

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 53.083.9

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЕМКОСТНОЙ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ МАТЕРИАЛОВ

©2026 г. Ю. А. Костычов*

Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 644024, Омск, просп. К. Маркса, 15

**E-mail: fatnblan@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.12.2025

После доработки 13.04.2026

Принята к публикации 04.05.2026

Разработан новый метод обработки результатов емкостных измерений при определении спектров комплексной диэлектрической проницаемости материалов. Метод отличается от известных аналогов восстановлением комплексной диэлектрической проницаемости по измеренной проводимости емкостной измерительной ячейки в широкой полосе частот без применения приближения малых потерь. Проведены экспериментальное исследование метода и сравнение его точностных характеристик с таковыми для известных методов с использованием измерительных ячеек на базе коаксиальной и симметричной полосковой линий. Показана эффективность применения разработанного метода для материалов со значением тангенса угла диэлектрических потерь, превышающим 0.01, в расширенном частотном диапазоне при увеличении верхней частоты измеряемого спектра комплексной диэлектрической проницаемости не менее чем в 1.3 раза и повышении точности для его мнимой части не менее чем в 1.5 раза в сравнении с известными методами.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, измерительная ячейка, емкостные измерения, калибровочные жидкости, релаксационная модель Дебая.

1. ВВЕДЕНИЕ

Емкостная диэлектрическая спектроскопия получила широкое распространение в различных областях и условиях применения: промышленных, бытовых и лабораторных. С помощью емкостной диэлектрической спектроскопии определяются и контролируются влажность зерна и других сельскохозяйственных материалов, почвы, строительных смесей. Также проводятся геологические исследования горных пород и минералов, выполняются мониторинг состояния источников воды и анализ воздуха на наличие загрязнений и значение уровня влажности. В промышленности методами емкостной диэлектрической спектроскопии осуществляется контроль качества изготавливаемой продукции, например, керамических подложек и других диэлектрических ламинатов. В лабораторных условиях, кроме прямых диэлектрических измерений, выполняются и опосредованные, т. е. при внешних

воздействиях на диэлектрик определяются его физические свойства: температура, механические напряжения и прочее.

В диэлектрической спектроскопии метод емкостных измерений [1–4] заключается в выражении комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) материала, помещенного в емкостную измерительную ячейку (ИЯ) (рис. 1а), через номиналы сосредоточенных элементов ее эквивалентной схемы (рис. 1б). Конструктивно емкостная ИЯ представляет собой конденсатор, область между обкладками которого, куда вводится измеряемый материал, называется рабочей. Различаются ИЯ частичного и полного заполнения, последняя отличается непосредственным подключением рабочей области к векторному анализатору цепей (ВАЦ) или иному прибору, обеспечивающему измерение комплексной проводимости. При частичном заполнении ИЯ имеет переходную область, обеспечивающую подключение рабочей области к ВАЦ (рис. 1а). На рис. 1 показан пример коаксиальной ИЯ, содержащей переходную область в виде разъема N-типа (гнездо), и соответствующая этой ячейке на эквивалентной схеме контактная емкость C_k ; а также показана область измерений в виде коаксиального конденсатора, представленная на эквивалентной схеме индуктивностью обкладок конденсатора L , его емкостью C и проводимостью утечки g .

Рис. 1. Сечение коаксиальной емкостной ИЯ (а) и ее эквивалентная схема (б)

Значения действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей КДП ($\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$) выражаются через номиналы элементов эквивалентной цепи пустой и заполненной материалом ИЯ следующим образом:

$$\epsilon' = C/C_0, \quad (1)$$

где C и C_0 – емкость рабочей области ИЯ с материалом и без него соответственно,

$$\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg} \delta = \epsilon' \frac{g}{\omega C}, \quad (2)$$

где g – активная проводимость рабочей области ИЯ с материалом, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь рабочей области ИЯ с материалом. Проводимостью и тангенсом угла диэлектрических потерь для пустой ячейки обычно пренебрегается: они полагаются равными нулю.

Значения элементов эквивалентной цепи рабочей области ИЯ (как пустой, так и заполненной материалом) определяются через значение ее проводимости Y_1 с помощью калибровочных измерений как разность $Y_1 = Y - Y_2$ проводимостей ИЯ целиком (Y) и отдельной переходной области (Y_2). В случае описываемой коаксиальной ИЯ учет проводимости контактной емкости дает формулу $Y_1 = Y - i\omega C_k$. К емкостям C и C_0 также применяется коррекция на краевые эффекты [3, 4].

Основной задачей методов емкостных измерений является установление связи между измеренной величиной проводимости Y_1 рабочей области ИЯ и номиналами емкости C и активной проводимости g ее эквивалентной схемы, необходимыми для определения КДП по формулам (1), (2).

