

В.В. Рудаков, А.А. Коробко

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СВЧ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В НЕПОЛЯРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ НА ОСНОВЕ СТУПЕНЧАТОГО НЕОДНОРОДНОГО КООКСИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

*Розглядається високочутливий вимірювач вмісту вологи в неполярних рідких діелектриках. Аргументовано шляхи підвищення чутливості класичного дієлькометричного методу. Приводиться опис розробленої конструкції вимірювача вологості на основі ступеневого неоднорідного коаксіального резонатора. Розглянуто результати аналізу резонансних характеристик вимірювального перетворювача, а також визначені величини об'ємного вмісту вологи сумішньої трансформаторне масло – вода в діапазоні вмісту вологи  $(10 - 10^4)$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Бібл. 6, табл. 1, рис. 8.*

*Ключові слова:* вимірювач вмісту вологи, рідкі неполярні діелектрики, вимірювальний перетворювач, ступінчастий коаксіальний неоднорідний резонатор, вимірювальний генератор, резонансні характеристики, об'ємний вологовміст, трансформаторна олія, вода.

*Рассматривается високочувствительный измеритель влагосодержания в неполярных жидких диэлектриках. Аргументированы пути повышения чувствительности классического диэлькометрического метода. Приводится описание разработанной конструкции измерителя влажности на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора. Рассмотрены результаты анализа резонансных характеристик измерительного преобразователя, а также определены величины объемного влагосодержания смесей трансформаторное масло – вода в диапазоне влагосодержания  $(10 - 10^4)$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Библ. 6, табл. 1, рис. 8.*

*Ключевые слова:* измеритель влагосодержания, жидкие неполярные диэлектрики, измерительный преобразователь ступенчатый коаксиальный неоднородный резонатор, измерительный генератор, резонансные характеристики, объемное влагосодержание, трансформаторное масло, вода.

**Введение.** Измерение влагосодержания в неполярных жидких диэлектриках актуально для многих практических применений, в частности: в электротехнике, химической, пищевой промышленности, в военной и авиационной технике. Так, для электротехники важным является определение влагосодержания трансформаторного масла, для химической и пищевой промышленности – определение влагосодержания в различных минеральных маслах, для военной и авиационной техники – определение влагосодержания в дизельном, авиационном топливе. В большинстве указанных областей исследуемые жидкости (трансформаторное и подсолнечное масла, дизельное и авиационное топлива и т.д.) являются неполярными жидкими диэлектриками.

Следует отметить, что нижний предел измерения влагосодержания во всех этих применениях является очень малым: минимальная измеряемая величина объемного влагосодержания составляет не более  $10^{-3}$  %, что создает определенные трудности для проведения этих измерений традиционными известными методами. Традиционные методы, например, метод Карла-Фишера и жидкостно-хроматографический метод требуют специального оборудования, достаточно дорогих расходных материалов и довольно длительного времени.

**Целью работы** является создание измерителя влагосодержания в неполярных жидких диэлектриках с нижним пределом объемного влагосодержания не более  $10^{-3}$  %, позволяющего оперативно проводить измерения с минимальными материальными и временными затратами.

**Обоснование путей решения поставленной задачи.** Для решения поставленной задачи был выбран диэлькометрический метод измерения влагосодержания, основанный на зависимости влагосодержания от диэлектрической проницаемости исследуемых обвод-

ненных неполярных жидких диэлектриков [1]. При этом измеряемая диэлектрическая проницаемость, которая пропорциональна влагосодержанию, характеризует саму величину влагосодержания.

В развитии этого метода в работе [2] была предложена упрощенная модель эмульсии типа «вода – неполярный диэлектрик», которая позволила достаточно просто определить величину объемного влагосодержания смеси  $W$  как функцию диэлектрических проницаемостей смеси  $\epsilon_2$  и обезвоженной неполярной жидкости  $\epsilon_1$  в следующем виде:

$$W = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{3 \cdot \epsilon_1} \quad (1)$$

