

А.А. Коробко

## МНОГОЧАСТОТНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ЖИДКИХ ЭМУЛЬСИЙ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОЙ ДИЭЛЬКОМЕТРИИ

*Запропоновані багаточастотні алгоритми визначення вологовмісту емульсії типу «неполярний рідкий діелектрик – вода» методом резонансної діелькометрії. Використана математична модель емульсії з представленням води у вигляді ідеально провідних сфер. Визначені частотні області коректного застосування моделі у ВЧ та НВЧ діапазонах. У НВЧ діапазоні визначені величини систематичних похибок моделі. Для рішення проблеми «сортової невизначеності» та поліпшення метрологічних характеристик резонансного діелькометричного методу розроблено чотиричастотний алгоритм, що є узагальненим видом три- і двочастотних алгоритмів. Визначена узагальнена метрологічна характеристика чотиричастотного алгоритму та його потенційні можливості. Отримані метрологічні характеристики для три- та двочастотного алгоритмів. Проведено аналіз похибок та коректності теоретичних досліджень шляхом порівняння їх результатів з експериментальними даними для ВЧ та НВЧ діапазонів. Бібл. 10, табл.3, рис. 2.*

*Ключові слова:* вологовміст, резонансна діелькометрія, сортова невизначеність, математична модель емульсії, багаточастотний алгоритм, метрологічна характеристика.

*Предложены многочастотные алгоритмы определения влагосодержания эмульсии типа: «неполярный жидкий диэлектрик – вода» методом резонансной диелькометрии. Использована математическая модель эмульсии с представлением воды в виде идеально проводящих сфер. Определены частотные области применимости модели в ВЧ и СВЧ диапазонах. В СВЧ диапазоне определены величины систематических погрешностей модели. Для решения проблемы «сортовой неопределенности» и улучшения метрологических характеристик резонансного диелькометрического метода разработан четырехчастотный алгоритм, являющийся обобщенным видом трех- и двухчастотных алгоритмов. Определена обобщенная метрологическая характеристика четырехчастотного алгоритма и его предельные характеристики. Получены метрологические характеристики для трех- и двухчастотных алгоритмов. Проведен анализ погрешностей и корректности теоретических исследований путем сравнения их результатов с экспериментальными данными для ВЧ и СВЧ диапазонов. Библ. 10, табл.3, рис.2.*

*Ключевые слова:* влагосодержание, резонансная диелькометрия, сортовая неопределенность, математическая модель эмульсии, многочастотный алгоритм, метрологическая характеристика.

**Введение.** Задача определения влагосодержания технических жидкостей актуальна для практического применения в различных областях промышленности. При этом нижние значения измеряемых величин объемного влагосодержания  $W$  в эмульсиях типа «неполярный жидкий диэлектрик – вода» могут составлять от  $10 \text{ см}^3/\text{м}^3$  для трансформаторного масла до  $100 \text{ см}^3/\text{м}^3$  для авиационного керосина. Измерение таких малых величин влагосодержания является сложной технической задачей и требует разработки методов и технических средств измерения влагосодержания с соответствующими характеристиками.

Использование диелькометрии для расчетного определения величины объемного влагосодержания  $W$  эмульсий базируется на зависимости диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{eml}$  однородной эмульсии типа «жидкий неполярный диэлектрик – вода» от величины влагосодержания и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{nld}$  обезвоженного неполярного жидкого диэлектрика. Причем эта зависимость может быть получена как экспериментально (методом предварительной калибровки влагомеров с применением «эталонных» эмульсий), так и аналитически, в виде функциональной связи величины объемного влагосодержания  $W$  и величин диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_{eml}$  и  $\varepsilon_{nld}$ . Данная функциональная связь определяется на основе различных математических моделей эмульсии. В обоих случаях на достоверность полученных результатов оказывает существенное влияние так называемая «сортовая неопределенность». Это зависимость величины влагосодержания от величины диэлектрической

проницаемости и, следовательно, от сорта исследуемой жидкости.

В данной работе рассматриваются теоретические и практические аспекты способов улучшения метрологических характеристик, как самого диелькометрического метода, так и технических средств измерения влагосодержания неполярных жидкостей с одновременным решением проблемы «сортовой неопределенности».

**Анализ современного состояния задачи.** Для определения низких уровней объемного влагосодержания необходима высокая чувствительность метода. Максимальной чувствительностью характеризуются резонансные диелькометрические методы. Суть этих методов состоит в определении величины диэлектрической проницаемости жидкости, путем измерения резонансной частоты колебательного контура, включающего в себя измерительный преобразователь (ИП) емкостного типа, заполненный исследуемой жидкостью. В них используется широкий спектр частот электромагнитных колебаний от звукового до ВЧ и СВЧ диапазонов [1].

С целью выяснения технического уровня современных резонансных ВЧ и СВЧ диелькометрических влагомеров для жидких неполярных диэлектриков был проведен анализ характеристик современных типовых влагомеров, представленных на рынке (табл. 1).

