

В.В. РУДАКОВ, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
А.А. КОРОБКО, аспирант, мл. науч. сотр., НИПКИ «Молния»
НТУ «ХПИ»

РЕЗОНАНСНЫЕ СПЕКТРЫ НЕОДНОРОДНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ СРЕД В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

В работе проведен анализ частотных спектров классического однородного коаксиального резонатора с электрической длиной, равной $1/4$ длины волны и неоднородного коаксиального резонатора на линиях с различными волновыми сопротивлениями. Частотный спектр классического резонатора характеризуется малым разномом частот первого и второго резонансов, что позволяет использовать его исключительно в схемах с исследованием амплитудно-частотных характеристик для определения диэлектрической постоянной заполняющей его среды. Предложен новый тип неоднородного резонатора коаксиального типа на линиях с различными волновыми сопротивлениями. Частотный спектр неоднородного резонатора характеризуется резким (до 4 раз) уменьшением первой резонансной частоты и существенным (до 5 раз) увеличением разности первой и второй резонансных частот. Неоднородный резонатор имеет в 4 раза меньшую геометрическую длину и может использоваться в режиме свободных колебаний измерительного генератора. Неоднородный резонатор позволяет осуществлять измерения диэлектрической постоянной среды в расширенном частотном диапазоне от десятков мегагерц до 1,8 ГГц.

Ключевые слова: резонансные спектры, неоднородный коаксиальный резонатор, диэлектрическая проницаемость, жидкая среда.

Введение. Одной из составляющих частей диэлькометрического метода определения влагосодержания в жидких средах (трансформаторное масло, нефть, углеводородные топлива и т.д.) является резонансный способ определения диэлектрической проницаемости [1,2].

В работе [3] были проведены исследования резонансного способа определения диэлькометрической проницаемости жидких сред, заключающиеся в последовательном определении резонансных частот LC колебательного контура, образованного катушкой индуктивности, паразитной емкостью измерительного генератора и емкостью измерительного преобразователя емкостного типа, для случая заполнения его воздухом $\epsilon = 1$ и для случая заполнения исследуемой жидкой средой $\epsilon > 1$. Используемые при этом схематические и конструктивные решения позволили существенно расширить диапазон измеряемых величин влагосодержания в нефтяных маслах в сторону малых величин влагосодержания. Расширение диапазона в сторону малых величин влагосодержания осуществлялось следующими способами:

– уменьшение нестабильности величины генерируемых измерительным генератором частот;

- уменьшением величины паразитных емкостей измерительного генератора;
- уменьшением паразитной ("слепой") емкости измерительного преобразователя.

В процессе проведения исследований [3] было выявлено, что для дальнейшего расширения диапазона измерения влагосодержания в сторону малых значений ($10^{-3} \% - 10^{-2} \%$) наиболее перспективным является измерение на увеличенных по сравнению с [3] частотах – на частотах СВЧ диапазона, вплоть до $\approx 1,8$ ГГц (эта величина определяется исключительно частотной дисперсией величины диэлектрической проницаемости воды). При этом величина паразитной «слепой» емкости измерительного преобразователя должна быть минимальной.

Задачей работы является разработка нового типа измерительного преобразователя СВЧ диапазона и исследование его резонансных характеристик.

Описание исследований. На первом этапе исследований был проведен анализ резонансных спектров известного классического четвертьволнового коаксиального резонатора [4], представленного на рис. 1, широко используемого для определения диэлектрических характеристик различных сред в СВЧ диапазоне.

Классический четвертьволновой коаксиальный резонатор (рис. 1) представляет собой закороченной с одной стороны и разомкнутый с другой стороны отрезок однородной линии передачи. Пространство между внутренним и внешними электродами заполняется исследуемой средой (жидкостью), резонансная частота резонатора обратно пропорциональна величине $\sqrt{\varepsilon}$ исследуемой среды. Емкостной элемент связи А предназначен для внешней связи резонатора с измерительным генератором.

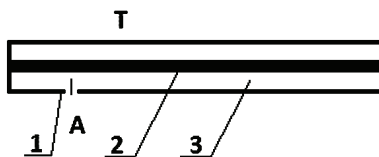


Рисунок 1 – Четвертьволновой однородный коаксиальный резонатор:

1 – внешний электрод; 2 – внутренний электрод; 3 – исследуемая среда;

А – емкостной элемент связи резонатора (емкостной штырь)

Четвертьволновой резонатор характеризуется величиной «слепой» емкости равной нулю (внутренний электрод закорочен с внешним), что существенно отличает его от измерительных преобразователей чисто емкостного типа [1-3], в которых для конструктивного закрепления одного из электродов

обязательно использование диэлектрика как конструктивного элемента.