В работе [3] было предложено использование резонансного способа определения диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , реализованного для измерительного преобразователя (ИП) емкостного типа, заполняемого поочередно обезвоженной жидкостью и исследуемой смесью (эмульсией). При этом ИП емкостного типа подключался к измерительному генератору (ИГ), содержащему усиленную схему с обратной связью и катушку индуктивности [3]. Известные значения  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  выражались через четыре значения частоты генерации ИГ (частота ИГ с отключенным ИП, частота ИГ с ИП, заполненным воздухом, частота ИГ с ИП, заполненным исследуемой обезвоженной жидкостью и частота ИГ с ИП, заполненным исследуемой смесью) и значения конструктивных параметров ИП. Данный подход позволил в диапазоне частот ИГ от 100 кГц до 2 МГц практически решить задачу определения влагосодержания неполярных диэлектриков в диапазоне  $0,1 \% \leq W \leq 10 \%$ . Однако использование при данном подходе систем ИГ и ИП в виде сосредоточенных элементов (катушки индуктивности для ИГ и измерительный конденсатор

для ИП), которые обладали паразитными параметрами, не позволили в полной мере реализовать возможности резонансной диэлькометрии для измерения предельно малых уровней влагосодержания [3].

Выполненный анализ показывает, что основными направлениями повышения чувствительности предложенного в [3] резонансного способа диэлькометрии являются: повышение рабочей частоты измерений, минимизация паразитных емкостей индуктивного элемента ИГ и ИП, повышение стабильности частоты генерирования ИГ во всех четырех режимах, максимальное сокращение числа измеряемых частот.

Для реализации указанных направлений авторами был предложен ИП с распределенными параметрами в виде ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора (СНКР) [4]. При этом были исследованы резонансные спектры СНКР в диапазоне частот до 1,8 ГГц. В результате проведенных в [4] исследований были выявлены существенные преимущества ИП, выполненного в виде СНКР как по сравнению с ИП с сосредоточенными параметрами, так и по сравнению с известными ИП СВЧ диапазона в виде однородных четвертьволновых резонаторов.

Дальнейшее развитие теории применения СНКР в резонансной диэлькометрии неполярных жидких сред получило развитие в работе [5], в которой был проведен как математический анализ электромагнитных процессов в СНКР, так и их имитационное моделирование в среде Micro Cap. Результатом этих исследований являлась оптимизация СНКР для целей диэлькометрии и определение его метрологических характеристик. Исходя из вышеизложенного, была принята следующая методология построения измерителя.

1. Влагосодержание смеси определяется по разнице диэлектрических проницаемостей обезвоженной жидкости и смеси.

2. Для определения диэлектрических проницаемостей ИП в виде СНКР подключается к ИГ и поочередно заполняется обезвоженной жидкостью и смесью.

3. Рабочая частота ИГ выбирается максимально возможной с учетом частотной дисперсии диэлектрической проницаемости воды.

4. СНКР и ИГ обладают минимальными значениями паразитных параметров, что позволяет сократить число измерений частоты с четырех до двух и сократить время эксперимента в 2 раза.

5. С целью повышения стабильности частоты, генерируемой ИГ, измерительный преобразователь выполняется в виде системы с распределенными параметрами: СНКР, который обладает существенно большей добротностью, чем система «ИП – ИГ» с сосредоточенными параметрами.

**Описание измерителя.** Блок-схема измерителя приведена на рис.1. Используемый преобразователь ИП, выполненный в виде СНКР, подключен к ИГ. Частота генерации ИГ измеряется частотомером F, а температура ИП – электронным термометром T.

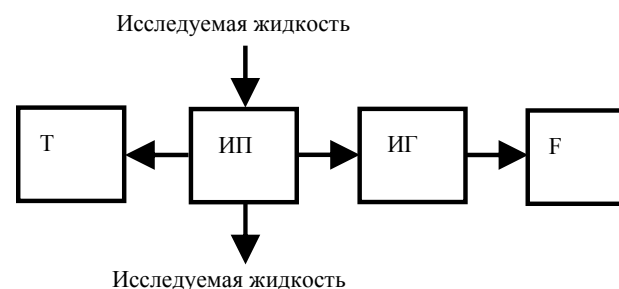


Рис. 1. Блок-схема измерителя

Принципиальная электрическая схема измерителя (ИП совместно с ИГ) приведена на рис. 2. На ней измерительный преобразователь ИП в виде СНКР образован двумя коаксиальными линиями Z1 и Z2 одинаковой длины с различными волновыми сопротивлениями  $Z_1 = 77,61 \text{ Ом}$ ,  $Z_2 = 4,09 \text{ Ом}$ . С помощью индуктивной петли связи A измерительный преобразователь подключен к ИГ на транзисторах Q1, Q2, которые собраны по схеме: «общая база» (по выходу ИГ) – «общий коллектор» (по входу ИГ).

