

УДК 621.317.39

Е. Ю. ГОЛУБ<sup>1,2</sup>, А. В. ЗАБОЛОТНЫЙ<sup>1</sup>, Н. Д. КОШЕВОЙ<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*<sup>2</sup> *НПП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД, Украина*

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕСТОВОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНВАРИАНТНОСТИ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИХ ВЛАГОМЕРОВ К СОРТУ ВЕЩЕСТВА

*Предложен способ, позволяющий компенсировать сортовую неопределённость для диэлькометрических влагомеров. Проведён анализ способов определения влажности в рамках диэлькометрического метода, позволяющих компенсировать влияние сорта материала. В результате анализа выявлено наиболее перспективное направление исследований – тестовые методы. Для реализации тестового подхода выбраны структурная схема измерительной системы, включающая блоки аддитивного и мультипликативного тестов, и тестовый алгоритм. В соответствии с выбранным алгоритмом проведено несколько замеров ёмкости первичного преобразователя: с исследуемой пробой вещества, с добавкой известного количества воды, путём изменения ёмкости исходного вещества в  $k$ -раз и путём изменения ёмкости исходного вещества с добавкой воды в  $k$ -раз. Получены выражения для определения влажности материала при различных добавках воды и коэффициентах мультипликативного теста. В результате синтеза данных выражений получено выражение, инвариантное к изменению диэлектрической проницаемости и обеспечивающее хорошую сходимость результатов.*

**Ключевые слова:** *влажность, диэлькометрический влагомер, сортовая неопределённость, аддитивный тест, мультипликативный тест, тестовые методы.*

### Постановка проблемы

Определение влажности веществ является неотъемлемым параметром контроля качества производимой продукции. Повышенное содержание воды в авиационном топливе может привести к серьёзным нарушениям в работе двигателя самолёта. Наглядным примером тому является крушение самолета Ан-124 («Руслан») 6.12.1996 года в г. Иркутске, которое произошло из-за большого нештатного количества воды в топливе: вода при отрицательных температурах замерзала, и льдообразования перекрыли проход топлива через фильтры, результатом чего явились помпажи двух двигателей Д-18Т и отказ электромагнитного клапана на третьем двигателе [1].

Даже небольшое количество воды в дизельном топливе приводит к ухудшению его смазывающих свойств, что пагубно влияет на работу топливной системы автомобиля и приводит к уменьшению её срока эксплуатации [2].

Не менее важным является контроль обводнённости нефти для нефтедобывающей промышленности, поскольку от содержания воды зависят основные физико-химические свойства нефти. Вода не только осложняет переработку нефти, но и ухудшает качество нефтепродуктов, снижая теплотворную способность и вызывая коррозию металлических деталей оборудования. Известно, что содержание

пластовой воды в сырой нефти достигает порядка 10 %. Тогда как согласно нормам, установленным в [3], содержание воды в нефти не должно превышать 0,5 % для первой и второй групп и 1,0 % для третьей группы (группа определяется фракционным составом нефти).

В настоящее время в области влагометрии наибольшее распространение получили диэлькометрические влагомеры в силу наличия у них ряда преимуществ. Принцип работы данных влагомеров основан на определении влажности по измеренному значению ёмкости первичного измерительного преобразователя (ПИП), заполненного исследуемым материалом [4]. Из этого следует, что влажность является функцией от диэлектрической проницаемости исследуемого материала, которая отличается для различных веществ. Таким образом, одним из основных недостатков применения диэлькометрических влагомеров является наличие зависимости влажности от сорта вещества.