Очевидным недостатком классического однородного четвертьволнового коаксиального резонатора является его большая геометрическая длина при использовании нижних частот СВЧ диапазона.

Этот недостаток отсутствует у резонаторов закрытого типа: торообразного и Н- видов [4,5], однако их замкнутый тип делает крайне затруднительным точное определение их резонансных частот, вследствие необходимости их разборки в процессе определения диэлектрических характеристик исследуемых сред.

Учитывая вышеизложенное, был предложен новый тип коаксиального резонатора – неоднородного типа, который не предполагает его разборки в процессе измерений рис. 2.

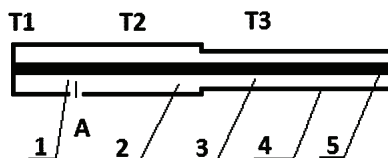


Рисунок 2 – Неоднородный коаксиальный резонатор в виде коаксиальных линий
T1-T3: 1 – область линии T1; 2 – область линии T2; 3 – область линии T3;
4,5 – внешний и внутренний электроды, A - емкостной элемент связи

Неоднородный коаксиальный резонатор состоит из трех коаксиальных линий разной электрической длины с различными волновыми сопротивлениями и емкостного элемента связи.

Ограничивая область резонансных частот отсутствием поперечных резонансов в неоднородном резонаторе, его схема замещения имеет вид, представленный на рис. 3.

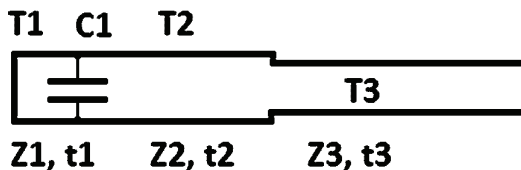


Рисунок 3 – Схема замещения неоднородного коаксиального резонатора:
 Z_1, t_1 ; Z_2, t_2 ; Z_3, t_3 – волновые сопротивления и времена задержки линий
T1-T3; C_1 – емкость элемента связи

При этом предполагается, что в исследуемой среде, помещенной между внутренним и внешними коаксиальными электродами отсутствует частотная дисперсия величины ϵ , коаксиальные линии T1-T3 являются идеальными линиями без потерь и искажений и работают в частотном диапазоне, соответ-

вующем основному виду колебаний в виде Т-моды [4,5].

На рис. 4 приведена схема анализа резонансных частот однородного и неоднородного резонаторов в среде MICROCAP 8. Резонансные частоты резонаторов определялись как частоты генерирования измерительного генератора V1 в виде идеального источника синусоидальной э.д.с., соответствующие максимуму напряжения в узловой точке 3 схемы анализа.

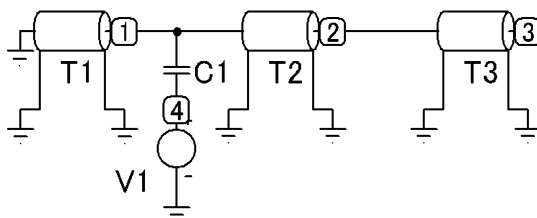


Рисунок 4 – Схема анализа неоднородного коаксиального резонатора в среде MICROCAP 8: T1-T3 – идеальные линии передачи; V1 – идеальный источник синусоидальной э.д.с.; C1 – емкость элемента связи; 1-4 – узловые точки анализа

На первом этапе был проведен анализ резонансного спектра классического четвертьволнового коаксиального резонатора. Его резонансный спектр в логарифмическом виде представлен на рис. 5.

