1) \cdot (C_2' - C_1)} - \frac{1}{3}$$
 – другий розрахунковий вираз, отриманий для випадку добавки води 20 % і коефіцієнта мультиплікативного тесту, що дорівнює 4;

$\Delta W$  – добавка води для адитивного тесту, що дорівнює 0,1 (10 %);

$C_1, C_2, C_3$  – ємність первинного вимірювального перетворювача з досліджуваним зразком речовини, при формуванні адитивного та мультиплікативного тестів відповідно (для випадку добавки води 10 % і коефіцієнта мультиплікативного тесту, що дорівнює 2);

$k$  – коефіцієнт мультиплікативного тесту, що дорівнює 2;

$C_2', C_3'$  – ємність первинного перетворювача при формуванні адитивного та мультиплікативного тестів (для випадку добавки води 20 % і коефіцієнта мультиплікативного тесту, що дорівнює 4);

$\Delta W'$  – добавка води для адитивного тесту, що дорівнює 0,2 (20 %);

$k'$  – коефіцієнт мультиплікативного тесту, що дорівнює 4.

Перевірка результатів розрахунку вологості, отриманих згідно з виразом (8), на інваріантність до зміни початкової діелектричної проникності речовини здійснюється за допомогою повної формули Вінера (4). Результати розрахунку наведено в табл. 8.

Таблиця 8

Результати розрахунку вологості речовини для виразу (8)

$\varepsilon_n$	W	$W_{розр}$	$W_n$
2,0	0,0	-17,526	0,014
2,0	0,1	-15,306	0,115
2,0	0,2	-13,306	0,205
2,0	0,3	-11,112	0,305
2,5	0,0	-17,528	0,014
2,5	0,1	-15,551	0,104
2,5	0,2	-13,3	0,206
2,5	0,3	-11,219	0,3
3,0	0,0	-17,794	0,002
3,0	0,1	-15,582	0,111
3,0	0,2	-13,388	0,202
3,0	0,3	-11,288	0,297
3,5	0,0	-17,843	0,0
3,5	0,1	-15,772	0,094
3,5	0,2	-13,455	0,199
3,5	0,3	-11,376	0,293

Як видно з даних табл. 8, отримані результати розрахунку вологості (нормовані результати) мало залежать від зміни початкової діелектричної проникності речовини. Найбільше значення «сортової невизначеності» вимірювань у цьому випадку дорівнює 2,1 %. Максимальна розбіжність між нормованими значеннями вологості і заданими становить 1,5 %.

### 6. Спосіб №6

Спосіб №6 (детально описаний в [23]) являє собою декілька вдосконалених способів №5, і відрізняється від нього наявністю третього (комбінованого) тесту. Тоді вираз для розрахунку вологості має вигляд:

$$W_{розр} = \frac{W_{2розр} + W_{1розр}}{(W_{2розр} - W_{1розр}) \cdot (1 + 0,0045 \cdot C_1)}, \quad (9)$$

$$\text{де } W_{1розр} = \frac{(C_3 - C_1) \cdot \Delta W}{(C_4 - C_2) - (C_3 - C_1)};$$

$$W_{2розр} = \frac{(C_3' - C_1) \cdot \Delta W}{(C_4' - C_2') - (C_3' - C_1)}.$$

Результати розрахунку вологості, отримані із застосуванням виразу (9) при перевірці його на інваріантність, наведено в табл. 9.

Виходячи з аналізу даних табл. 9 можна зробити висновок, що отримані із застосуванням виразу (9) значення вологості забезпечують досить хорошу компенсацію «сортової невизначеності» (максимальне значення цієї невизначеності для способу в цілому становить 0,6 %). Що стосується збіжності отриманих значень вологості з дійсними, то найбільше значення розбіжності в цьому випадку дорівнює 0,7 %.