### Анализ последних исследований и публикаций

На сегодняшний день существует несколько способов компенсации сортовой неопределённости диэлькометрических влагомеров. Наибольшее распространение получил способ, основанный на определении влажности материала по калибровочным

таблицам либо с применением градуировочных кривых [5, 6]. Суть данного способа заключается в определении влажности по предварительно построенной зависимости от некоторой величины (ёмкости ПИП, частоты, тока и т.д.), зависящей от содержания воды в исследуемом материале. Данный способ положен в основу большинства производимых влагомеров. Недостатком данного способа является необходимость постоянного проведения градуировки влагомеров на заданный состав вещества. При этом очевидным является тот факт, что количество веществ и марок одного и того же вещества столь велико, что учесть их является чрезвычайно сложной задачей.

Другим способом, позволяющим избавиться от начальной диэлектрической проницаемости (т.е. от сорта вещества), является способ, основанный на измерении ёмкости ПИП с исследуемым веществом в исходном и обезвоженном состоянии [7] или с исследуемым и образцовым веществом [8]. В первом случае основную сложность составляет обеспечение гарантированно полного обезвоживания материала. А в случае с исследуемым и образцовым веществом – получение образцового вещества с заданной диэлектрической проницаемостью.

Ещё одним вариантом решения проблемы сортовой зависимости диэлькометрических влагомеров является способ определения влажности путём измерения диэлектрической проницаемости при повышенной и пониженной температурах [9]. В силу ряда недостатков, связанных, прежде всего, с трудностью замораживания вещества до полного исчезновения жидкой фазы, а также применения замораживания для веществ, находящихся в непрерывном потоке, данный способ не получил широкого распространения в области влагометрии.

Одним из перспективных направлений решения поставленной проблемы видится использование так называемых тестовых методов. Суть данных методов состоит в формировании нескольких тестов, каждый из которых несёт дополнительную информацию об измеряемой величине. Результаты тестовых воздействий записывают в виде системы математических уравнений, решая которую находят необходимую зависимость.

В ранних работах [10, 11] уже сделаны попытки компенсации сортовой неопределённости с использованием тестовых воздействий. В статье [10] влажность вещества определяется путём проведения трёх замеров (диэлектрической проницаемости исходной пробы вещества; диэлектрической проницаемости пробы, после добавления в неё воды – первое тестовое воздействие; диэлектрической проницаемости, полученной после добавления ко второй пробе ещё такого же количества воды – второе

тестовое воздействие) с последующей аппроксимацией результатов тестовых воздействий методом наименьших квадратов (МНК). Результаты проверки полученного выражения влажности на инвариантность показали хорошую сходимость результатов лишь в диапазоне влажности (0–20) %. В статье [11] выполнен аналогичный расчёт влажности вещества, но с применением интерполяционного полинома Лагранжа. В этом случае компенсация сортовой неопределённости возможна для веществ с диэлектрической проницаемостью от 2 до 3,5 в диапазоне (0–20) % и для веществ с диэлектрической проницаемостью от 2,5 до 3,5 в диапазоне (0–30) %. Таким образом, выражения, полученные в данных работах, не позволяют в полной мере компенсировать сортовую неопределённость в заданном диапазоне значений влажности для выбранных величин диэлектрической проницаемости.

### Формулировка цели статьи

Целью статьи является исследование и применение тестовых методов в качестве наиболее эффективного способа компенсации сортовой неопределённости диэлькометрических влагомеров. Основными требованиями, предъявляемыми к выбранному способу, являются возможность его применения как в лабораторных, так и в производственных условиях и возможность определения влажности вещества, находящегося в непрерывном потоке.

### Реализация тестового подхода для решения проблемы сортовой неопределённости

Для формирования тестов будем использовать измерительную систему, структурная схема которой приведена на рис. 1 [12, 13].