Согласно эквивалентной схеме (рис. 1б), проводимость Y_1 рабочей области ИЯ с материалом определяется по формуле

$$Y_1 = G + iB = g \frac{\omega_0^4 / \omega^4}{\operatorname{tg}^2 \delta + (\omega_0^2 / \omega^2 - 1)^2} + i\omega C \frac{(\omega_0^2 / \omega^2)[\omega_0^2 / \omega^2 - 1 - \operatorname{tg}^2 \delta]}{\operatorname{tg}^2 \delta + (\omega_0^2 / \omega^2 - 1)^2}, \quad (3)$$

где характеристическая циклическая частота $\omega_0^2 = 1/(LC)$, $\operatorname{tg} \delta = g/(\omega C)$, G и B – результаты измерений действительной и мнимой частей проводимости рабочей области.

Формула (3) является системой двух уравнений для мнимой и действительной частей проводимости Y . Приравняв G действительной части (3) и решая полученное квадратное уравнение для проводимости g , находим, что последняя пропорциональна квадрату емкости C . При подстановке g в виде полинома второй степени от C в мнимую часть формулы (3), приравненную к B , полученное выражение будет являться уравнением пятой степени для емкости C . Уравнение пятой и выше степеней не имеет аналитического решения [5].

Поэтому известные емкостные методы для разрешения уравнения (3) относительно C и g используют следующие приближения: 1) низкочастотное ($\omega \ll \omega_0$) и 2) приближение малых потерь ($g \ll \omega C$ или $\operatorname{tg} \delta \approx 0$).

Для метода, использующего низкочастотное приближение [1, 2], система уравнений из формулы (3) принимает вид

$$g = G, \quad C = B/\omega. \quad (4)$$

В случае приближения малых потерь g стремится к нулю, а номинал емкости имеет частотную коррекцию [3, 4], и система уравнений может быть записана следующим образом:

$$g = 0, \quad C = (B/\omega)(1 - \omega^2/\omega_0^2). \quad (5)$$

Резонансная циклическая частота ω_p рабочей области ИЯ с материалом, на которой реактивная проводимость B , согласно формуле (3), обращается в нуль, отличается от характеристической циклической частоты ω_0 и выражена следующим образом:

$$\omega_p^2 = \omega_0^2 - g^2/C^2. \quad (6)$$

Следовательно, использование в формуле (5) при частотной коррекции номинала емкости C значения измеренной резонансной частоты ω_p вместо ω_0 не учитывает потерь материала. Тангенс угла диэлектрических потерь реальных материалов отличен от нуля, но им в известном методе пренебрегают. Приближенные результаты широко используются в

том числе для исследования релаксационных процессов (чаще низкочастотных максвелл-вагнеровских [6, 7]), учет диэлектрических потерь в которых крайне важен.

Применение низкочастотного приближения ограничено точностью определения верхней частоты диапазона достоверных измерений (корректного определения малости отношения ω/ω_0), оно не может обеспечить широкополосных измерений КДП.

Поэтому целью данной статьи является представление и экспериментальное исследование метода точного аналитического выражения номиналов емкости C и активной проводимости g эквивалентной схемы рабочей области ИЯ через измеренные величины ее активной и реактивной проводимостей G и B для корректного определения КДП материалов в широком частотном диапазоне с диэлектрическими потерями емкостными методами.

2. МЕТОД

Был разработан метод, отличающийся точным решением уравнения (3) относительно g и C , поэтому он может быть применен для измерения КДП материалов с произвольным тангенсом угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот (вплоть до ω_p). Сущность метода заключалась в разрешении уравнения (3) относительно тангенса угла диэлектрических потерь с последующим выражением через него g и C .

Результат деления действительной части в формуле (3) G на мнимую B определен во всем частотном диапазоне, кроме резонансной частоты, и принимает вид

$$t = \operatorname{tg} \delta \frac{\omega_0^2 / \omega^2}{\omega_0^2 / \omega^2 - 1 - \operatorname{tg}^2 \delta}, \quad (7)$$

где $t = G/B$.

Выше отмечено, что величина ω_0/ω не может быть измерена, в отличие от величины ω_p/ω .

Поэтому необходимо было выразить характерную частоту ω_0 через резонансную частоту ω_p . Преобразуем выражение (7), используя формулу (6) и приняв за m величину ω_p/ω , к кубическому уравнению для $\operatorname{tg} \delta$:

$$\operatorname{tg}^3 \delta + m^2 \operatorname{tg} \delta + t(1 - m^2) = 0, \quad (8)$$

которое имеет точное аналитическое решение (например, по формуле Кардано [8]). Уравнение (8) имеет единственный действительный корень

$$\operatorname{tg} \delta = \sqrt[3]{-\frac{t(1-m^2)}{2} + \sqrt{\left(\frac{m^2}{3}\right)^3 + \left(\frac{t(1-m^2)}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{-\frac{t(1-m^2)}{2} - \sqrt{\left(\frac{m^2}{3}\right)^3 + \left(\frac{t(1-m^2)}{2}\right)^2}}, \quad (9)$$

поскольку подкоренное выражение квадратного корня положительно, а два комплексных корня (значения $\operatorname{tg} \delta$) физически не существуют.