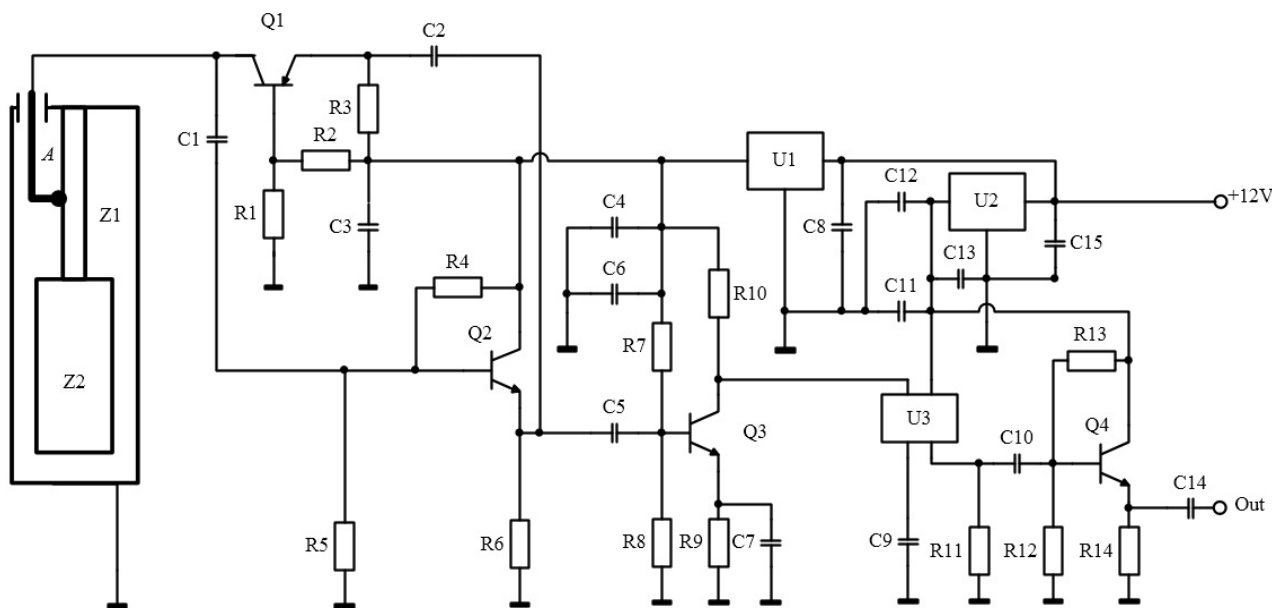


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема измерителя (ИП совместно с ИГ)

Данное схемотехническое решение ИГ выбрано для минимизации влияния паразитных параметров ИГ на параметры ИП (каскад с «общей базой» обладает максимальным выходным сопротивлением, а каскад с «общим коллектором» обладает максимальным входным сопротивлением). Сигнал с эмиттерного повторителя на транзисторе Q2 подается на вход (эмиттер) усилительного каскада на транзисторе Q1, выход которого подключен к ИП через индуктивную петлю связи A. Сигнал с выхода ИГ через «развязывающий» усилитель на транзисторе Q3 подается на вход цифрового делителя частоты U3, который включен по схеме делителя на 80. С выхода делителя частоты через «развязывающий» эмиттерный повторитель на транзисторе Q4 сигнал подается на частотомер. Для максимального обеспечения стабильности частоты ИГ его генерирующие каскады (Q1 – Q3) и цифровые каскады (U3, Q4) питаются от различных линейных стабилизаторов напряжения U1 (9 В) и U2 (5 В) соответственно.