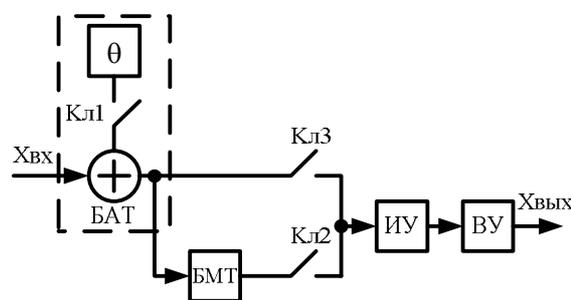


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы для аддитивного и мультипликативного тестов:

БАТ – блок аддитивного теста; БМТ – блок мультипликативного теста; ИУ – измерительное устройство; ВУ – вычислительное устройство; Кл – ключ

Особенностью данной схемы является отсутствие влияния коэффициента преобразования блока мультипликативного теста (БМТ) на результат измерения. Это достигается тем, что вход БМТ соединён с выходом блока аддитивного теста (БАТ) и введено ещё одно дополнительное преобразование. Процесс измерения состоит из четырёх тактов. В первом такте ключи Кл1 и Кл2 разомкнуты, а ключ Кл3 замкнут и на вход измерительного устройства (ИУ) подаётся непосредственно измеряемая величина  $X$  (в нашем случае – влага  $W$ ). Во втором такте замыкаются Кл1 и Кл3, на вход ИУ подаётся аддитивный тест  $X + \theta$ . В третьем такте Кл1 и Кл3 замыкаются, а Кл2 замыкается, подключая на вход ИУ выходную величину  $k \cdot X$  БМТ. В четвертом такте при разомкнутом ключе Кл3 замыкаются ключи Кл1 и Кл2, подключая тем самым ко входу ИУ тест вида  $k \cdot (X + \theta)$ .

Тестовый алгоритм в этом случае может быть получен по формуле [12]:

$$X = \frac{Y_2 - Y_1}{(Y_2' - Y_1') - (Y_2 - Y_1)} \cdot \theta, \quad (1)$$

где  $X$  – измеряемая величина влажности;

$Y_1$  – результат преобразования измеряемой величины влажности  $X$ ;

$Y_2$  – результат преобразования мультипликативного теста вида  $k \cdot X$ ;

$Y_1'$  – результат преобразования аддитивного теста  $X + \theta$ ;

$Y_2'$  – результат преобразования мультипликативного теста вида  $k(X + \theta)$ .

### Синтез тестовых методов

Наибольшее распространение при определении влажности веществ для диэлькометрических измерений получила формула Винера [14]:

$$\varepsilon = \varepsilon_H \left( 1 + \frac{3W}{\frac{\varepsilon_B + 2\varepsilon_H}{\varepsilon_B - \varepsilon_H} - W} \right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества с влагой;

$\varepsilon_H$  – диэлектрическая проницаемость безводного образца вещества;

$W$  – влажность вещества;

$\varepsilon_B$  – диэлектрическая проницаемость воды (равна 80).

В нашем случае для расчётов будем использовать упрощённую формулу Винера, представленную

в виде линейной зависимости [15]:

$$\varepsilon = \varepsilon_H (1 + 3W). \quad (3)$$

С помощью математических преобразований выражения (2) получим выражение для определения влажности:

$$W = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_H)(\varepsilon_B + 2\varepsilon_H - \varepsilon_B W + \varepsilon_H W)}{3\varepsilon_H(\varepsilon_B - \varepsilon_H)}. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4) влажность  $W$  является функцией от диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_H$  (т.е. зависит от сорта вещества). Для того чтобы избавиться от данной зависимости применим описанный выше тестовый алгоритм.

При формировании тестового подхода авторами установлено, что для получения желаемого результата достаточно проведения трёх тестов. Алгоритм выглядит следующим образом.

На первом этапе измеряется ёмкость ПИП с исследуемой пробой вещества:

$$C_1 = \varepsilon_H (1 + 3W)g,$$

где  $g$  – пространственная характеристика электрического поля зазора, который образован формой электродов выбранного ПИП (равна 10 м).

Для первого теста в исследуемое вещество добавляют некоторое заранее известное количество воды и измеряют ёмкость ПИП:

$$C_2 = \varepsilon_H (1 + 3(W + \Delta W))g,$$

где  $\Delta W$  – добавка воды для аддитивного теста, равная 0,1 (10 %).