Таблиця 9

Результати розрахунку вологості речовини для виразу (9)

$\varepsilon_n$	W	$W_{розр}$	$W_n$
2,0	0,0	-17,008	0,002
2,0	0,1	-14,798	0,101
2,0	0,2	-12,625	0,198
2,0	0,3	-10,499	0,293
2,5	0,0	-17,021	0,002
2,5	0,1	-14,773	0,102
2,5	0,2	-12,574	0,2
2,5	0,3	-10,435	0,295
3,0	0,0	-17,038	0,001
3,0	0,1	-14,758	0,103
3,0	0,2	-12,538	0,202
3,0	0,3	-10,39	0,297
3,5	0,0	-17,058	0,0
3,5	0,1	-14,75	0,103
3,5	0,2	-12,513	0,203
3,5	0,3	-10,36	0,299

### Порівняння розроблених способів визначення вологості з найбільш досконалими серед виявлених аналогів

З метою порівняння способів №5 і №6, розроблених автором статті, зі способами №1 – №4 проведемо їх порівняльний аналіз за такими параметрами: величиною «сортової невизначеності» вимірювань; величиною розбіжності отриманих в результаті розрахунку за запропонованим тестовим виразом значень вологості з дійсними; простотою реалізації способу.

Результати порівняльної оцінки даних способів наведено на рис. 1 (для величини «сортової невизначеності») і рис. 2 (для величини розбіжностей розрахункових значень вологості з дійсними).

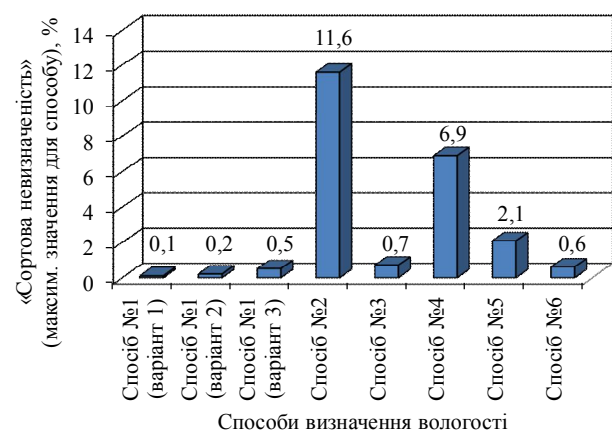


Рис. 1. Величина «сортової невизначеності» для розглянутих способів визначення вологості

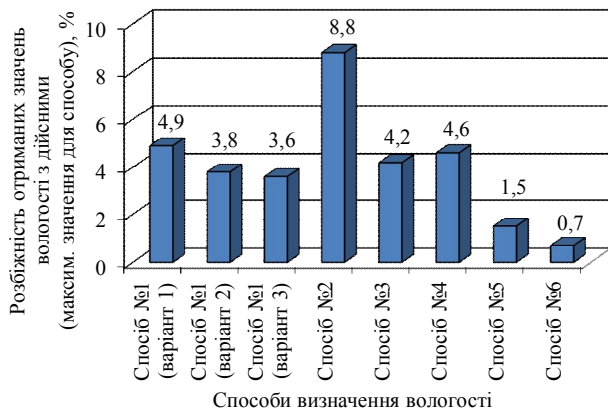


Рис. 2. Величина розбіжностей розрахункових значень вологості з дійсними значеннями для розглянутих способів визначення вологості

З рис. 1 видно, що найкращі показники з компенсації сортової залежності має спосіб №1. В цьому випадку для різних варіантів реалізації даного способу максимальні значення «сортової невизначеності» дорівнюють 0,1%; 0,2% і 0,5% відповідно. Однак разом з цим присутні досить великі розбіжності отриманих значень вологості з дійсними (див. рис. 2). Максимальні значення розбіжностей для способу при різних варіантах його реалізації досягають 4,9%; 3,8% і 3,6%. Крім того, слід відзначити складність застосування даного способу.

Для першого розробленого автором способу (спосіб №5) максимальна величина «сортової невизначеності» складає 2,1% (рис. 1), а величина розбіжності отриманих значень вологості з дійсними дорівнює 1,5% (рис. 2).

З рис. 1 і 2 видно, що для другого (удосконаленого) способу визначення вологості (спосіб №6) отримаємо наступні значення точнісних характеристик: величина «сортової невизначеності» дорівнює 0,6%; розбіжність отриманих значень вологості з дійсними становить 0,7%. З аналізу отриманих значень можна зробити висновок, що даний спосіб незначно (на десяти долі) поступається способу №1 у відношенні компенсації «сортової невизначеності», але при цьому має ряд інших переваг, таких як добра збіжність отриманих результатів з дійсними значеннями, простота реалізації, можливість застосування способу як в лабораторних, так і у виробничих умовах.