Конструктивно ИП совместно с ИГ представляет собой разборную систему, в нижней части которой расположен ИП, а в верхней части – ИГ. В нижнюю часть ИП подводится исследуемая жидкость, которая после заполнения всего его объема попадает на слив. Общий вид и вид со снятой крышкой измерителя влагосодержания приведен на рис. 3. Таким конструктивным выполнением ИП и ИГ обеспечивается возможность работы ИП как в стационарном режиме, так и в режиме потока исследуемой жидкости. Кроме того, данное конструктивное исполнение обеспечивает минимизацию влияния паразитных параметров ИГ на частоту резонанса ИП (которая определяется геометрическими размерами линий Z1 и Z2 и величиной диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости) за счет следующих факторов:

1. Величины коэффициента связи эквивалентного колебательного контура, образованного линиями Z1 (индуктивный элемент) и Z2 (емкостной элемент) с ИГ, не превышающей значения 0,08. Поэтому, паразитные параметры ИГ, которые «привносятся» ИГ в этот контур, по величине не превосходят  $(0,08)^2 = 0,0064$ . В сочетании с высокими величинами импедансов входной (на Q2) и выходной (на Q1) части ИГ это обеспечивает высокую добротность колебательной системы и малое влияние ИГ на частоту генерации измерителя.

2. Место подключения индуктивной петли связи A, максимально приближено к точке колебательной системы, которая имеет нулевой потенциал. Данный факт обеспечивает минимальные искажения продольного электрического поля в СНКР.

3. Механическая фиксация центрального электрода линии Z1, обеспечивающей величину паразитной емкости ИП практически равную нулю, что также способствует повышению точности предложенного измерителя влагосодержания.

Описанный измеритель имеет следующие основные технические характеристики:

1. Частота генерации ИГ с ИП, заполненным воздухом, около 158 МГц.
2. Частота генерации ИГ с ИП, заполненным трансформаторным маслом, около 104 МГц.
3. Чувствительность измерителя – не хуже  $1 \text{ см}^3/\text{м}^3$ .



Рис. 3. Общий вид собранного измерителя влагосодержания (а) и вид со снятым наружным коаксиальным электродом (б)

**Результаты экспериментальных исследований.** Для подтверждения правильности выбранных конструктивных и технических решений ИГ и ИП были проведены экспериментальные исследования в два этапа.

На первом этапе с помощью измерителя амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) типа Х1 – 42 исследовались резонансные характеристики ИП, заполненного воздухом, и ИП заполненного обезвоженным трансформаторным маслом.

Блок-схема, по которой данный измеритель влажности исследовался для определения АЧХ, приведена на рис. 4.

На рис. 4. изображено: 1 – измеритель АЧХ Х1 – 42 (вверху – измерительная часть; внизу – генераторная часть); 2 – ИП; 3 – индуктивная петля связи; 4 – исследуемая среда; 5 – высокоомный (выносной) вход Х1 – 42; 6 – выход Х1 – 42 (50 Ом).

При этом для устранения реакции измерителя Х1 – 42 на АЧХ ИП выход Х1 – 42 был согласован резистором 50 Ом, а для повышения входного

импеданса последовательно со входом была включена цепочка  $100 \text{ кОм} - 0,5 \text{ пФ}$ .

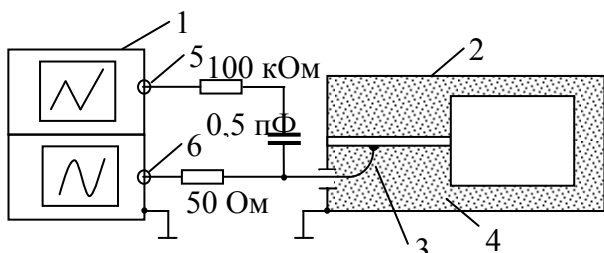


Рис. 4. Блок – схема измерений АЧХ ИП

Результаты исследований ИП в виде АЧХ ИП приведены на рис. 5-8. Полученные АЧХ были расшифрованы с целью определения величины нагруженной добротности  $Q$  измерительного преобразова-

теля. Нагруженная добротность (ИП нагружен на  $50 \text{ Ом}$ )  $Q$  определялась с помощью величины  $2\Delta F$  (ширина АЧХ на уровне  $-3 \text{ дБ}$ ) и  $F$  (центральная частота резонанса).