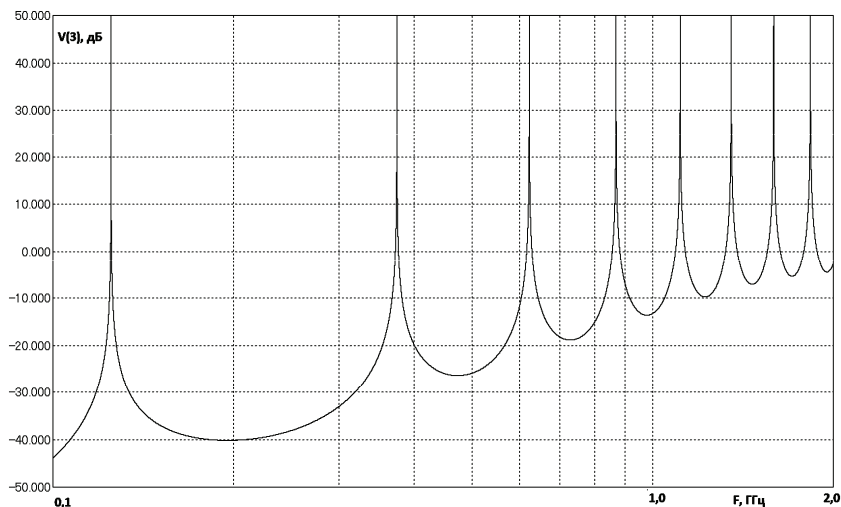


Рисунок 5 – Резонансные спектры однородного коаксиального резонатора:
 $Z1 = Z2 = Z3 = 50 \text{ Ом}$; $t = 2 \text{ нс}$; $C1 = 1 \text{ пФ}$

Как видно из анализа вида резонансного спектра, он представляет собой многочастотный спектр с частотой первого резонанса равной 0,125 ГГц, пол-

ностью совпадающий с его теоретическим (четвертьволновым) значением. Кроме этого, при анализе резонансного спектра выявляется его второй недостаток: малая частота разнеса между первым резонансом (0,125 ГГц) и вторым резонансом (0,374 ГГц).

Этот факт затрудняет использование классического четвертьволнового резонатора в виде измерительного преобразователя совместно с измерительным генератором в режиме свободных (незатухающих) колебаний.

Учитывая тот момент, что измерительный генератор должен генерировать в режимах $\epsilon = 1$ (воздух) и $\epsilon > 2$ (среда), то возможна его генерация не на частоте первого резонанса, а на частотах второго и более высших резонансов («перескок» частоты генерации).

Этот существенный недостаток классического четвертьволнового резонатора определяет его область использования для определения ϵ среды режимом не свободной генерации, а режимом исследования амплитудно-частотной характеристики.

Следует отметить, что приборы для определения амплитудно-частотных характеристик в ВЧ и СВЧ диапазонах существенно более громоздки и дороги по сравнению с частотомерами в той же частотной области (которые используются в режиме свободной генерации измерительного генератора). Кроме этого, точность отсчетов частоты резонанса серийных измерителей амплитудно-частотных характеристик существенно хуже, чем частотомеров, что и определяет недостаточную чувствительность измерений ϵ среды для малых значений влагосодержания в режиме амплитудно-частотных характеристик.

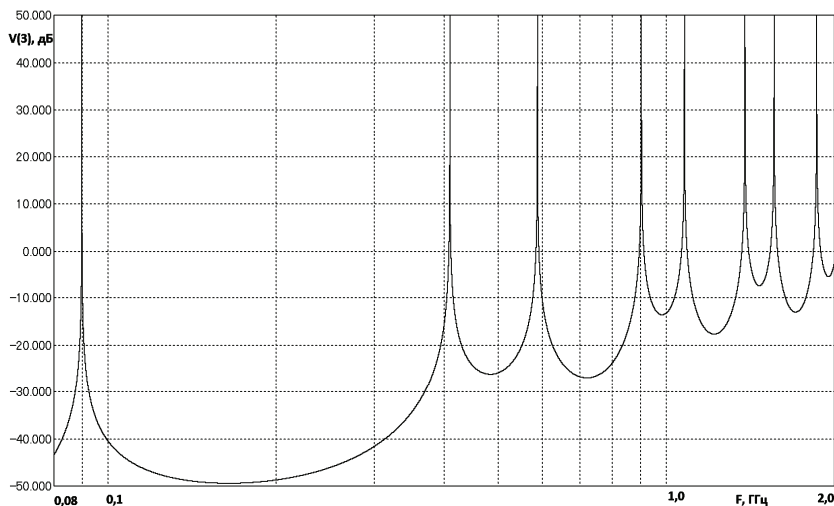


Рисунок 6 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора:

$Z1 = 50 \text{ Ом}; Z2 = 50 \text{ Ом}; Z3 = 20 \text{ Ом}; t1 = 0,1 \text{ нс}; t2 = 0,9 \text{ нс}; t3 = 1 \text{ нс}; C1 = 1 \text{ пФ}$