Второй тест формируется путём изменения ёмкости исходного вещества в  $k$ -раз:

$$C_3 = k \cdot \varepsilon_H (1 + 3W)g,$$

где  $k$  – коэффициент для мультипликативного теста, равный 2.

Третий тест может быть получен путём изменения ёмкости вещества с добавкой воды в  $k$ -раз:

$$C_4 = k \cdot \varepsilon_H (1 + 3(W + \Delta W))g.$$

Таким образом, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} C_1 = \varepsilon_H (1 + 3W)g; \\ C_2 = \varepsilon_H (1 + 3(W + \Delta W))g; \\ C_3 = k \cdot \varepsilon_H (1 + 3W)g; \\ C_4 = k \cdot \varepsilon_H (1 + 3(W + \Delta W))g. \end{cases} \quad (5)$$

Согласно (1) в ходе решения системы (5) получим выражение:

$$W_{\text{расч1}} = \frac{(C_3 - C_1) \cdot \Delta W}{(C_4 - C_2) - (C_3 - C_1)}. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что при использовании предложенного тестового алгоритма влажность вещества не зависит от диэлектрической проницаемости. Однако электрические ёмкости  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  косвенно зависят от  $\varepsilon_H$  исследуемого материала.

ла, поэтому проверка выражения (6) на инвариантность проводится следующим образом:

$$\begin{aligned} C_1 &= g \cdot \varepsilon_1; \\ C_2 &= g \cdot \varepsilon_2; \\ C_3 &= g \cdot \varepsilon_1 \cdot k; \\ C_4 &= g \cdot \varepsilon_2 \cdot k, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость исходного материала;

$\varepsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость материала с добавкой воды  $\Delta W$ , равной 0,1 (10 %).

Для проверки выражения (6) на инвариантность используем формулу Винера (2) без принятых упрощений:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_H \left( 1 + \frac{3W}{\frac{\varepsilon_B + 2\varepsilon_H}{\varepsilon_B - \varepsilon_H} - W} \right);$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_H \left( 1 + \frac{3(W + \Delta W)}{\frac{\varepsilon_B + 2\varepsilon_H}{\varepsilon_B - \varepsilon_H} - (W + \Delta W)} \right).$$

Итак, пусть диэлектрические проницаемости  $\varepsilon_1$  исходного материала равны 2,0; 2,5; 3,0 и 3,5. Будем изменять влажность этих веществ путём добавления в них воды. В качестве контрольных точек выберем 0 (0 %), 0,1 (10 %), 0,2 (20 %), 0,3 (30 %). Расчётные значения диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_2$  приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Расчётные значения диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_2$

Диэлектрическая проницаемость ( $\varepsilon_H$ )	Влажность (W)				
	0	0,1	0,2	0,3	0,4
2	2,0	2,614	3,368	4,317	5,545
2,5	2,5	3,252	4,173	5,324	6,806
3	3,0	3,885	4,963	6,305	8,022
3,5	3,5	4,512	5,741	7,262	9,197

Подставив в выражения (7) известные значения величин  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $g$ ,  $k$  получим ёмкости ПИП, которые необходимы при вычислении расчётного значения влажности согласно формуле (6). Результаты расчётов влажности вещества приведены в табл. 2 для рассматриваемого выражения.

Очевидным является тот факт, что при увеличении влажности вещества  $W$  расчётное значение влажности  $W_{расч}$  также должно увеличиваться. Как видно из представленных в табл. 2 результатов, монотонное возрастание значений влажности отсут-

ствует и инвариантности к изменению  $\varepsilon_H$  нет.