Рассмотренные влагомеры существенно отличаются по их техническому уровню, который можно характеризовать величиной абсолютной погрешности измерения влагосодержания на нижнем диапазоне.

© А.А. Коробко

Таблица 1  
Характеристики типовых современных ВЧ и СВЧ  
влагомеров

№	Тип влагомера (диапазон измерений $W$ , $\text{см}^3/\text{м}^3$ )	Абсолютная погрешность измерений, $\text{см}^3/\text{м}^3$
1	EASZ-1 (0 – $10^4$ )	$\pm 100$
2	УВДН -1ПМ1 (100 – $6 \cdot 10^4$ )	$\pm 100$
3	EASZ-1BS&W (0 – $10^4$ )	$\pm 100$
4	FIZEPR – SW 100.30 (1000 – 3000)	$\pm 200$
5	ЭУДВН-1л (200 – $2 \cdot 10^4$ )	$\pm 200$
6	УДВН-1эп (100 – $2 \cdot 10^4$ )	$\pm 250$
7	Universal IV CM (0 – $10^4$ )	$\pm 300$
8	OW-301 (0 – $10^4$ )	$\pm 500$
9	MBH – 1 (0 – $3 \cdot 10^4$ )	$\pm 500$
10	PHASE DYNAMICS – L (0 – $2 \cdot 10^4$ )	$\pm 500$

Как видно из табл. 1, диэлькометрические влагомеры, соответствующие лучшим образцам (№ 1 – 3 табл. 1) не позволяют корректно проводить измерение величины объемного влагосодержания меньше чем  $100 \text{ см}^3/\text{м}^3$ . Следует отметить, что во всех рассмотренных влагомерах проблема «сортовой неопределенности» не решена, так как необходима их предварительная калибровка.

Существующие алгоритмы решения проблемы «сортовой неопределенности» диэлькометрических влагомеров рассмотрены в работах [1-5]. К ним относятся следующие алгоритмы.

А. Алгоритм с введением в рабочее пространство ИП диэлектрических цилиндров.

В. Алгоритмы: с разделением потоков исследуемой эмульсии; с добавкой заданного расхода воды; с добавками воды и контролируемой среды.

С. Алгоритм с использованием методов наименьших квадратов.

Д. Алгоритм с использованием полиномов Лагранжа.

Е. Алгоритмы аддитивного и мультипликативного типов.

Ф. Аддитивный алгоритм с введением металлической пластины в межэлектродное пространство ИП емкостного типа.

Проведенный анализ показал, что данные алгоритмы не применимы для увеличения чувствительности диэлькометрических влагомеров до величин объемного влагосодержания порядка  $10 \text{ см}^3/\text{м}^3$  ( $10^{-5}$  в безразмерных величинах) по следующим причинам: не учитываются паразитные параметры ИП емкостного типа (и краевые эффекты для алгоритма *F*); обеспечение относительной погрешности измерений диэлектрической проницаемости (алгоритм *A*), расходов и объемов жидкостей (алгоритмы *B-E*) и геометрических размеров (алгоритм *F*) не более  $10^{-6}$  в лаборатор-

ных условиях является крайне сложной практической задачей.

На основании вышеизложенного определен путь реализации диэлькометрического резонансного метода с увеличенной чувствительностью и одновременным решением проблемы «сортовой неопределенности». Это использование алгоритмов с контролируемым изменением состояния эмульсии для резонансного диэлькометрического метода с учетом влияния на метрологические характеристики паразитных параметров и краевых эффектов ИП емкостного типа.

**Целью работы** является разработка, исследование и обоснование многочастотных алгоритмов определения влагосодержания эмульсий типа «неполярный диэлектрик – вода» методом резонансной диэлькометрии с улучшенными метрологическими характеристиками и решением проблемы «сортовой неопределенности».

Исходя из данной цели, задачами работы являются: определение областей применимости физической модели эмульсии в частотной области; разработка многочастотных алгоритмов решения проблемы «сортовой неопределенности»; определение основных метрологических характеристик предлагаемых алгоритмов с учетом влияния паразитных параметров ИП и измерительного генератора (ИГ); экспериментальная проверка корректности предлагаемых тестовых алгоритмов.

**Выбор модели эмульсии и определение её областей применимости.** В качестве математической модели эмульсии была выбрана модель [7], в которой отдельные капли воды заменены идеально проводящими сферами малого диаметра, находящимися на расстоянии друг от друга значительно превышающем их диаметр и равномерно распределенными по объему. По определению, величина объемного влагосодержания – это отношение объема воды в эмульсии  $V_{wat}$  к величине общего объема эмульсии  $V_{emi}$ :

$$W = V_{wat} / V_{emi} \quad (1)$$

Математическая модель эмульсии определяет функциональную связь величин объемного влагосодержания  $W$  и диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_{emi}$  и  $\epsilon_{nld}$  [7]:

$$\epsilon_{emi} = \epsilon_{nld} (1 + 3W) \quad (2)$$

В работе [7] была определена частотная область корректности данной модели для ВЧ диапазона частот, которая простирается до 2 МГц. В данном диапазоне частот вода ведет себя как идеальный проводник с диэлектрической проницаемостью, равной бесконечности.