Іншим критерієм для проведення порівняльної оцінки є критерій згоди Пірсона ( $\chi^2$ ) [24]. Даний критерій дозволяє прийняти або відхилити гіпотезу про узгодженість вибірок. Перевірка результатів розрахунків на узгодженість за критерієм Пірсона здійснюється наступним чином. Емпіричне значення критерію Пірсона може бути визначено за формулою:

$$\chi^2_{\text{емп}} = \sum_{i=1}^m \frac{(W_H - W)^2}{W}$$

де  $W_H$  – нормоване значення вологості (використовується в якості емпіричного значення);

$W$  – задана вологість речовини (використовується в якості теоретичного значення);

$m$  – кількість інтервалів, що дорівнює 4.

Обчислимо емпіричне значення критерію Пірсона для результатів табл. 9 (спосіб №6). Для заданого значення вологості 0 видно, що при різних діелектричних проникностях отримаємо емпіричні значення вологості 0,002; 0,002; 0,001 і 0 відповідно; для 0,1 отримаємо величини 0,101; 0,102; 0,103; 0,103 і т. д. Як видно, не всі результати розрахунків збігаються з дійсними значеннями, тобто є розбіжності. З урахуванням усіх можливих розбіжностей для табл. 9 отримаємо:

$$\begin{aligned} \chi^2_{\text{емп}} = & \frac{(0,002 - 0)^2}{0,002} + \frac{(0,002 - 0)^2}{0,002} + \frac{(0,001 - 0)^2}{0,002} + \\ & + \frac{(0 - 0)^2}{0,002} + \frac{(0,101 - 0,1)^2}{0,1} + \frac{(0,102 - 0,1)^2}{0,1} + \\ & + \frac{(0,103 - 0,1)^2}{0,1} + \frac{(0,103 - 0,1)^2}{0,1} + \frac{(0,198 - 0,2)^2}{0,2} + \\ & + \frac{(0,2 - 0,2)^2}{0,2} + \frac{(0,202 - 0,2)^2}{0,2} + \frac{(0,203 - 0,2)^2}{0,2} + \\ & + \frac{(0,293 - 0,3)^2}{0,3} + \frac{(0,295 - 0,3)^2}{0,3} + \frac{(0,297 - 0,3)^2}{0,3} + \\ & + \frac{(0,299 - 0,3)^2}{0,3} = 0,005. \end{aligned}$$

Емпіричні значення критерію Пірсона для інших способів визначаються аналогічно. Результати розрахунків критерію Пірсона наведено в табл. 10.

Таблиця 10

Результати розрахунків критерію Пірсона

Спосіб		$\chi^2_{\text{емп}}$
Спосіб №1	Варіант 1	0,126
	Варіант 2	0,082
	Варіант 3	0,07
Спосіб №2		0,216
Спосіб №3		0,09
Спосіб №4		0,103
Спосіб №5		0,033
Спосіб №6		0,005

За підсумками перевірки результатів розрахунків на узгодженість за критерієм Пірсона (табл. 10) визначено, що значення, отримані для способів №5 і №6, мають найменші розбіжності (тобто є узгодженими) в порівнянні з результатами, отриманими для інших способів.

## Висновки

Таким чином, в результаті проведеного порівняльного аналізу способів встановлено, що оптимальним способом, з точки зору його точнісних характеристик, є спосіб №6. Для речовин з  $\epsilon_n = 2 \dots 3,5$  та з вмістом вологи від 0 % до 30 % даний спосіб має наступні значення точнісних характеристик (максимальні значення):

– величина «сортової невизначеності» вимірювань дорівнює 0,6 %;

– величина розбіжності отриманих розрахункових значень вологості з дійсними дорівнює 0,7 %.

Крім того, даний спосіб є досить простим у реалізації і може бути застосований як в лабораторних, так і у виробничих умовах, як при вимірюваннях з обмеженою кількістю матеріалу, так і в потоці.

## Література

1. Wernecke, R. *Industrial Moisture and Humidity Measurement : A Practical Guide [Text]* / R. Wernecke, J. Werneck. – Weinheim, Germany : John Wiley & Sons, 2013. – 500 с.