Таблица 2  
Результаты расчётов влажности вещества

Диэлектрическая проницаемость ( $\varepsilon_H$ )	Расчётное значение влажности ( $W_{расч}$ )			
	0	0,1	0,2	0,3
2	0,326	0,347	0,355	0,351
2,5	0,332	0,353	0,362	0,359
3	0,339	0,36	0,37	0,367
3,5	0,346	0,367	0,377	0,375

Таким образом, есть необходимость в формировании ещё одного теста с большей добавкой воды. В этом случае получим систему уравнений:

$$\begin{cases} C_1 = \varepsilon_H(1 + 3W)g; \\ C_2' = \varepsilon_H(1 + 3(W + \Delta W'))g; \\ C_3' = k' \cdot \varepsilon_H(1 + 3W)g; \\ C_4' = k' \cdot \varepsilon_H(1 + 3(W + \Delta W'))g, \end{cases} \quad (8)$$

где  $C_1$ ,  $C_2'$ ,  $C_3'$ ,  $C_4'$  – ёмкость ПИП с исходной пробой вещества и при формировании аддитивного и двух мультипликативных тестов, пФ;

$\Delta W'$  – добавка воды для аддитивного теста, равная 0,2 (20 %);

$k'$  – коэффициент для мультипликативного теста, равный 4.

Как и в первом случае, система уравнений (8) решается согласно (1):

$$W_{расч2} = \frac{(C_3' - C_1) \cdot \Delta W}{(C_4' - C_2') - (C_3' - C_1)}.$$

Ёмкости ПИП могут быть определены следующим образом:

$$\begin{aligned} C_1 &= g \cdot \varepsilon_1; \\ C_2' &= g \cdot \varepsilon_2'; \\ C_3' &= g \cdot \varepsilon_1 \cdot k'; \\ C_4' &= g \cdot \varepsilon_2' \cdot k', \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_2'$  – диэлектрическая проницаемость материала с добавкой воды  $\Delta W'$ .

Проверяем на инвариантность комбинацию двух тестовых выражений, представленную ниже:

$$\frac{W_{расч2} + W_{расч1}}{W_{расч2} - W_{расч1}} = \frac{(C_3' - C_1) \cdot \Delta W'}{(C_4' - C_2')(C_3' - C_1)} + \frac{(C_3 - C_1) \cdot \Delta W}{(C_4 - C_2)(C_3 - C_1)}, \quad (9)$$

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

Результаты расчётов влажности вещества приведены в табл. 3.

Таблица 3  
Результаты расчётов влажности вещества

Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_n$ )	Расчётное значение влажности ( $W_{расч}$ )			
	0	0,1	0,2	0,3
2	-18,538	-16,538	-14,538	-12,538
2,5	-18,935	-16,935	-14,935	-12,935
3	-19,338	-17,338	-15,338	-13,338
3,5	-19,745	-17,745	-15,745	-13,745

Из табл. 3 видно, что инвариантности к изменению  $\epsilon_n$  нет.

Значение  $W_{расч}$  возрастает с ростом  $\epsilon_n$ , следовательно, необходимо внести коррекцию в знаменатель выражения (9) для его более интенсивного увеличения с ростом  $\epsilon_n$ . С целью получения оптимального знаменателя, будем изменять множитель при  $C_1$  выражения с шагом  $h$ .

Таким образом, в результате анализа комбинаций найдено выражение, для которого расхождение расчётных значений влажности является минимальным. При дальнейшем изменении коэффициента с указанным шагом расхождение увеличивается. Данное выражение имеет вид:

$$\frac{W_{расч2} + W_{расч1}}{(W_{расч2} - W_{расч1}) \cdot (1 + 0,0045 \cdot C_1)} \quad (10)$$

Результаты расчётов влажности вещества приведены в табл. 4.

Таблица 4  
Результаты расчётов влажности вещества

Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_n$ )	Расчётное значение влажности ( $W_{расч}$ )			
	0	0,1	0,2	0,3
2	-17,008	-14,798	-12,625	-10,499
2,5	-17,021	-14,773	-12,574	-10,435
3	-17,038	-14,758	-12,538	-10,39
3,5	-17,058	-14,75	-12,513	-10,36

Результаты расчётов, полученные для выражения (10), имеют минимальное расхождение и являются монотонно возрастающими.