С другой стороны, электрофизические свойства воды таковы, что в диапазоне частот приблизительно от 100 МГц до 1 ГГц величина  $\epsilon_{wat}$  изменяется незначительно (от 78,2 до 78,0). При этом в указанном диапазоне вода ведет себя как совершенный диэлектрик (величина тангенса угла диэлектрических потерь не более 0,005) [8]. Учитывая, что  $\epsilon_{wat} \gg \epsilon_{emi}$ , можно распространить данную математическую модель эмульсии и на диапазон частот 100 МГц – 1 ГГц. В результате этого возникает систематическая погрешность, обусловленная свойствами самой упрощенной математической модели на этих частотах. Идеально

проводящие сферы, моделирующие реальные капли воды в эмульсии ( $\epsilon_{wat} = 81$ ), заменяются в математической модели эмульсии на сферы аналогичных размеров из идеального диэлектрика ( $\epsilon_{wat} = \infty$ ).

Идеализированная расчетная схема для определения систематической погрешности математической модели, обусловленной влиянием изменения величины  $\epsilon_{wat}$ , для обобщенной схемы емкостного (ИП) приведена на рис. 1.

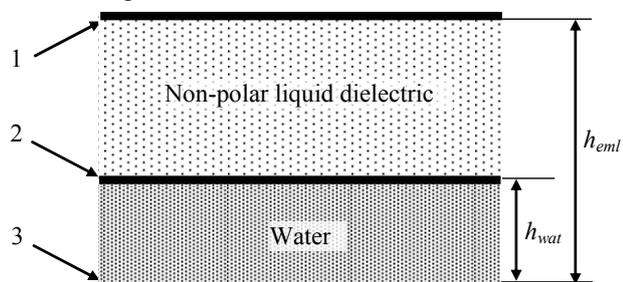


Рис. 1. Идеализированная расчетная схема ИП для определения систематической погрешности модели эмульсии: 1, 3 – электроды ИП; 2 – плоская граница раздела;  $h_{eml}$  и  $h_{wat}$  – толщины слоев эмульсии и воды ( $W = h_{wat} / h_{eml}$ )

Капли воды с суммарным объемом  $V_{wat}$  заменяются линейным слоем постоянной толщины  $h_{wat}$  на поверхности нижнего электрода ИП.

Определение величины систематической погрешности для диапазона 100 МГц – 1 ГГц сводится к сопоставлению величин емкостей плоского конденсатора, образованного обкладками 1,3 ИП для значений  $\epsilon_{wat} = \infty$  и  $\epsilon_{wat} = 81$  среды между границей раздела 2 и нижней обкладкой. Учитывая выражение (1) и тот факт, что емкость ИП между обкладками 1 – 2 и обкладками 2 – 3) величина эффективной диэлектрической проницаемости слоистой среды  $\epsilon'$  в общем случае равна:

$$\epsilon' = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{wat}} + \frac{1-W}{\epsilon_{nld}}} \quad (3)$$

В табл. 2 приведены расчетные значения  $\epsilon'$  для  $\epsilon_{wat} = \infty$  и  $\epsilon_{wat} = 81$  при различных величинах объемного влагосодержания, а также величины систематических погрешностей математической модели в диапазоне частот 100 МГц – 1 ГГц, которые определяются как  $(\epsilon'_{\infty} - \epsilon'_{81}) / \epsilon'_{\infty}$  ( $\epsilon'_{\infty}$  и  $\epsilon'_{81}$  – эквивалентные диэлектрические проницаемости слоистой среды для  $\epsilon_{wat} = \infty$ ,  $\epsilon_{wat} = 81$  и  $\epsilon_{nld} = 2$ ).

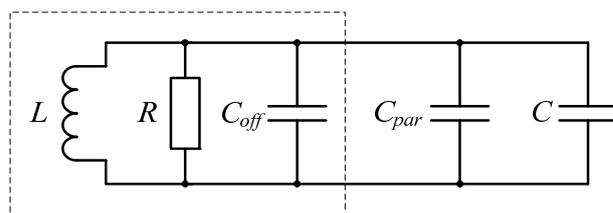
Таблица 2

Систематические погрешности математической модели эмульсии для диапазона частот 100 МГц – 1 ГГц

$W, \%$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
$\epsilon'_{\infty}$	2,22	2,02	2,002	2,0002	2,00002
$\epsilon'_{81}$	2,162	1,97	1,953	1,9519	1,9518
$\frac{\epsilon'_{\infty} - \epsilon'_{81}}{\epsilon'_{\infty}}$	0,0261	0,0248	0,0245	0,0241	0,0241

С учетом линейности соотношения (2), замена  $\epsilon_{wat} = 81$  на  $\epsilon_{wat} = \infty$  для влагосодержания  $10^{-5} \leq W \leq 0,1$  приводит к появлению систематической относительной погрешности определения  $\epsilon_{eml}$  данной математической модели эмульсии не более 2,61 % для диапазона частот от 100 МГц до 1 ГГц, что удовлетворяет требованиям практического применения.