Искомые номиналы активной проводимости и емкости рабочей области ИЯ могут быть выражены из формулы (3) при известном значении $\operatorname{tg} \delta$ следующим образом:

$$g = G \frac{\operatorname{tg}^2 \delta + (m^2 - 1 - \operatorname{tg}^2 \delta)^2}{(m^2 - \operatorname{tg}^2 \delta)^2}, \quad C = \frac{g}{\omega \operatorname{tg} \delta}. \quad (10)$$

Значения КДП следует восстанавливать по полученным номиналам g и C аналогично известным методам по формулам (1), (2). Обход особых точек $\omega_1 = \omega_p$ и ω_2 (последняя точка соответствует нулевому знаменателю активной проводимости формулы (10)) выполнен выбором частотной сетки проводимых измерений.

Таким образом, выражения (8) – (10) дали точное аналитическое решение поставленной задачи, с их помощью могут быть восстановлены значения КДП материала в рабочей области ИЯ при измеренных ее активной и реактивной проводимостях G и B , а также известной первой резонансной циклической частоте ω_p , значение которой получено из равенства $B(\omega_p) = 0$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация разработанного метода и сравнения с известными методами были проведены на коаксиальной ИЯ (рис. 1а) с рабочей областью в виде коаксиальных цилиндров: внутреннего длиной 8 мм и диаметром 1.3 мм, внешнего длиной 9 мм с внутренним диаметром 5 мм и толщиной стенки 1 мм. Емкость рабочей области при воздушном заполнении C_0 составила 0.35 пФ, емкость переходной области составила 0.92 пФ, частота первого последовательного резонанса ИЯ $f_0 = 3.81$ ГГц. Емкостные измерения были проведены для жидкостей (заполнявших без пустот рабочую область и имевших температуру 30 °С): изопропилового спирта и диметилсульфоксида. Модели КДП жидкостей и их температурные зависимости приведены в работе [9], для диметилсульфоксида модельные значения $\operatorname{tg} \delta = 0.001\text{--}0.07$ в диапазоне частот 0.01–1 ГГц, для изопропилового спирта $\operatorname{tg} \delta = 0.015\text{--}0.94$ в диапазоне частот 0.02–2 ГГц. По относительным отклонениям значений КДП, полученных известными методами и методом

из настоящей статьи, от модельных значений была проведена оценка точностных характеристик методов для материала с малыми и большими потерями.

Размеры ИЯ были выбраны так, чтобы в окрестности релаксационного процесса изопропилового спирта ($f_{\text{rel}} = 557$ МГц) были возможны емкостные измерения (проводимость рабочей области имела емкостной характер, а первый последовательный резонанс ИЯ, заполненной материалом, был выше по частоте, чем $2f_{\text{rel}}$).

Модельные частотные зависимости КДП жидкостей в соответствии с релаксационной моделью Дебая были представлены в следующем виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + i f / f_{\text{rel}}} - i \frac{\sigma}{2 \pi f \varepsilon_0}, \quad (11)$$

где ε_{∞} и ε_s – высокочастотный и низкочастотный пределы дисперсии КДП, ε_0 – электрическая постоянная, σ – удельная проводимость (для изопропилового спирта и диметилсульфоксида были взяты нулевые значения).

Результаты измерений модуля и фазы коэффициента отражения S_{11} от рабочей области, по которым были определены интервалы приборной погрешности, приведены на рис. 2а, б для изопропилового спирта и диметилсульфоксида в рабочей области соответственно. По приведенным значениям S_{11} с помощью известных методов [10] может быть восстановлена комплексная проводимость Y_1 рабочей области. Частотные положения первого последовательного резонанса f_p (соответствующего частоте ω_p) определены равенством аргумента коэффициента отражения минус 180° .

Рис. 2. Графики частотной зависимости измеренных модуля 1, аргумента коэффициента отражения...

Измеренные величины проводимости Y_1 были обработаны тремя методами: методом из настоящей статьи, методом низкочастотного приближения и методом приближения малых потерь. Для метода приближения малых потерь ввиду отсутствия данных по активной проводимости значения мнимой части КДП были заимствованы из метода низкочастотного приближения.

Полученные спектры действительной и мнимой частей КДП приведены на рис. 3, 4 для изопропилового спирта и диметилсульфоксида. Для разработанного метода нанесен интервал приборной погрешности. Модельные значения также отмечены.

