

# НЮАНСЫ КОМПЕНСАЦИИ «СОРТОВОЙ» НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТЕСТОВ ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ВЛАГОМЕРОВ

**А. В. Заболотный**

Кандидат технических наук, доцент, начальник цикла метрологии, заместитель заведующего кафедрой Кафедра авиационных приборов и измерений Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070

Контактный тел.: (057) 788-42-69

E-mail: zzz77714@meta.ua

*У статті проведено теоретичний аналіз ефективності компенсації «сорткової» невизначеності при вимірювання вологості різних матеріалів з використанням тестових методів*

*Ключові слова: дієлькометричний метод, «сорткова» невизначеність, адаптивний вологомір*

*В статье проведен теоретический анализ эффективности компенсации «сортковой» неопределенности при измерении влажности различных материалов с использованием тестовых методов*

*Ключевые слова: диэлькометрический метод, «сортковая» неопределенность, адаптивный влагомер*

*Theoretical analysis of the “material type” uncertainty compensation with the help of testing methods for humidity measurements in different materials is carried out in the article*

*Keywords: dielcometer method, “material type” uncertainty, adaptive moisture meter*

## 1. Постановка задачи исследования

Диэлькометрический метод контроля состава и свойств различных веществ широко применим во многих отраслях народного хозяйства. Для настоящего момента времени справедливо утверждать, что в области влагометрии жидкостей и сыпучих материалов наиболее распространенными являются именно диэлькометрические влагомеры [1, 2]. Но, как показано, например, в [3], для данного метода имеет место значительное количество источников неопределенностей, среди которых одним из наиболее существенных можно назвать различие относительных диэлектрических проницаемостей материалов разного происхождения в обезвоженном состоянии. Оно может быть обусловлено сортом или типом материала, районом выращивания, условиями произрастания, способами хранения и переработки (для сыпучих материалов, в частности, зерна) или же местом добычи и способами переработки (для нефтепродуктов [4]).

Исходя из вышесказанного, проблемная ситуация может быть сформулирована как необходимость разработки комплекса мер, направленных на эффективную компенсацию так называемой «сортковой» неопределенности средств измерения влажности.

## 2. Анализ современных исследований и публикаций

В настоящее время химический состав, т.е. сорт или тип материала, как правило, учитывается введением калибровочных кривых для сортов (типов)

максимально возможного количества наименований материалов в память микропроцессорного блока влагомера. Также влагомеры комплектуют соответствующими таблицами и (или) проводят перед каждой серией измерений специальную калибровку. Но, к сожалению, спрогнозировать особенности химического состава каждого нового объекта измерения невозможно, как невозможно формализовать изменение «сортковой» неопределенности, и таким образом перевести ее в разряд систематических. Следовательно, вышеперечисленные приемы нельзя назвать в достаточной степени эффективными.

В ходе предварительного анализа перечня уже разработанных и опубликованных способов измерения влажности различных материалов по патентной документации, результаты которого изложены в [5], удалось выделить перспективную группу способов. Их суть заключается в формировании тестовых воздействий путем введения в исходный исследуемый материал известного объема воды или диэлектрического вещества с известной диэлектрической проницаемостью. Результат измерения при этом определяется по изменению диэлектрической проницаемости исходной пробы после тестовых воздействий с использованием тестовых методов. В первую очередь данные методы привлекательны высокой степенью адекватности с точки зрения физической модели процесса. Второе важное преимущество – возможность компенсации «сортковой» неопределенности уже в первичном преобразователе, что, вне всякого сомнения, удобно.

Варианты реализации данной идеи представлены в работах [6, 7, 8] (предлагается делить исследуемое ве-

щество на два потока, каждый из которых пропускают через отдельный первичный преобразователь, причем в один из потоков непрерывно подают заданный расход воды), [9] (кроме добавки воды предлагается выполнять добавку безводного вещества с известной диэлектрической проницаемостью), [10] (в пространство емкостного преобразователя вводят капсулу с водой вытянутой формы известного объема) и [11] (предлагается введение в пространство первичного измерительного преобразователя определенного количества цилиндров с известным объемом и диэлектрической проницаемостью, имитирующих добавку безводной среды).