**Общий алгоритм решения задачи «сортовой неопределенности».** Для решения проблемы «сортовой неопределенности» и учета влияния паразитных емкостей ИП и ИГ предлагается ряд многочастотных алгоритмов, обобщенным видом которых является четырехчастотный алгоритм. На рис. 2 приведена обобщенная эквивалентная схема замещения резонансного влагомера, которая характеризует емкостные ИП как сосредоточенного, так и распределенного типа.



Measuring generator

Рис. 2. Обобщенная эквивалентная схема замещения резонансного влагомера с ИП емкостного типа:  $L$  – индуктивный элемент ИГ;  $C_{off}$  – паразитная емкость генератора;  $C_{par}$  – «слепая» (конструктивная) емкость ИП;  $C$  – рабочая емкость измерительного преобразователя;  $R$  – сопротивление потерь

Четырехчастотный алгоритм требует проведения следующих четырех стадий.

1. Определение частоты резонанса  $F_{off}$  колебательного контура при отключенном ИП.
2. Определение частоты резонанса  $F_{air}$  колебательного контура при подключенном ИП, заполненном воздухом.
3. Определение частоты резонанса  $F_{nld}$  колебательного контура при подключенном ИП, заполненном обезвоженным жидким неполярным диэлектриком.
4. Определения частоты резонанса  $F_{eml}$  колебательного контура при подключенном ИП, заполненном исследуемой эмульсией.

Четыре значения резонансных частот колебательного контура позволяют определить четыре неизвестные величины. В зависимости от того, чем заполнен измерительный преобразователь, величина  $C$  принимает следующие различные значения. Для случая заполнения ИП воздухом эта величина равна рабочей емкости ИП на воздухе  $C = C_{air}$ ; для случая заполнения ИП обезвоженным жидким неполярным диэлектриком  $C = \epsilon_{nld} \cdot C_{air}$ ; для случая заполнения ИП исследуемой эмульсией  $C = \epsilon_{eml} \cdot C_{air}$ .

Величина «слепой» емкости  $C_{par}$  постоянна и определяется конструктивным способом крепления потенциального электрода ИП. В общем случае величина  $C_{par}$  составляет долю  $m$  от рабочей емкости измерительного преобразователя  $C_{air}$ :

$$C_{par} = m \cdot C_{air}; \quad (m \geq 0). \quad (4)$$

Для упрощения будем считать величину  $m$  заданной, а приведенный  $RLC$  колебательный контур, контуром без потерь ( $R = \infty$ ).

Практическая реализация данного многочастотного алгоритма по определению величин  $\varepsilon_{nld}$  и  $\varepsilon_{eml}$  заключается в последовательном определении резонансных частот контуров  $F_{off}$ ,  $F_{air}$ ,  $F_{nld}$ ,  $F_{eml}$ . При этом частота  $F_{off}$  – это частота резонанса контура  $L$ ,  $C_{off}$  при отключенном ИП:

$$F_{off} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{off}}} \quad (5)$$

Следующим этапом является определение резонансной частоты  $F_{air}$  контура при ИП, заполненным воздухом:

$$F_{air} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{off} + LC_{air}(1+m)}} \quad (6)$$

При заполнении ИП обезвоженным жидким неполярным диэлектриком частота резонанса  $F_{nld}$  равна:

$$F_{nld} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{off} + LC_{air}m + LC_{air}\varepsilon_{nld}}} \quad (7)$$

И, наконец, при заполнении ИП исследуемой эмульсией частота резонанса  $F_{eml}$  равна:

$$F_{eml} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{off} + LC_{air}m + LC_{air}\varepsilon_{eml}}} \quad (8)$$

Решение системы уравнений, определяемой выражениями (5) – (8) относительно неизвестных величин  $\varepsilon_{nld}$  и  $\varepsilon_{eml}$  позволяет определить неизвестное влагосодержание  $W$  через величины резонансных частот  $F_{off}$ ,  $F_{air}$ ,  $F_{nld}$ ,  $F_{eml}$  и конструктивный коэффициент измерительного преобразователя  $m$ :

$$W = \frac{A}{3B}, \quad (9)$$

где  $A = F_{air}^2 \cdot F_{nld}^2 \cdot (F_{off}^2 - F_{eml}^2) - F_{air}^2 \cdot F_{eml}^2 \cdot (F_{off}^2 - F_{nld}^2)$ ;  
 $B = F_{air}^2 \cdot F_{eml}^2 \cdot (F_{off}^2 - F_{nld}^2) - F_{nld}^2 \cdot F_{eml}^2 \cdot (F_{off}^2 - F_{air}^2) \cdot m / (m+1)$ .