2. Islam, T. *Moisture measurement of transformer oil using thin film capacitive sensor [Text]* / T. Islam, M. F. A. Khan, S. A. Khan // *Power India International Conference (PIICON) : Proceedings of the Conference, 5 – 6 December 2015. – Delhi, 2014. – P. 1–5.*

3. *Determining water in transformer paper insulation : effect of measuring oil water activity at two different locations [Text]* / D. Martin, T. Saha, T. Gray, K. Wyper // *Electrical Insulation Magazine. – 2015. – Vol. 31 (3). – P. 18–25.*

4. *Corn Moisture Measurement using a Capacitive Sensor [Text]* / H. Zhang, W. Liu, B. Tan, W. Lu // *Journal of Computers. – 2013. – Vol. 8, No 6. – P. 1627–1631.*

5. *Grain Moisture Measuring Techniques – A Review [Text]* / A. Usman [et al.] // *Agricultural Engineering Today. – 2015. – Vol. 39 (2). – P. 18–24.*

6. Tan, L. B. *Study on Grain Moisture Detection System Based on the Theory of Dielectric Properties [Text]* / L. B. Tan, H. Y. Ji // *Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 333–335. – P. 1558–1563.*

7. Савосин, С. И. *Выбор методов для автоматизированного контроля влажности сельскохозяйственных объектов [Электронный ресурс]* / С. И. Савосин, В. В. Солдатов. – Режим доступа : [http://edu.rgazu.ru/file.php/1/vestnik\\_rgazu/data/20140519153726/12.html](http://edu.rgazu.ru/file.php/1/vestnik_rgazu/data/20140519153726/12.html). – 22.10.2015 р.

8. Івах, Р. *Дієлектрична: стан та перспективи [Текст]* / Р. Івах, Б. Стадник, Т. Домінюк // *Вимірювальна техніка та метрологія. – 2014. – № 75. – С. 24–26.*

9. Голуб, Е. Ю. *Компенсация «сортовой неопределённости» измерений влажности диэлектрическими влагомерами. Часть 1. Сравнительный*

*анализ методов определения влажности веществ [Текст]* / Е. Ю. Голуб, А. В. Заболотный // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2015. – № 2(72). – С. 28–35.*

10. Заболотный, А. В. *Нюансы компенсации «сортовой» неопределённости при формировании тестов для адаптивных влагомеров [Текст]* / А. В. Заболотный // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/9(56). – С. 47–50.*

11. Заболотный, А. В. *Техническая реализация аддитивных тестов в емкостном первичном преобразователе диэлектрического влагомера нефтепродуктов [Текст]* / А. В. Заболотный // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 3. – С. 48–53.*

12. Крушевский, Ю. В. *Влияние массообмена воды на точность измерения влажности зерна [Текст]* / Ю. В. Крушевский, Я. А. Бородай // *Научові праці ВНТУ. – 2007. – № 1. – С. 20–26.*

13. Голуб, К. Ю. *Анализ современного stanu проблемы вимірювання вологості речовин [Текст]* / К. Ю. Голуб, О. В. Заболотный // *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.*

14. Голуб, К. Ю. *Порівняльний аналіз тестових методів підвищення точності дієлектричних вологомірів [Текст]* / К. Ю. Голуб, О. В. Заболотный // *Розвідка та розробка нафтових і газових середовищ. – 2015. – № 1(54). – С. 112–119.*

15. А. с. SU 1265571 А1 СРСР, МПК G 01 N 27/22. *Способ измерения влажности нефти и нефтепродуктов [Текст]* / Гридасов А. П., Шевченко В. Н. (СРСР). – № 3905781/28-25; заявл. 4.06.85; опубл. 23.10.86, Бюл. № 39. – 3 с.

16. А. с. SU 1332216 А1 СРСР, МПК G 01 N 27/22. *Способ измерения влажности нефти и нефтепродуктов [Текст]* / А. В. Кудрявцев, В. Н. Шевченко (СРСР). – № 3988926/31-25; заявл. 11.12.85; опубл. 23.08.87, Бюл. № 31. – 4 с.

17. А. с. SU 1423952 А1 СССР, МПК G 01 N 27/22. *Способ определения влажности жидких сред в потоке [Текст]* / А. В. Кудрявцев, В. Н. Шевченко (СРСР). – № 3987554/24-25; заявл. 11.12.85; опубл. 15.09.88, Бюл. № 34. – 4 с.

18. Пат. UA 104201 C2 Україна, МПК G 01 N 27/22. *Спосіб вимірювання вологості матеріалів [Текст]* / Заболотний О. В.; заявник і патенто власник Нац. аерокосміч. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т». – № а201201992; заявл. 21.02.2012; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 9 с. : іл.