Осталось установить, как данные способы будут работать в условиях изменения диэлектрической проницаемости исходного безводного материала в широких пределах и насколько качественно происходит компенсация этого изменения.

### 3. Цель исследования

Цель данного исследования заключается в количественном определении вариации результата измерения влажности при использовании группы способов, отмеченных в предыдущем разделе, при значительном изменении диэлектрической проницаемости материала – носителя влаги и выполнении теоретически обоснованного сравнительного анализа полученных результатов.

### 4. Основные результаты исследования

В источнике [7] в качестве основополагающего принципа формирования тестов при определении влажности принят метод добавок контролируемой среды в образец. Предлагается делить поток контролируемой среды на две части, и в каждом канале размещать свой емкостный первичный преобразователь. В первом потоке контролируют диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_1$  исходного материала с неизвестной влажностью  $W_1$ , а функциональную связь между ними описывают упрощенной формулой Винера:

$$\epsilon_1 = \epsilon_n \cdot (1 + 3W_1), \tag{1}$$

где  $\epsilon_n$  – диэлектрическая проницаемость безводного образца.

Во второй канал непрерывно подают заданный расход воды и опять измеряют диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_2$  смеси с новым значением влажности  $W_2$ :

$$\epsilon_2 = \epsilon_n \cdot (1 + 3k_1(W_1 + \Theta_1)), \tag{2}$$

где  $\Theta_1 = \Delta V_b / V_o$  ;  
 $\Delta V_b$  – заданный объем добавленной воды;  
 $V_o$  – исходный объем контролируемого образца;

$$k_1 = 1 / (1 + \Theta_1).$$

Решая совместно (1) и (2) в [7] получают зависимость влажности контролируемого образца  $W_1$  от измеренных значений  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ :

$$W_1 = \frac{(3k_1 \cdot \Theta_1 + 1) \cdot \epsilon_1 - \epsilon_2}{3\epsilon_2(1 - k_1 \cdot \epsilon_1)}. \tag{3}$$

Выражение (3) в той же форме, что и в источнике [7], но, если проделать требуемые действия с выражениями (1) и (2) самостоятельно, выйдет несколько иная зависимость для  $W_1$ :

$$W_1 = \frac{(3k_1 \cdot \Theta_1 + 1) \cdot \epsilon_1 - \epsilon_2}{3(\epsilon_2 - k_1 \cdot \epsilon_1)}. \tag{4}$$

Поэтому следует проверить степень влияния «сотовой» неопределенности на результат измерения как выражение (3), так и выражение (4). Данную проверку можно выполнить следующим образом. Допустим, что в наличии экспериментатора имеется три обезвоженных пробы с исходными диэлектрическими проницаемостями, равными соответственно:  $\epsilon_{n1} = 2$ ;  $\epsilon_{n2} = 3$ ;  $\epsilon_{n3} = 4$ . Пользуясь выражениями (1,2), можно легко рассчитать значения  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  для каждой из проб, задавая добавляемым количеством воды и исходной влажностью пробы  $W_1$  так, как это показано в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения диэлектрических проницаемостей

$W_1$	$\epsilon_n$		
	2	3	4
0,0	2,0	3,0	4,0
0,1	2,6	3,9	5,2
0,2	3,2	4,8	6,4
0,3	3,8	5,7	7,6
0,4	4,4	6,6	8,8

Выбранный шаг изменения влажности обусловлен тем, что известное количество воды, добавляемое в исходную пробу, равно 10% от общего объема. Имея эти расчеты, можно сказать, что, если взята исходная проба материала с  $\epsilon_n = 2$ , то  $\epsilon_1 = 2$ ;  $\epsilon_2 = 2,6$ ; если  $\epsilon_n = 3$ , то  $\epsilon_1 = 3$ ;  $\epsilon_2 = 3,9$  и т.д. Теперь, подставляя значения  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  для проб с разными  $\epsilon_n$  в (4), необходимо убедиться в том, что  $W_1$  будет меняться только от влажности пробы, а не от типа материала  $\epsilon_n$ . Результаты такой проверки для выражения (4) приведены в табл. 2.