Выражение (9) является основной обобщенной метрологической характеристикой четырехчастотного алгоритма определения влагосодержания методом резонансной диэлькометрии для определения влагосодержания эмульсии в зависимости от величин  $F_{off}$ ,  $F_{air}$ ,  $F_{nld}$ ,  $F_{eml}$  и  $m$ .

В общем случае погрешности определения влагосодержания включают в себя как систематические, так и случайные погрешности. Систематические погрешности, обусловленные неточностью математической модели эмульсии, были определены ранее.

Исходя из анализа выражения (9), величина случайной погрешности определения влагосодержания  $\Delta W/W$  в зависимости от величин абсолютных погрешностей ( $\Delta F_{off}$ ,  $\Delta F_{air}$ ,  $\Delta F_{nld}$ ,  $\Delta F_{eml}$ ,  $\Delta m$ ) определения самих величин  $F_{off}$ ,  $F_{air}$ ,  $F_{nld}$ ,  $F_{eml}$  и  $m$  имеет следующий вид (при этом процессы определения  $F_{off}$ ,  $F_{air}$ ,  $F_{nld}$ ,  $F_{eml}$  и  $m$  независимы):

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^5 Y_n^2}}{W(F_{off}, F_{air}, F_{nld}, F_{eml}, m)}, \quad (10)$$

где

$$Y_1^2 = \left( \frac{\partial W}{\partial F_{off}} \right)^2 \Delta F_{off}^2 ; Y_2^2 = \left( \frac{\partial W}{\partial F_{air}} \right)^2 \Delta F_{air}^2 ;$$

$$Y_3^2 = \left( \frac{\partial W}{\partial F_{nld}} \right)^2 \Delta F_{nld}^2 ; Y_4^2 = \left( \frac{\partial W}{\partial F_{eml}} \right)^2 \Delta F_{eml}^2 ;$$

$$Y_5^2 = \left( \frac{\partial W}{\partial m} \right)^2 \Delta m^2 .$$

В величины абсолютных погрешностей  $\Delta F_{off}$ ,  $\Delta F_{air}$ ,  $\Delta F_{nld}$ ,  $\Delta F_{eml}$  и  $\Delta m$  входят как систематические, так и случайные погрешности их определения.

**Трехчастотный алгоритм.** При  $m = 0$  в выражении (9) «слепая» емкость ИП не учитывается. Тогда выражение (9) существенно упрощается и переходит к виду, аналогичному полученному ранее выражению для  $W$  в работе [8]:

$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{1}{F_{eml}^2} - \frac{1}{F_{nld}^2}}{\frac{1}{F_{nld}^2} - \frac{1}{F_{off}^2}} \quad (11)$$

Выражение (11) является метрологической характеристикой трехчастотного алгоритма определения влагосодержания методом резонансной диэлькометрии.

Для конкретной конструкции емкостного ИП [9] были определены величины объемного влагосодержания  $W$  по точной формуле (9) ( $W_{(9)}$ ) и по приближенной формуле (11) ( $W_{(11)}$ ) и составили:  $W_{(9)} = 0,0215$  и  $W_{(11)} = 0,0209$ , соответственно.

Разность величин  $W_{(9)}$  и  $W_{(11)}$  определяет величину абсолютной систематической погрешности определения влагосодержания без учета «слепой» емкости, а величина  $(W_{(9)} - W_{(11)}) / W_{(9)}$  характеризует систематическую относительную погрешность. Эта относительная систематическая погрешность для  $m = 0,0664$  и для диапазона частот ИГ до 2 МГц равна:  $(W_{(9)} - W_{(10)}) / W_{(9)} = 0,027$  [9].

**Анализ предельных характеристик четырех- и трехчастотного алгоритмов.** Для конкретного влагомера с ИП сосредоточенного типа [9], в котором реализованы четырех- и трехчастотные алгоритмы, был проведен анализ величины точности определения влагосодержания в эмульсии типа «трансформаторное масло – вода» при  $F_{off} = 1145290,4$  Гц;  $\Delta F_{off} = 2$  Гц;  $F_{air} = 946516,0$  Гц;  $\Delta F_{air} = 1,5$  Гц;  $F_{nld} = 827303,9$  Гц;  $\Delta F_{nld} = 0,9$  Гц;  $F_{eml} = 821291,0$  Гц;  $\Delta F_{eml} = 3,4$  Гц;  $m = 0,0664$ ;  $\Delta m = 0,0038$ . Анализ производился для четырехчастотного алгоритма, как наиболее точного.