Значения влажности, полученные в табл. 4, являются ненормированными. Нормирование значений включает следующие этапы:

а) перевод  $W_{расч}$  в область положительных значений:

$$W_{положит} = |W_{расч \max}| + W_{расч},$$

где  $|W_{расч \max}|$  – максимальное по модулю значение влажности для табл. 4, равное 17,058;

б) совмещение диапазонов:

$$W_{норм} = W_{положит} / x,$$

где  $x = 0,04461$ .

Нормированные значения приведены в табл. 5.

Таблица 5  
Нормированные значения результатов расчётов влажности

Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_n$ )	Расчётное значение влажности ( $W_{расч}$ )			
	0	0,1	0,2	0,3
2	0,002	0,101	0,198	0,293
2,5	0,002	0,102	0,2	0,295
3	0,001	0,103	0,202	0,297
3,5	0	0,103	0,203	0,299

Для сравнения результатов расчётов, приведенных в табл. 5 для выражения (10), с результатами, полученными в более ранних работах [10, 11], применим критерий согласия Пирсона ( $\chi^2$ ), позволяющий оценить степень отклонения расчётных данных от идеальных значений влажности.

Выражение для определения влажности вещества, полученное в работе [10] с применением МНК, может быть представлено в виде (11), а в работе [11] с применением полинома Лагранжа – в виде (12).

$$W_{расч} = \frac{100(0,17\epsilon_1 + 0,17\epsilon_3 - 0,33\epsilon_2)}{\epsilon_3 - 0,013\epsilon_3^2}; \quad (11)$$

$$W_{расч} = 59,2 - \frac{10 \cdot \frac{\epsilon_3 - \epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} + 20 \cdot \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}}{100 - 90 \frac{\epsilon_3 - \epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} - 70 \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}}, \quad (12)$$

где  $\epsilon_3$  – диэлектрическая проницаемость, полученная после добавления ко второй пробе ещё такого же количества воды.

Проверка результатов расчётов на согласованность по критерию Пирсона осуществляется следующим образом. Эмпирическое значение критерия Пирсона может быть определено по формуле:

$$\chi^2_{эмп} = \sum_{i=1}^m \frac{(W_{норм} - W)^2}{W},$$

где  $W_{норм}$  – нормированное значение влажности (используется в качестве эмпирического значения);

$W$  – заданное значение влажности вещества (используется в качестве теоретического).

Рассчитаем эмпирическое значение критерия Пирсона для результатов табл. 5. Для истинного значения влажности 0 видно, что при различных диэлектрических проницаемостях получим эмпирические значения влажности 0,002; 0,002; 0,001 и 0 соответственно; для 0,1 получим величины 0,101; 0,102; 0,103; 0,103 и т.д. Как видно, не все результаты расчётов совпадают с истинными значениями, т.е. есть отклонения. С учётом всех возможных отклонений для табл. 5 получим:

$$\chi^2_{\text{эмп}} = \frac{(0,002-0)^2}{0,002} + \frac{(0,002-0)^2}{0,002} + \frac{(0,001-0)^2}{0,002} + \frac{(0-0)^2}{0,002} + \frac{(0,101-0,1)^2}{0,1} + \frac{(0,102-0,1)^2}{0,1} + \frac{(0,103-0,1)^2}{0,1} + \frac{(0,103-0,1)^2}{0,1} + \frac{(0,198-0,2)^2}{0,2} + \frac{(0,2-0,2)^2}{0,2} + \frac{(0,202-0,2)^2}{0,2} + \frac{(0,203-0,2)^2}{0,2} + \frac{(0,293-0,3)^2}{0,3} + \frac{(0,295-0,3)^2}{0,3} + \frac{(0,297-0,3)^2}{0,3} + \frac{(0,299-0,3)^2}{0,3} = 0,00116.$$