Как видим,  $W_1$  от  $\epsilon_n$  действительно не зависит и, при соответствующем нормировании расчетного значения влажности  $W_{1p}$ , метод работоспособен.

Таблица 2

Результаты проверки независимости значений влажности от  $\epsilon_n$

$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$	$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$
2	2,0	2,6	0,0	-0,025	3	5,7	6,6	0,3	0,145
2	2,6	3,2	0,1	0,04	3	6,6	7,5	0,4	0,188
2	3,2	3,8	0,2	0,096	4	4,0	5,2	0,0	-0,025
2	3,8	4,4	0,3	0,145	4	5,2	6,4	0,1	0,04
2	4,4	5,0	0,4	0,188	4	6,4	7,6	0,2	0,096
3	3,0	3,9	0,0	-0,025	4	7,6	8,8	0,3	0,145
3	3,9	4,8	0,1	0,04	4	8,8	10,0	0,4	0,188
3	4,8	5,7	0,2	0,096					

Аналогично проверим выражение (3) (см. табл. 3).

**Таблица 3**

Результаты проверки независимости значений влажности для выражения (3)

$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$	$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$
2	2,0	2,6	0,0	0,0096	3	5,7	6,6	0,3	-0,0078
2	2,6	3,2	0,1	-0,0079	3	6,6	7,5	0,4	-0,0094
2	3,2	3,8	0,2	-0,012	4	4,0	5,2	0,0	0,0029
2	3,8	4,4	0,3	-0,013	4	5,2	6,4	0,1	-0,0029
2	4,4	5,0	0,4	-0,013	4	6,4	7,6	0,2	-0,0048
3	3,0	3,9	0,0	0,0045	4	7,6	8,8	0,3	-0,0053
3	3,9	4,8	0,1	-0,0042	4	8,8	10,0	0,4	-0,0057
3	4,8	5,7	0,2	-0,00697					

В расчетных данных для  $W_{1p}$ , представленных в табл. 3, имеет место существенное влияние  $\epsilon_n$  на результат измерения, поэтому удачным можно считать выражение (4).

При этом в [7, 8] отмечается, что для влагосодержания водно-нефтяной эмульсии в диапазоне от 0 до 5% имеет место линейная зависимость между влажностью и диэлектрической проницаемостью.

Но, как правило, даже в этом диапазоне влажностей связь между диэлектрической проницаемостью эмульсии и содержанием в ней воды описывают нелинейными функциями [12]. Тем более линейная зависимость будет неадекватной для больших влажностей порядка 20...30%.

Посмотрим, как поведет себя выражение (4), если расчетные значения  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  для разных сортов материала определять не по линейной зависимости (1), а, например, по полноценной формуле Винера (см. табл. 4).

**Таблица 4**

Расчетные значения диэлектрических проницаемостей для формулы Винера

$W_1$	$\epsilon_n$			
	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

Если сравнить табл. 1 и 4, видно, что значение  $\epsilon_n$ , рассчитанное для одинаковых условий, отличается существенно. Осуществим проверку на независимость от  $\epsilon_n$  аналогично табл. 2 (см. табл. 5).

Как видно из табл. 5, параметр  $W_1$  существенно зависит от сорта материала и, кроме того, не обладает монотонно возрастающим характером.

В [6, 7] также предлагается другое выражение для построения аддитивного теста, вновь представляющее собой упрощенную формулу Винера (5).

$$\epsilon_1 = \epsilon_n \left( 1 + \frac{3W_1}{1 - W_1} \right), \quad \epsilon_2 = \epsilon_n \left( 1 + \frac{3W_1 + k_1}{1 - W_1} \right). \quad (5)$$

где  $k_1$  – объем добавляемой воды.