Величины  $m$  и  $\Delta m$  определялись расчетным путем, исходя из геометрических размеров ИП и диэлектрических характеристик фторопласта-4: конструктивного изоляционного элемента, фиксирующего потенциальный электрод ИП и определяющего величину «слепой» емкости ИП [9].

Полученное при этом из выражений (5) – (10) расчетное значение величины относительной погрешности определения влагосодержания составило:  $\Delta W/W = 0,011$ . Данная величина определяет ограничение по нижнему пределу измеряемого влагосодержания

ния влагомерами с ИП сосредоточенного типа для четырех- и трехчастотных алгоритмов (в ВЧ диапазоне до 2 МГц) величиной порядка  $600 \text{ см}^3/\text{м}^3$  [9].

**Двухчастотный алгоритм.** Анализ выражений (9, 10) и схемы на рис. 2 показал, что увеличению чувствительности способствует уменьшение влияния емкости  $C_{off}$  на частоту резонанса ИП. Минимальное влияние паразитной емкости генератора будет при  $C_{off} = 0$ . При этом  $m = 0$ ,  $\Delta m = 0$ ,  $F_{off} = \infty$  и выражение (11) преобразуется к виду:

$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{1}{F_{eml}^2} - \frac{1}{F_{nld}^2}}{\frac{1}{F_{nld}^2}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_{nld}^2 - F_{eml}^2}{F_{eml}^2}. \quad (12)$$

Для малых величин отношения  $(F_{nld}^2 - F_{eml}^2) / F_{eml}^2 < 0,1$

выражение (12) упрощается и с точностью до членов второго порядка имеет следующий вид:

$$W \approx \frac{2}{3} \cdot \frac{F_{nld} - F_{eml}}{F_{eml}}. \quad (13)$$

Выражения (12) и (13) являются метрологической характеристикой двухчастотного алгоритма определения влагосодержания методом резонансной диэлькометрии.

**Технические аспекты практической реализуемости двухчастотного алгоритма.** Проанализируем технические возможности создания ИП с величинами  $m = 0$  и  $C_{off} = 0$ . Самым радикальным способом обеспечения  $m = 0$  является замена конструкционного диэлектрического материала, поддерживающего потенциальный электрод емкостного ИП «металлическим» изолятором. Например, выполнение ИП в виде короткозамкнутой четвертьволновой линии. При этом центральный (потенциальный) электрод этой линии наглухо соединен с наружным электродом, а исследуемая жидкость находится в пространстве между этими электродами [10]. ИП такого типа является системой с распределенными параметрами и позволяет реализовать режим  $m = 0$ . Как показано в [6, 10], переход в СВЧ диапазон частот позволяет существенно увеличить чувствительность метода резонансной диэлькометрии. Главной проблемой при этом является большая геометрическая длина ИП при работе в диапазоне частот 100 МГц – 1 ГГц, а также малое отличие первой и последующих резонансных частот ИП распределенного типа.

Предложенный и исследованный в работе [10] ИП распределенного типа с измерительным элементом в виде ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора (СНКР) свободен от указанных недостатков и позволил при минимальных его размерах реализовать работу в СВЧ диапазоне частот (100 – 200) МГц.

Для реализации случая  $C_{off} = 0$  была использована особенность ИП на основе СНКР, состоящая в существенно большей величине его добротности по отношению к емкостным ИП сосредоточенного типа. Это позволяет реализовать режим  $C_{off} = 0$  за счет очень малого коэффициента связи измерительного генератора с ИП посредством индуктивной петли

связи, которая геометрически расположена вблизи заземленного конца внутреннего (потенциального) электрода СНКР. При этом обеспечивается минимальное влияние петли связи на электрическое поле в СНКР, так как электрическое поле в этом месте СНКР крайне мало, а привнесенная емкость ИГ в рабочую емкость СНКР существенно уменьшается и ее влиянием можно пренебречь. Таким образом, в измерителях влагосодержания типа СНКР реализуется двухчастотный алгоритм резонансной диэлькометрии ( $m = 0$ ,  $C_{off} = 0$ ). Этот алгоритм является теоретическим пределом резонансной диэлькометрии, когда две неизвестные величины ( $\varepsilon_{eml}$  и  $\varepsilon_{nld}$ ) и влагосодержание, как функция этих величин, определяются двумя значениями измеренных частот.