Эмпирические значения критерия Пирсона для результатов расчётов с применением МНК и интерполяционного полинома Лагранжа второго порядка определяются аналогично. Результаты расчётов критерия Пирсона приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчётов критерия Пирсона для табл. 5, МНК и полинома Лагранжа второго порядка

Показатели	$\chi^2_{\text{эмп}}$
Для табл. 5	0,001
Для МНК	0,179
Для полинома Лагранжа второго порядка	0,125

## Выводы

Из табл. 5 видно, что выражение (10), полученное с применением тестовых методов, позволяет компенсировать сортовую неопределённость материалов, имеющих диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_n = 2...3,5$  (например, нефти и нефтепродуктов) с содержанием влаги от 0 % до 30 %. На основании результатов расчётов критерия Пирсона (табл. 6) можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов измерения влажности, т.е. данное выражение позволяет определять влажность вещества с минимальным влиянием сортовой неопределённости. Кроме того, из табл. 6 видно, что выражение

(10) имеет наилучшие показатели сходимости результатов в сравнении с выражениями, полученными в ранних работах по этому направлению исследования.

## Литература

1. Таёвский, Д. *Авиакатастрофа в Иркутске 06.12.1997 [Электронный ресурс]* / Д. Таёвский, М. Божко. – Режим доступа: <http://express.irkutsk.ru/see/news/an124/index.htm>. – 8.11.2014.
2. *Дизельные двигатели. Устройство, обслуживание, ремонт, поиск и устранение неисправностей [Текст]* / под ред. Ф. Г. Ширяева. – М. : Петит, 2002. – 387 с.
3. *ГОСТ Р 51858-2002. Нефть. Общие технические условия [Текст]*. – Введ. 2002-01-08. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 11 с.
4. Берлинер, М. А. *Измерения влажности [Текст]* / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
5. *Пат. RU 2065603 C1 РФ, МПК<sup>6</sup> G 01 N 27/22. Способ определения содержания воды в водонефтяной смеси нефтяных скважин [Текст]* / Бергун С. А., Геригорен В. А., Грачёв А. Г.; заявитель и патентообладатель КБ производственного объединения «Саратовнефтегаз». – № 93000564/25; заявл. 06.01.93; опубл. 20.08.96. – 3 с.
6. *Пат. US 4352059 A США, МПК G 01 N 27/22, G 01 R 27/26. Determination of moisture level in materials [Текст]* / Nam P. Suh, Stephen D. Senturia, Byung H. Kim; заявитель и патентообладатель Massachusetts Institute Of Technology. – № US 06/159,22; заявл. 13.06.80; опубл. 28.09.82. – 4 с.
7. *Пат. SU 1827614 A1 СССР, МПК<sup>5</sup> G 01 N 27/22. Способ определения содержания воды в гидразиновом горючем [Текст]* / Авзалов А. Ф., Литвиненко А. Н., Маньшев Д. А., Калякин А. В. – № 4922229/25; заявл. 28.03.91; опубл. 15.07.93, Бюл. № 26. – 3 с.
8. *Пат. US 4853614 A США, МПК G 01 N 33/38, G 01 R 27/26, G 01 N 27/22. Method and apparatus for measuring moisture content of granular material [Текст]* / Robert L. Carver; заявитель и патентообладатель Carver Robert L. – № US 07/166,623; заявл. 11.03.88; опубл. 01.08.89. – 14 с. : ил.
9. *Пат. US 5073756 A США, МПК G 01 N 27/22. Method and apparatus for measuring the volumetric water content of mineral and/or organic mixtures [Текст]* / Alexander Brandelik; заявитель и патентообладатель Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH. – № US 07/543,133; заявл. 25.06.90; опубл. 17.12.91. – 6 с. : ил.
10. *Заболотний, О. В. Забезпечення задовільного рівня інваріантності адаптивних вологомірів з використанням методу найменших квадратів [Текст]* / О. В. Заболотний // Вісник Хмельницького національного ун-ту. – 2012. – №4. – С. 13-17.
11. *Голуб, К. Ю. Забезпечення інваріантності дількометричних вологомірів до зміни сорту мате-*

ріалу з використанням поліномів Лагранжа [Текст] / К. Ю. Голуб, О. В. Заболотний, М. Д. Кошовий // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – №45. – С. 7-13.