Как показывают результаты обработки с точностью до  $5\%$  нагруженные величины добротности ИП с воздухом ( $Q_1, F_1$ ) и с трансформаторным маслом ( $Q_2, F_2$ ) практически совпадают, что свидетельствует о слабом влиянии масла на добротность ИП:

$$Q_1 = \frac{F_1}{2\Delta F_1} = \frac{160 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} = 80;$$

$$Q_2 = \frac{F_2}{2\Delta F_2} = \frac{108 \cdot 10^6}{1,3 \cdot 10^6} = 83;$$

$$Q_1 \cong Q_2.$$

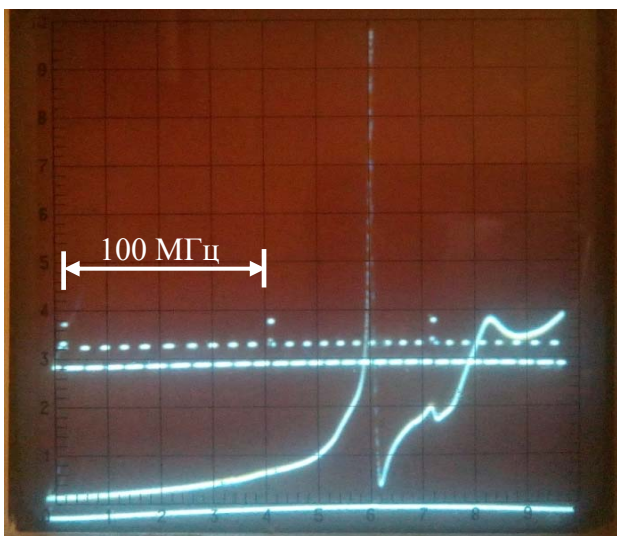


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики ИП, заполненного воздухом

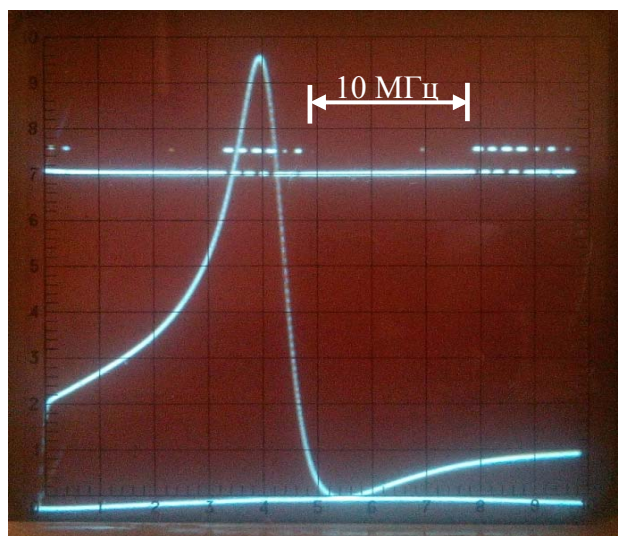


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики ИП, заполненного воздухом