Из системы (5) получаем:

$$W_1 = \frac{\left( 1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right) + 3k_1}{2 \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right)}. \quad (6)$$

Проверим, как будет себя вести выражение (6) в оговоренных выше условиях.

Для начала, аналогично табл. 1, 4, представим расчетные данные для упрощенной формулы Винера (5) (см. табл. 6).

**Таблица 5**

Результаты проверки независимости значений влажности от  $\epsilon_n$

$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$	$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$
2	2,0	2,614	0,0	-0,03	3	3,0	3,885	0,0	-0,021
2	2,614	3,368	0,1	-0,016	3	3,885	4,963	0,1	-0,0066
2	3,368	4,317	0,2	-0,01	3	4,963	6,305	0,2	-0,0004
2	4,317	5,545	0,3	-0,013	3	6,305	8,022	0,3	-0,0021
2	5,545	7,200	0,4	-0,024	3	8,022	10,295	0,4	-0,012
2,5	2,5	3,252	0,0	-0,026	3,5	3,5	4,512	0,0	-0,016
2,5	3,252	4,173	0,1	-0,011	3,5	4,512	5,741	0,1	-0,002
2,5	4,173	5,324	0,2	-0,0052	3,5	5,741	7,262	0,2	-0,0046
2,5	5,324	6,806	0,3	-0,0074	3,5	7,262	9,197	0,3	0,0032
2,5	6,806	8,784	0,4	-0,018	3,5	9,197	11,738	0,4	-0,0056

**Таблица 6**

Расчетные значения диэлектрических проницаемостей для упрощенной формулы Винера

$W_1$	$\epsilon_n$			
	2	2,5	3	3,5
0,0	2,0	2,5	3,0	3,5
0,1	2,667	3,333	4,000	4,667
0,2	3,500	4,375	5,250	6,125
0,3	4,571	5,714	6,857	8,000
0,4	6,000	7,500	9,000	10,500

Снова выполним проверку на независимость от изменения  $\epsilon_n$  аналогично табл. 2, 3, 5 (см. табл. 7).

**Таблица 7**

Результаты проверки независимости значений влажности от  $\epsilon_n$

$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$	$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$
2	2,0	2,667	0,0	-0,05	3	3,0	4,000	0,0	-0,05
2	2,667	3,500	0,1	-0,02	3	4,000	5,250	0,1	-0,02
2	3,500	4,571	0,2	-0,0098	3	5,250	6,857	0,2	-0,0098
2	4,571	6,000	0,3	-0,02	3	6,857	9,000	0,3	-0,02
2	6,000	8,000	0,4	-0,05	3	9,000	12,000	0,4	-0,05
2,5	2,5	3,333	0,0	-0,05	3,5	3,5	4,667	0,0	-0,05
2,5	3,333	4,375	0,1	-0,02	3,5	4,667	6,125	0,1	-0,02
2,5	4,375	5,714	0,2	-0,0098	3,5	6,125	8,000	0,2	-0,0098
2,5	5,714	7,500	0,3	-0,02	3,5	8,000	10,500	0,3	-0,02
2,5	7,500	10,000	0,4	-0,05	3,5	10,500	14,000	0,4	-0,05

Из таблицы видно, что инвариантность по отношению к изменению сорта материала обеспечивается, но статическая характеристика преобразования вновь не является монотонно возрастающей.

Результаты проверки на инвариантность со значениями  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , рассчитанными по упрощенной формуле Винера и взятыми из табл. 4, представлены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты проверки независимости значений влажности от  $\epsilon_n$ , рассчитанных по полноценной формуле Винера