**Результаты экспериментальных исследований.** Для экспериментальной проверки результатов теоретических исследований было проведено определение влагосодержания приготовленных тестовых эмульсий типа «трансформаторное масло – вода» двумя конкретными влагомерами: с ИП сосредоточенного типа [9] и ИП распределенного типа в виде СНКР [10]. Экспериментальные исследования первого влагомера проводились для проверки обобщенного четырехчастотного алгоритма, а целью исследований второго влагомера была проверка двухчастотного алгоритма. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты экспериментального определения объемного влагосодержания тестовых эмульсий

Тип ИП	Влагосодержание, $\text{см}^3/\text{м}^3$		Абсолютное расхождение, $\text{см}^3/\text{м}^3$	Относительное расхождение, %
	Приготовленная тестовая эмульсия	Измеренное значение		
Сосредоточенный ИП, ВЧ диапазон (1 МГц)	5000 ± 20	4800 ± 54	± 200	± 4,0
Распределенный ИП СНКР, СВЧ диапазон (0,1 ГГц)	100 ± 5,1	98,3 ± 0,6	± 1,7	± 1,8
	10 ± 1	9,51 ± 0,5	± 0,49	± 5,2

Для влагомера с ИП сосредоточенного типа величины объемного влагосодержания определялись в соответствии с выражением (9), а для влагомера с ИП распределенного типа – в соответствии с выражением (12), абсолютные погрешности определялись с использованием выражения (10) для обоих влагомеров.

Корректность результатов теоретических исследований характеризуют величины абсолютного и относительного расхождений измеренных величин объемного влагосодержания и величин влагосодержания приготовленных тестовых эмульсии. При этом величина абсолютного расхождения определялась как разность между влагосодержанием приготовленной тестовой эмульсии и его расчетным значением, а величина относительного расхождения, как отношение абсолютной погрешности к величине влагосодержания приготовленной тестовой эмульсии.

Анализ данных приведенных в табл. 3, показывает следующее.

1. Величины относительных расхождений не превышают 4 % и 5,2 % (для ИП сосредоточенного и распределенного типов соответственно), что свидетельствует о хорошем совпадении расчетных результатов со значениями влагосодержаний тестовых эмульсий и корректности результатов теоретических исследований.

2. Величина абсолютного расхождения для влагомера с ИП сосредоточенного типа ( $200 \text{ см}^3/\text{м}^3$ ) практически подтверждает результаты по оценке нижнего предела измеряемого объемного влагосодержания ( $600 \text{ см}^3/\text{м}^3$ ).

3. Влагомер с ИП распределенного типа в виде СНКР позволяет производить измерение влагосодержания эмульсий на основе неполярных жидких диэлектриков с нижним пределом  $10 \text{ см}^3/\text{м}^3$  без операций предварительной калибровки.

4. Метрологические характеристики влагомера с ИП распределенного типа в виде СНКР превышают аналогичные характеристики известных диэлектрических влагомеров, представленных в табл. 1.

#### Выводы.

Предложенные и практически реализованные многочастотные алгоритмы определения объемного влагосодержания жидких эмульсий методом резонансной диэлектрической с учетом паразитных параметров ИП и ИГ позволили решить проблему «сортовой неопределенности» исследуемых жидкостей, существенно улучшив при этом метрологические характеристики диэлектрического метода, и измерить объемное влагосодержание жидких неполярных диэлектриков до  $10^{-5}$ .

Корректность и правильность результатов теоретических исследований подтверждена экспериментальным путем с максимальной величиной относительного расхождения не более 5,2 %.

Перспективным направлением дальнейшего развития предложенных многочастотных алгоритмов с целью улучшения метрологических характеристик, может быть учет их систематических погрешностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голуб Е.Ю. Методы и средства повышения точности диэлектрических влагомеров: дис. канд. техн. наук: спец. 05.11.13. «Приборы и методы контроля и определения состава веществ». Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». – Харьков, 2016. – 199 с.

2. Заболотный А.В. Техническая реализация аддитивных тестов в емкостном первичном преобразователе диэлектрического влагомера нефтепродуктов // Вимірювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №3. – С. 49-53.

3. Pat. 4916940 USA, 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; Decl. 05.07.1988; Publ. 17.04.1990. – p. 9.

4. Пат. 104201 C2 Україна, МПК G01N 27/22. Спосіб вимірювання вологості матеріалів / Заболотний О.В.; Нац. аерокосміч. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т». – №

201201992; Заявл. 21.02.2012; Опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – с. 9.

5. Pat. 7129713 B2 USA: IPC G01N 27/22, G01R 27/26. Capacitive moisture sensor / Platon G., Ramm C., Lohr K.; (USA) – № 10/761,841; Decl. 21.01.2004; Publ. 31.10.2006. – 11 p.

6. Суслин М.А. Микроволновый контроль авиационных ГСМ с использованием радиотехнических методов расчета цепей с распределенными параметрами. – М.: Машиностроение, 2006. – 120 с.

7. Рудаков В.В., Коробко А.И., Коробко А.А. Электрофизическая модель поведения эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа // Вісник НТУ «ХПІ». – 2009. – №39. – С. 158-161.

8. Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – 336 с.

9. Рудаков В. В., Коробко А.А. Повышение чувствительности измерений содержания влаги в трансформаторном масле диэлектрическим методом в резонансном режиме // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №50(1092). – С. 143-149.