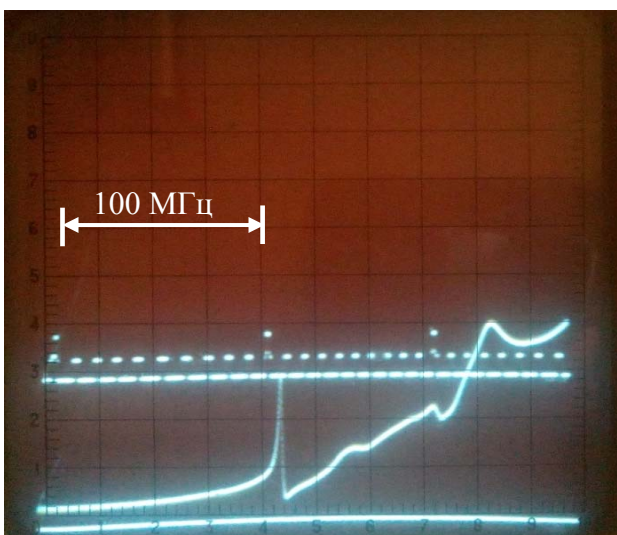


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики ИП, заполненного маслом

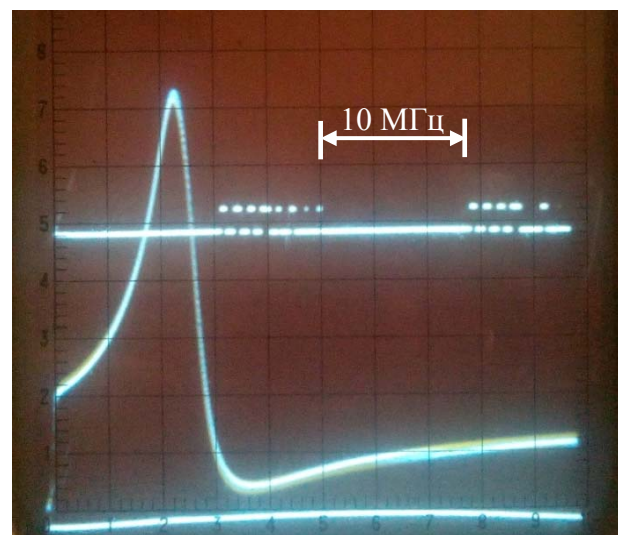


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики ИП, заполненного маслом

На втором этапе экспериментальных исследований были определены величины объемного влагосодержания приготовленных смесей «трансформаторное масло – вода» в диапазоне влагосодержания ( $10 -$

$10^4$ )  $\text{см}^3/\text{м}^3$ . В процессе проведения экспериментов с помощью микрошприцов марки «Hamilton» в предварительно обезвоженное масло объемом ( $500 \pm 0,6$ )  $\text{см}^3$  вводилось требуемое количество воды. После этого



приготавливалась однородная эмульсия с требуемым влагосодержанием. Затем для удаления газа из неводненного трансформаторного масла и приготовленной эмульсии сосуда с ними помещались в вакуумную камеру. После этого через измерительный преобразователь проливалась исследуемая жидкость с одновременным контролем температуры ИП и частоты генерации ИГ. В процессе проведения исследований температура ИП и ИГ поддерживалась постоянной с точностью  $\pm 0,03$  °С. При этом проводилось по 12 измерений частоты генерации ИГ, деленной на 80 для обезвоженного масла ( $F_3$ ) и исследуемой смеси ( $F_4$ ), и обрабатывались по стандартной методике для прямых измерений [6].

Для определения функциональной зависимости влагосодержания  $W$  от частоты воспользуемся формулой определения влагосодержания для измерителя влажности, описанного в [3]:

$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{1}{F_4^2} - \frac{1}{F_3^2}}{\frac{1}{F_3^2} - \frac{1}{F_1^2}}, \quad (2)$$

где  $F_1$  – частота резонанса при отключенном измерительном преобразователе;  $F_3$  – частота резонанса для измерительного преобразователя, заполненного обезвоженным маслом;  $F_4$  – частота резонанса при заполненном измерительном преобразователе исследуемой смесью.

Конструкция предложенного измерителя влажности на основе СНКР такова, что она не содержит конструкционного диэлектрического материала, поддерживающего внутренний потенциальный электрод. Конструктивно внутренний потенциальный электрод наглухо соединен с наружным электродом, а исследуемая жидкость находится в пространстве между этими электродами. В этом случае конструкция измерительного преобразователя может быть представлена в виде короткозамкнутой четвертьволновой линии. Тогда измеритель влажности на основе СНКР имеет частоту  $F_1 = \infty$ , а  $1/F_1 = 0$  и выражение (2) преобразуется к виду:

$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{1}{F_4^2} - \frac{1}{F_3^2}}{\frac{1}{F_3^2}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_3^2 - F_4^2}{F_4^2}. \quad (3)$$

Для малых величин влагосодержания  $W$ , когда выполняется неравенство вида:

$$\frac{F_3^2 - F_4^2}{F_4^2} < 0,1, \quad (4)$$

формула (3) для влагосодержания  $W$  упрощается:

$$W \approx \frac{2}{3} \cdot \frac{F_3 - F_4}{F_4}. \quad (5)$$

Результаты обработанных экспериментальных значений влагосодержаний  $W$ ,  $W_0$  и частот  $F_3$ ,  $F_4$  представлены в табл. 1.