19. Заболотный, О. В. *Забезпечення задовільного рівня інваріантності адаптивних вологомірів з використанням методу найменших квадратів [Текст]* / О. В. Заболотный // *Вісник Черкаськ. держ. технологіч. ун-ту. – 2012. – № 4. – С. 13–17.*

20. Голуб, К. Ю. *Забезпечення інваріантності дієлектричних вологомірів до зміни сорту матеріалу з використанням поліномів Лагранжа*



[Текст] / К. Ю. Голуб, О. В. Заболотный, М. Д. Кошовый // Вісник НТУ «КПІ». – 2013. – № 45. – С. 7–13.

21. Кудрявцев, А. В. Емкостные измерители влажности жидких сред [Текст] / А. В. Кудрявцев, В. И. Шевченко. – Фрунзе : «Илим», 1989. – 53 с.

22. Synthesis of test actions for capacitive moisture meter that is invariant to substance type change [Text] / E. Golub, A. Zabolotnyj, N. Koshevoj, I. Kirichenko // Polish Academy of Sciences «ТЕКА. Commission of

motorization and energetics in agriculture». – 2014. – Vol. 14, No. 2. – P. 43–52.

23. Голуб, Е. Ю. Применение тестового подхода для обеспечения инвариантности диэлькометрических влагомеров к сорту вещества / Е. Ю. Голуб, А. В. Заболотный, Н. Д. Кошевой [Текст] // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2014. – № 4(68). – С. 60–66.

24. Greenwood, P. E. A Guide to Chi-Squared Testing [Text] / P. E. Greenwood, M. S. Nikulin. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 1996. – 208 p.

Надійшла до редакції 2.11.2015, розглянута на редколегії 18.11.2015

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВЕЩЕСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕСТОВЫХ МЕТОДОВ

К. Ю. Голуб

В статье проводится сравнительный анализ разработанных способов определения влажности веществ с наиболее совершенными из обнаруженных аналогов. При этом рассматриваются лишь способы определения влажности с применением тестовых методов. Основной задачей является выбор оптимального способа с точки зрения его точностных характеристик, в частности, компенсации основной составляющей неопределенности диэлькометрических влагомеров – «сортовой неопределенности». В работе описаны основные идеи, касающиеся сути определения влажности каждым из предложенных способов, приведены тестовые алгоритмы для расчета влажности и результаты расчета, полученные для данных алгоритмов при проверке их на наличие сортовой зависимости. В качестве параметров для проведения сравнительного анализа выбраны величина «сортовой неопределенности» измерений, величина расхождения полученных в результате расчета по предложенному тестовому алгоритму значений влажности с действительными, простота реализации способа. Проведенный анализ позволил выявить способ, удовлетворяющий всем приведенным в статье требованиям.

**Ключевые слова:** влажность, диэлькометрический метод, «сортовая неопределенность», тестовые методы, формула Винера, аддитивный тест, мультипликативный тест.

## COMPARITIVE ANALYSIS OF METHODS OF SUBSTANCES MOISTURE DETERMINATION WITH APPLICATION OF TEST METHODS

К. Yu. Holub

In the article it is carried out the comparative analysis of the developed methods of substances moisture determination with the most perfect of found analogs. In this case only methods for moisture determination by capacitive moisture meters with application of test methods are considered. The main objective is the choice of an optimum method from the point of view of its precision characteristics, in particular, of compensation of the main component of capacitive moisture meters uncertainty – «uncertainty of substance type». In the work the main ideas concerning an essence of moisture determination by each of the offered methods are described; test algorithms for moisture calculation and the calculation results received for these algorithms at their check on presence of substance type dependence are given. As the parameters for carrying out the comparative analysis the following are chosen: value of «uncertainty of substance type» of measurements; value of a divergence of received moisture values with the real; simplicity of method realization. The carried out analysis allowed revealing the method meeting all requirements provided in the article.

**Key words:** moisture, capacitive moisture meter, «uncertainty of substance type», test methods, Winer's formula, additive test, multiplicative test.

Голуб Екатерина Юрьевна – аспирант каф. авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»; инженер отдела 13060 НПП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД, Харьков, Украина, e-mail: golub-ekaterina@bk.ru.