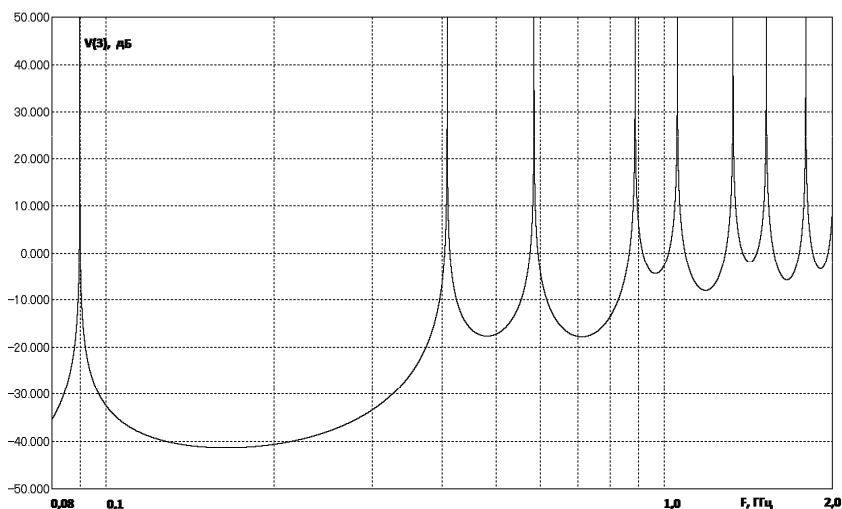


Рисунок 7 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора:
 $Z1 = 125 \text{ Ом}$; $Z2 = 125 \text{ Ом}$; $Z3 = 50 \text{ Ом}$; $t1 = 0,1 \text{ нс}$; $t2 = 0,9 \text{ нс}$; $t3 = 1 \text{ нс}$; $C1 = 1 \text{ пФ}$

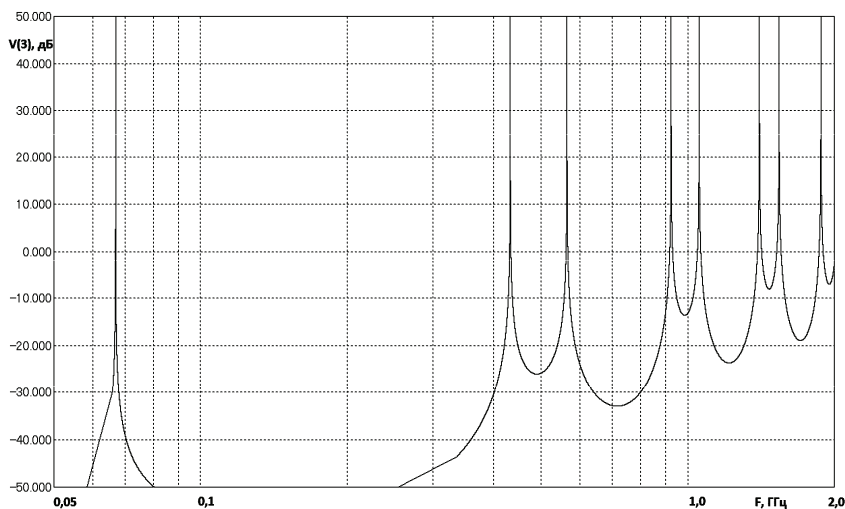


Рисунок 8 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора:
 $Z1 = 50 \text{ Ом}$; $Z2 = 50 \text{ Ом}$; $Z3 = 10 \text{ Ом}$; $t1 = 0,1 \text{ нс}$; $t2 = 0,9 \text{ нс}$; $t3 = 1 \text{ нс}$; $C1 = 1 \text{ пФ}$

Для устранения выявленных недостатков классического однородного четвертьволнового резонатора и был предложен новый тип измерительного преобразователя в виде неоднородного коаксиального резонатора.

Для сравнения его резонансного спектра с резонансным спектром клас-

сического четвертьволнового резонатора в процессе исследований была зафиксирована общая длина резонатора, и величина емкости $C1$.

Были исследованы влияния величин $Z1$ - $Z3$ на характер резонансного спектра неоднородного резонатора рис. 6-8.