10. Рудаков В. В., Коробко А.А. Высокочувствительный СВЧ измеритель влагосодержания в неполярных диэлектрических жидкостях на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №5. – С. 51-56. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.08.

#### REFERENCES

1. Golub E.Yu. *Metody i sredstva povysheniya tochnosti dielektricheskikh vlagomerov*. Diss. cand. techn. nauk [Methods and means of increasing the accuracy of dielectric metric moisture meters. Cand. tech. sci. diss.]. Kharkov, 2016. 199 p. (Rus).

2. Zabolotnyy A.V. Technical realization of additive tests in a capacitive primary converter of the diesel-electric moisture meter of petroleum products. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, 2013, no.3, pp. 49-53. (Rus).

3. Marcel L. Mounge. *Method and apparatus for measuring and calculating bulk water in crude oil*. Patent USA, no.4916940, 1990.

4. Zabolotnyy O.V. *Sposib vymiryuvannya volohosti materialiv* [The method of measuring moisture content]. Patent UA, no.201201992, 2014. (Ukr).

5. Platon G., Ramm C., Lohr K. *Capacitive moisture sensor*. Patent USA, no.7129713, 2006.

6. Suslin M. A. *Mikrovolnovyy kontrol' aviatsionnykh GSM s ispol'zovaniyem radiotekhnicheskikh metodov rascheta tsepey s raspredeleennyimi parametrami* [Microwave monitoring of aviation fuel and lubricants using radio engineering methods for computing circuits with distributed parameters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 120 p. (Rus).

7. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A. Electrophysical model of behavior emulsion mineral oil – water engineering type. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2009, no.39, pp. 158-161. (Rus).

8. Hippel A.R. *Dielektriki i ikh primeneniye* [Dielectrics and their application]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1953. 336 p. (Rus).

9. Rudakov V.V., Korobko A.A. Increasing the sensitivity of the moisture content measurements in transformer oil dielectric method in resonant mode. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50(1092), pp. 143-149. (Rus).

10. Rudakov V.V., Korobko A.A. A high sensitive microwave measuring device of the moisture content in the non-polar dielectric liquids based on an inhomogeneous step coaxial resonator. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.5, pp. 51-56. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.08.

Поступила (received) 13.04.2017

Коробко Александр Анатольевич, аспирант,  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +38 093 65 080 88, e-mail: andarleks@gmail.com

A.A. Korobko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Multifrequency algorithms for determining the moisture content of liquid emulsions by the method of resonance dielcometry.**

**Purpose.** The main attention is paid to the development and investigation of multifrequency algorithms for the realization of the method of resonance dielcometric measurement of the humidity of emulsions of the type «nonpolar liquid dielectric-water». Multifrequency algorithms take into account the problem of «uncertainty of varieties» and increase the sensitivity of the dielcometric method. **Methodology.** Multifrequency algorithms are proposed to solve the problem of «uncertainty of varieties» and improve the metrological characteristics of the resonance dielcometric method. The essence of the algorithms is to use a mathematical model of the emulsion and to determine the permittivity of the dehydrated liquid and the emulsion. The task of developing algorithms is to determine and take into account the influence of the parasitic electrical capacitance of the measuring oscillator and the measuring transducer. The essence of the method consists in alternately determining the resonance frequency of the oscillatory circuit with various configurations, which allows to take into account errors from parasitic parameters. The problem of «uncertainty of varieties» is formulated and solved. The metrological characteristics of the resonance

dielcometric method are determined using algorithms. **Results.** Frequency domains of application of mathematical model of an emulsion are defined. An algorithm in a general form with four frequencies suitable for practical implementation in dielcometric resonance measurements is developed. Partial algorithms with three and two frequencies are developed. The systematic values of simulation errors in the emulsion in the microwave range are determined. Generalized metrological characteristics are obtained. The ways of increasing the sensitivity of the dielcometric method are determined. The problem of «uncertainty of varieties» was solved. Experimental data on determination of humidity for the developed algorithms are obtained. The value of the volumetric moisture in the transformer oil was measured. **Originality.** New multifrequency algorithms for determining the moisture content by the resonance dielcometric method have been proposed, investigated and practically realized. A generalized metrological characteristic for an algorithm with four frequencies is obtained. Metrological characteristics of algorithms for three and two frequencies are obtained. The problem of «uncertainty of varieties» was solved. Recommendations for increasing the sensitivity of dielcometric resonance moisture meters are developed and implemented. **Practical value.** The results of this work allow to solve the problem of «variability of varieties», increase sensitivity and accurately determine the moisture content in most nonpolar liquid dielectrics to a value of  $10^{-5}$ . This is applicable in a large field of electrical engineering, machine building, oil refining and the chemical industry. References 10, tables 3, figures 2.

**Key words:** moisture, method of resonance dielcometry, varietal uncertainty, mathematical model of emulsion, multifrequency algorithm, generalized metrological characteristics.