12. Бромберг, Э. М. Тестовые методы повышения точности измерений [Текст] / Э. М. Бромберг, К. Л. Куликовский. – М. : Энергия, 1978. – 176 с.

13. Кондрашов, С. І. Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах [Текст] : монографія / С. І. Кондрашов. – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – 224 с.

14. Кричевский, Е. С. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов [Текст] / Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, М. В. Венедиктов ; под общ. ред. Е. С. Кричевского. – М. : Энергия, 1980. – 240 с.

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

*Поступила в редакцию 8.11.2014, рассмотрена на редколлегии 18.11.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. приёма, обработки и передачи сигналов В. В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### **ЗАСТОСУВАННЯ ТЕСТОВОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНВАРІАНТНОСТІ ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНИХ ВОЛОГОМІРІВ ДО СОРТУ РЕЧОВИНИ**

*К. Ю. Голуб, О. В. Заболотний, М. Д. Кошовий*

Запропоновано спосіб, який дозволяє компенсувати сортову невизначеність для діелькометричних вологомірів. Проведено аналіз способів визначення вологості в рамках діелькометричного методу, що дозволяють компенсувати вплив сорту матеріалу. В результаті аналізу виявлено найбільш перспективний напрям досліджень – тестові методи. Для реалізації тестового підходу обрані структурна схема вимірювальної системи, що включає блоки адитивного та мультиплікативного тестів, і тестовий алгоритм. У відповідності з обраним алгоритмом проведено декілька вимірів ємності первинного перетворювача: з досліджуваною пробєю речовини, з добавкою відомої кількості води, шляхом зміни ємності вихідної речовини в  $k$ -разів і шляхом зміни ємності вихідної речовини з добавкою води в  $k$  разів. Отримано вирази для визначення вологості матеріалу при різних добавках води і коефіцієнтах мультиплікативного тесту. В результаті синтезу даних виразів отримано вираз, що є інваріантним до зміни діельктричної проникності і забезпечує добру збіжність результатів.

**Ключові слова:** вологість, діелькометричний вологомір, сортова невизначеність, адитивний тест, мультиплікативний тест, тестові методи.

### **APPLICATION OF THE TEST APPROACH TO ENSURE THE INVARIANCE OF CAPACITIVE MOISTURE METER THAT IS INVARIANT TO CHANGE OF SUBSTANCE TYPE**

*K. Yu. Holub, O. V. Zabolotnyi, M. D. Koshoyi*

It is proposed the method allowing to compensate the uncertainty of substance type for capacitive moisture meters. It is carried out the analysis of the methods for moisture determining within the capacitive method allowing to compensate the influence of material type. As a result of the analysis the most perspective direction of researches – test methods is revealed. For realization of the test approach the block diagram of measuring system including units of additive and multiplicative tests, and test algorithm are chosen. According to the chosen algorithm some measurements of capacity of primary converter are carried out: with the studied substance sample, with an addition of a known amount of water, by change of initial substance capacity in  $k$ -times and by change of initial substance capacity with water addition in  $k$ -times. The expressions for determination of substance moisture at various water additions and multiplicative test coefficients are obtained. As a result of synthesis of these expressions the equation that is invariant to the dielectric permittivity changes and ensures good convergence of the results is received.

**Key words:** moisture, capacitive moisture meter, uncertainty of substance type, additive test, multiplicative test, test methods.

**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.

**Заболотный Александр Витальевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: zzz77714@meta.ua.

**Кошевой Николай Дмитриевич** – д-р техн. наук, профессор, зав. каф. авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.