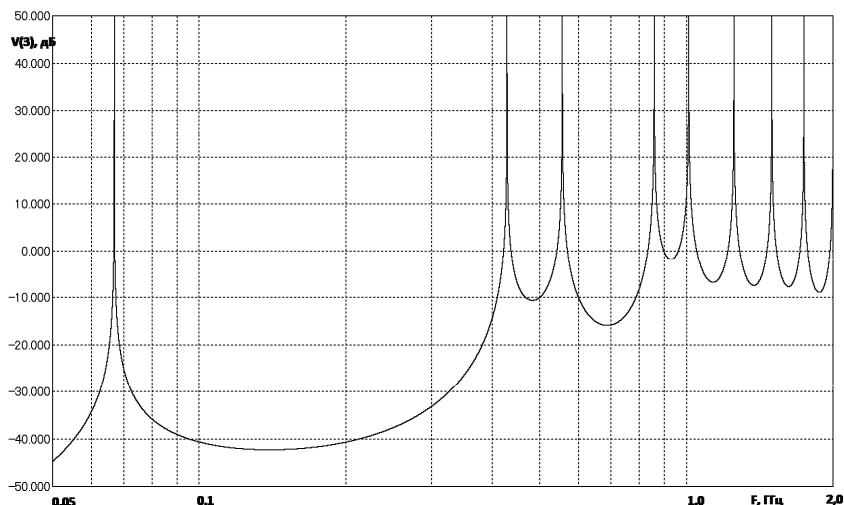


Рисунок 9 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора:
 $Z1 = 250 \text{ Ом}$; $Z2 = 250 \text{ Ом}$; $Z3 = 50 \text{ Ом}$; $t1 = 0,1 \text{ нс}$; $t2 = 0,9 \text{ нс}$; $t3 = 1 \text{ нс}$; $C1 = 1 \text{ пФ}$

Как видно из анализа данных рис. 6, 7 уменьшение величины $Z3$ для рис. 6 и увеличение величины $Z1$, $Z2$ для рис.7 характеризуется одинаковыми характерами изменения резонансных спектров по сравнению со спектром классического резонатора рис. 5:

- уменьшением частоты первого резонанса (с $0,125 \text{ ГГц}$ до $0,09 \text{ ГГц}$);
- увеличением частоты второго резонанса (с $0,374 \text{ ГГц}$ до $\approx 0,4 \text{ ГГц}$).

Указанная общая закономерность прослеживается и для случаев, представленных на рис. 8, 9 в еще большей степени.

Рис. 10 характеризует полученный резонансный спектр для одновременного разнонаправленного изменения $Z1$ - $Z3$, при котором величины $Z1$ - $Z2$ были увеличены в 5 раз, а $Z3$ была уменьшена в 5 раз по сравнению с волновым сопротивлением классического четвертьволнового резонатора.

Обобщенные результаты исследований в виде частот резонансов представлены в табл. 1.

Как видно из представленных результатов неоднородный резонатор по сравнению с классическим четвертьволновым обладает следующими преимуществами:

- существенно (в ≈ 4 раза) снижена частота первого резонанса;
- увеличена частота второго резонанса;

– существенно (в ≈ 5 раз) увеличен разнос частот первого и второго резонансов.

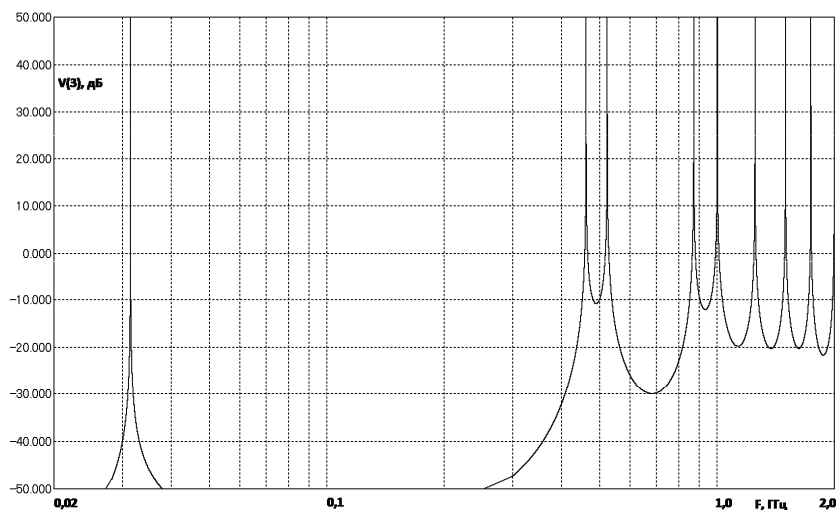


Рисунок 10 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора: $Z1 = 250 \text{ Ом}$; $Z2 = 250 \text{ Ом}$; $Z3 = 10 \text{ Ом}$; $t1 = 0,1 \text{ нс}$; $t2 = 0,9 \text{ нс}$; $t3 = 1 \text{ нс}$; $C1 = 1 \text{ пФ}$