Таким образом, при концентрации влаги в приготовленной эмульсии  $W_0 = 10$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> величина измеренного влагосодержания составляет  $W = 9,51$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,

а величина  $\Delta W = \pm 0,5$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, что позволяет производить измерения влагосодержания в диапазоне  $10^{-3} \% < W < 0,1 \%$  с относительной погрешностью (определяемой как разница влагосодержания приготовленной и измеряемой эмульсии деленной на влагосодержание приготовленной) не более 5,2 %.

Таблица 1

Обработанные результаты измерений				
$W_0$ , см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Частоты, Гц		$W$ , см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Относительная погрешность, %
	$F_3$	$F_4$		
10±1	1335497,4±0,6	1335478,3±0,8	9,51±0,5	5,2
50±1	1335558,1±0,6	1335459,8±0,6	49±0,4	1,9
100±5,1	1304712,0±0,7	1304519,7±0,8	98,3±0,6	1,8
499±5,6	1335558,1±0,6	1334602,2±1,3	477,7±0,7	4,6
999±11,2	1304658,8±0,7	1302569,9±1,2	1069,9±0,7	6,7
9901±111,8	1304658,8±0,7	1286722,6±34,4	9357,7±18,4	5,8

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что созданный измеритель характеризуется относительной погрешностью определения влагосодержания не более 6,7 % в диапазоне  $10$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>  $\leq W \leq 10^5$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

#### Выводы.

1. В развитие диэлектрического метода определения влагосодержания в неполярных жидких диэлектриках разработан СВЧ измеритель влагосодержания с измерительным преобразователем в виде ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора работающего в резонансном режиме.

2. Экспериментально подтверждена корректность предложенной для реализации измерителя влагосодержания упрощенной физической модели эмульсии типа «вода в масле».

3. Разработан измеритель влагосодержания на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора, который обладает большей стабильностью частоты, меньшими паразитными параметрами и большей рабочей частотой по сравнению с измерителем на основе емкостного измерительного преобразователя и измерительного генератора с сосредоточенными параметрами.

4. Предложена конструкция измерителя позволяет определять влагосодержание для исследуемых жидкостей как в покое, так и в потоке.

5. Разработанный измеритель влагосодержания позволяет при минимуме материально-временных затрат оперативно определить влагосодержание в диапазоне  $10^{-3} \% < W < 0,1 \%$  с помощью измерения двух резонансных частот измерительного преобразователя (с заполненным ИП обезвоженным маслом и с ИП заполненным исследуемой эмульсией) и расчета влагосодержания по формуле [5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелкумян В.Е. Измерение и контроль влажности материалов. – М.: Изд-во Комитета стандартов мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1970. – 138 с.

2. 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.
3. 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.
4. Рудаков В.В., Коробко А.А. Резонансные спектры неоднородных коаксиальных резонаторов для определения диэлектрической проницаемости жидких сред в СВЧ диапазоне // Вісник НТУ «ХПІ». – №20(1129). – С. 129-137.
5. Рудаков В.В., Коробко А.А. Исследования метрологических характеристик измерительных преобразователей в виде ступенчатого коаксиального неоднородного резонатора для диэлектрики жидких сред в СВЧ диапазоне // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – №51(1160). – С. 91-95.
6. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

#### REFERENCES

1. Melkumyan V.E. *Izmerenie i kontrol vlazhnosti materialov*. [Measurement and control of humidity of materials.]. Moscow, Komitet standartov mer i izmeritelnykh priborov pri Sovete Ministrov SSSR Publ., 1970. 138 p. (Rus).
2. 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).
3. 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).
4. Rudakov V.V., Korobko A.A. The resonance spectra of inhomogeneous coaxial resonators to determine the dielectric constant of liquid media in the microwave band. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.20(1129), pp. 129-137. (Rus).
5. Rudakov V.V., Korobko A.A. Research of metrological characteristics of transmitters in the form of a step coaxial resonator for dielectric inhomogeneous liquid media in the microwave range. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.51(1160), pp. 91-95. (Rus).
6. Dvoryashin B.V. *Osnovy metrologii i radioizmereniya* [Fundamentals of metrology and radio measurements]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1993. 320 p. (Rus).