$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$	$\epsilon_n$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$W_1$	$W_{1p}$
2	2,0	2,614	0,0	-0,011	3	3,0	3,885	0,0	0,0085
2	2,614	3,368	0,1	0,020	3	3,885	4,963	0,1	0,041
2	3,368	4,317	0,2	0,032	3	4,963	6,305	0,2	0,055
2	4,317	5,545	0,3	0,027	3	6,305	8,022	0,3	0,051
2	5,545	7,200	0,4	0,026	3	8,022	10,295	0,4	0,029
2,5	2,5	3,252	0,0	-0,0013	3,5	3,5	4,512	0,0	0,019
2,5	3,252	4,173	0,1	0,030	3,5	4,512	5,741	0,1	0,051
2,5	4,173	5,324	0,2	0,044	3,5	5,741	7,262	0,2	0,066
2,5	5,324	6,806	0,3	0,039	3,5	7,262	9,197	0,3	0,063
2,5	6,806	8,784	0,4	0,016	3,5	9,197	11,738	0,4	0,030

Как видим, влияние «сортовой» неопределенности по-прежнему сильно.

## 5. Выводы и перспективы

В настоящее время уже проделана определенная работа, направленная на отыскание и опробование более эффективных способов формирования тестовых алгоритмов, позволяющих в достаточной степени качественно компенсировать «сортовую» неопределенность исследуемых материалов. В частности, неплохие результаты получены при использовании метода наименьших квадратов и интерполяционного полинома Лагранжа (как и в источнике [13] выбирались три контрольных точки). Экспериментальные исследования продолжаются.

Ввиду того, что в данный момент авторство еще не подтверждено, в целях соблюдения конфиденциальности суть данных исследований будет изложена позднее.

## Литература

1. Крушевский Ю.В. Влияние массообмена воды на точность измерения влажности зерна / Ю.В. Крушевский, Я.А. Бородай // Наукові праці ВНТУ. – 2007. – № 1. – С. 20 – 26.
2. Секанов Ю.П. Некоторые концепции развития влагометрии сельскохозяйственных материалов за рубежом / Ю.П. Секанов // Измерительная техника. – 1990. - № 6. – С. 58 – 61.
3. Овчаренко А.И. О погрешности измерительного преобразования во влагомерах / А.И. Овчаренко, М.В. Шапиро // Хранение и переработка зерна. – 2002. – № 4. (34). – С. 36 – 39.
4. Лидерман И.С. Методы и приборы для измерения влажности жидких сред в нефтепереработке и нефтехимии / И.С. Лидерман. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1972. – 89 с.
5. 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. Т.Г. Шевченка. – 2008. – Вип. № 15. – С. 50 – 57.
6. А.с. 1423952 СССР, МКИ<sup>3</sup> 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.
7. Кудрявцев А.В. Емкостные измерители влажности жидких сред / А.В. Кудрявцев, В.И. Шевченко. – Фрунзе: «Илим», 1989. – 53 с.
8. Pat. 4916940 US, Int. Cl.<sup>4</sup> G01 N 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.
9. А.с. 1332216 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 N 27/22. Способ определения влажности жидких сред / А.В. Кудрявцев, В.Н. Шевченко (СССР). – № 3988926/31-25; заявл. 11.12.85; опубл. 23.08.87, Бюл. № 31. – 4 с.: ил.
10. А.с. 1157439 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 N 27/22. Способ измерения влажности эмульсии / Б.В. Лункин, А.П. Гридасов, А.В. Иванов, А.С. Совлуков, А.В. Шлемин (СССР). – № 3665889/24-25; заявл. 31.10.83; опубл. 23.05.85, Бюл. № 19. – 3 с.: ил.
11. А.с. 1265571 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 N 27/22. Способ измерения влажности нефти и нефтепродуктов / А.П. Гридасов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков, А.В. Шлемин (СССР). – № 3905781/28-25; заявл. 04.06.85; опубл. 23.10.86, Бюл. № 39. – 3 с.: ил.
12. Теория и практика экспрессного контроля влажности сыпучих материалов / Е.С. Кричевский, В.К. Бензарь, М.В. Венедиктов и др.; под ред. Е.С. Кричевского. – М.: Энергия, 1980. – 240 с.
13. А.с. 1332216 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01 N 27/22. Способ определения влажности жидких сред / А.В. Кудрявцев, В.Н. Шевченко (СССР). – № 3988926/31-25; заявл. 11.12.85; опубл. 23.08.87, Бюл. № 31. – 4 с.: ил.