Таблица 1– Распределение резонансных частот

Номер резонанса	Частоты резонансов, ГГц					
	$Z1/Z2/Z3$, Ом, номер рисунка					
	50/50/50, рис.5	50/50/20, рис.6	125/125/50, рис.7	50/50/10, рис.8	250/250/50, рис.9	250/250/10, рис.10
1	0,125	0,09	0,09	0,067	0,067	0,031
2	0,374	0,41	0,408	0,432	0,428	0,462
3	0,623	0,588	0,584	0,565	0,556	0,542
4	0,868	0,903	0,887	0,925	0,859	0,873
5	1,111	1,078	1,054	1,05	1,011	1,003
6	1,352	1,383	1,328	1,404	1,252	1,253
7	1,591	1,56	1,523	1,541	1,489	1,500
8	1,831	1,86	1,779	1,877	1,743	1,742

Выводы.

1 Вследствие малого разноса первой и второй резонансных частот классический четвертьволновой резонатор может быть использован преимущественно в режиме определения амплитудно-частотной характеристики, так как в режиме свободной генерации измерительного генератора возможен «перескок» частот с первого на второй и последующие резонансы при заполнении резонатора средой с $\epsilon > 2$.

2 Предложен новый тип резонатора для определения диэлектрических характеристик сред в ВЧ (десятки МГц) и СВЧ (до 1,8 ГГц) диапазонах с величиной «слепой» емкости равной нулю.

3 В предложенном резонаторе существенно увеличен разнос частот первого и второго резонансов (≈ 5 раз), что позволяет использовать это в режиме свободных колебаний измерительного генератора.

4 Предложенный резонатор позволяет существенно (≈ 4 раза) снизить его геометрическую длину по сравнению с классическим четвертьволновым резонатором при одинаковых частотах исследований.

Список литературы: 1. Рудаков В.В., Коробко А.И., Коробко А.А. Диэлектрический метод определения влагосодержания в эмульсиях типа минеральное масло – вода с использованием электрофизической модели эмульсии инженерного типа // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 154-158. 2. Рудаков В.В., Коробко А.И., Коробко А.А., Электрофизическая модель поведения эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: 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». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50. – С. 143-149. 4. Дж. Альтман Устройство сверхвысоких частот пер. с англ. / ред И.В. Лебедева. – М.: Мир, 1968. – 487 с. 5. А.Ф. Харвей Техника сверхвысоких частот том 1., пер с англ. / ред. В.И.Сушкевича. – М.: Сов. радио. – 1965. – 783 с.

Bibliography (transliterated): 1. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A. Dielektricheskii metod opredeleniya vlagosoderzhaniya v emul'siyakh tipa mineral'noye maslo – voda s ispol'zovaniyem elektrofizicheskoy modeli emul'sii inzhenernogo tipa // Visnik NNU «KhPI». Zbirnik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KhPI», 2009. № 39. 154-158 Print. 2. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A., Elektrofizicheskaya model' povedeniya emul'sii tipa mineral'noye maslo – voda inzhenernogo tipa // Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KhPI», 2009. № 39. 158-161 Print. 3. Rudakov V.V., Korobko A.A., Povysheniye chuvstvitel'nosti izmereniy sodержaniya vlagi v transformatornom masle diel'kometricheskim metodom v rezonansnom rezhime // Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. № 50. 143-149 Print. 4. Dzh. Al'tman Ustroystvo sverkhvysokikh chastot per. s angl. / red I.V. Lebedeva. Moscow: Mir, 1968. 487 Print. 5. A.F. Kharvey Tekhnika sverkhvysokikh chastot tom 1., per s angl. / red. V.I.Sushkevicha. Moscow: Sov. radio, 1965. 783 Print.

Поступила (received) 13.03.2015