Поступила (received) 19.09.2016

Рудаков Валерий Васильевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Коробко Александр Анатольевич<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,  
тел/phone +380 93 6508088, e-mail: andarleks@gmail.com

V.V. Rudakov<sup>1</sup>, A.A. Korobko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### A high sensitive microwave measuring device of the moisture content in the non-polar dielectric liquids based on an inhomogeneous step coaxial resonator.

**Purpose.** Objective is to create a moisture meter for non-polar liquid dielectrics with low volumetric moisture content of more than  $10^{-3}$  %. **Methodology.** Moisture measuring is based on dielectric method. It is implemented as a resonant method of determining a capacitance measuring transducer. Measuring transducer capacitive type has a working and parasitic capacitance. It was suggested the definition of moisture on four of resonance frequencies: when the measuring transducer is turned off, one by one filled with air, «dry» and investigated liquid, to determine the parasitic capacitance of the measuring generator, and the parasitic capacitance of the measuring transducer and humidity. Measurement frequency was increased up to microwave range to increase the sensitivity. Measuring transducer with distributed parameters representing a step heterogeneous coaxial resonator is used by. This measuring transducer has a zero stray capacitance, because the potential electrode has a galvanic connection with an external coaxial electrode. Inductive ties loop is used to neglect parasitic capacitance of the measuring generator, and to increase the quality factor of the system. Measuring moisture is reduced to measuring the two frequencies of resonance frequency and «dry» and investigated liquid. Resonant characteristics transducer in a step inhomogeneous coaxial resonator have been investigated to determine the quality factor of filled with air and transformer oil, and experiments to measure the moisture content in transformer oil have been conducted. **Results.** Measuring transducer of distributed type is developed and researched – it is step inhomogeneous coaxial resonator. It has a smaller geometric length and larger scatter of the first and second resonant frequencies. Expression is obtained for determination of moisture on the basis of two resonant frequencies. The formula of the two frequencies to determine the moisture is correct. Resonant characteristics are obtained for measuring transducer. Its quality factor has been determined – it does not depend on what it is filled with air or oil. The moisture content in transformer oil for the amount of water to  $10^{-3}$  % with an error of no more than 6.7 % has been determined. **Originality.** It has been proposed to use of an inhomogeneous step coaxial resonator as a measuring transducer. Original high sensitive moisture meter for the fluid at rest and flowing fluid with low values of parasitic capacitances has been developed and researched. An original method of determining the moisture by measuring the two frequencies of resonance has been proposed and implemented. **Practical value.** This meter may be used to determine moisture in any of the non-polar liquid with high speed and accuracy. Moisture meter can be used in electrical engineering, aeronautical engineering, in the chemical and food industries. References 6, tables 1, figures 8.

**Key words:** moisture meter, non-polar liquid dielectrics, measuring transducer, step inhomogeneous coaxial resonator, measuring generator, resonance characteristics, volumetric water content, transformer oil, water.



9 сентября 2016 г. после тяжелой болезни на 68 году жизни скончался известный ученый в области техники высоких напряжений, доктор технических наук, профессор, академик АН высшей школы, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заведующий кафедрой инженерной электрофизики Валерий Васильевич Рудаков.

Многолетняя плодотворная научная работа, конечной целью которой всегда являлось создание уникальных электрофизических установок, привела В.В. Рудакова к написанию докторской диссертации, которую он успешно защитил в 1999 г.

Под его научным руководством были успешно защищены одна докторская и несколько кандидатских диссертаций. Профессор В.В. Рудаков – автор более 120 научных трудов и изобретений, в том числе нескольких учебных пособий.

Валерий Васильевич был великим тружеником, прекрасным организатором, добрым и отзывчивым человеком. Он не оставлял ни одной, даже внезапно возникшей в конце дня, проблемы на завтра и часто уходил с работы последним, закрывая кафедру и подъезд математического корпуса. В его кабинете всегда было многолюдно: сотрудники, преподаватели, дипломники, студенты младших курсов свободно обращались к нему и получали необходимую поддержку. Он был жизнерадостным оптимистом. Таким Валерий Васильевич останется в нашей памяти.

Мы скорбим и выражаем глубокое соболезнование родным и близким покойного.