Рис. 3. Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей КДП для изопропилового спирта...

Рис. 4. Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей КДП для диметилсульфоксида...

Табл. 1 содержит значения ω_b (приведенные к ω_p) верхней частоты диапазона, в котором относительное отклонение ($\delta\varepsilon'/\varepsilon'$) значений действительной части КДП ε' от данных

модели Дебая не превышало 5%, для обеих жидкостей. Также приведены данные о максимальных относительных отклонениях $\delta\epsilon''/\epsilon''$ мнимой части КДП в диапазоне частот, ограниченном сверху величиной f_b .

Таблица 1. Точностные характеристики исследуемых методов

Метод определения КДП	Для изопропилового спирта		Для демитилсульфоксида	
	ω_b/ω_p	$\delta\epsilon''/\epsilon''$	ω_b/ω_p	$\delta\epsilon''/\epsilon''$
Разработанный в настоящей статье	72%	5%	142%	38%
Низкочастотное приближение	55%	65%	31%	46%
Приближение малых потерь	30%		69%	

Усредненное относительное отклонение значений действительной части КДП ϵ' от данных модели Дебая для разработанного метода в частотном диапазоне до резонансной частоты ИЯ f_p ($f_b = f_p$) составило 4% и 5% для изопропилового спирта и диметилсульфоксида соответственно. Для ϵ'' эта величина составила 6% и 22.9% для изопропилового спирта и диметилсульфоксида соответственно.

Дополнительно были измерены водные растворы соли NaCl концентраций 0.05 и 0.5 г/л. В случае водных растворов данные относительных отклонений КДП приведены в табл. 2 для частотного диапазона до f_b , но не выше f_p . Модельные данные (11) определены по солености и температуре (25°C) согласно работе [11]. По данным табл. 2 видно, что с ростом солености (проводимости и, следовательно, тангенса диэлектрических потерь) точность приближения малых потерь снижается, а точность разработанного метода растет (в большей степени, чем точность низкочастотного приближения).

Таблица 2. Точностные характеристики исследуемых методов для водных растворов солей

Метод определения КДП	Для водного раствора соли NaCl 0.05 г/л		Для водного раствора соли NaCl 0.5 г/л	
	ω_b/ω_p	$\delta\epsilon''/\epsilon''$	ω_b/ω_p	$\delta\epsilon''/\epsilon''$
Разработанный в настоящей статье	190%	75%	189%	49%
Низкочастотное приближение	60%	299%	59%	253%
Приближение малых потерь	90%		79%	

Также были проведены измерения для водного раствора изопропилового спирта (1:1 по объему). Известных моделей КДП для данного раствора не получено, поэтому результат

измерения дан в виде диапазона полученных значений действительной и мнимой частей КДП в табл. 3. Верхняя частота приведенных данных для приближения малых потерь и низкочастотного приближения ограничена половиной резонансной частоты, на частотах выше наблюдаются существенные отклонения, аналогичные приведенным на рис. 3, 4, обусловленные близостью резонансной частоты. Для разработанного в настоящей работе метода верхняя частота измерений была выбрана равной резонансной. По данным табл. 3 можно сказать, что данные по действительной части КДП, полученные с помощью приближения малых потерь и с помощью метода из настоящей работы, различаются не более чем на 5% (относительные отклонения). Аналогично соответствуют точности измерения мнимой части КДП, полученные с помощью низкочастотного приближения и метода из настоящей работы. Таким образом, данные табл. 3 демонстрируют идентичность разработанного в настоящей работе метода уже известным, также видна повышенная широкополосность метода из настоящей работы.

Таблица 3. Результаты измерений смеси водного раствора соли NaCl (0.5 г/л) и изопропилового спирта (1:1 по объему) с помощью исследуемых методов

Метод определения КДП	ε'	ε''
Разработанный в настоящей статье	46.5–44.3	3.48–7.56
Низкочастотное приближение	49–61.2	3.87–7.97
Приближение малых потерь	46.5–45.8	

Примечание: данные для низкочастотного приближения и приближения малых потерь приведены в частотном диапазоне до $0.5\omega_p$, а данные для метода из настоящей статьи – в частотном диапазоне до ω_p .

Для исследования разработанного в настоящей работе метода в низкочастотном (1–100 МГц) диапазоне были выбраны измерения водонасыщенной бентонитовой глины (с объемной влажностью 98.6%) как материала с большими потерями – посредством ИЯ на базе симметричной полосковой линии (СПЛ), описанной в работе [12]. Точность методов в этом случае оценивалась по разности результатов емкостных измерений и измерений высокочастотным методом (описанным в работе [12]), который восстанавливает значения КДП через френелевские коэффициенты на границах рабочей области (с материалом). Оценка была проведена на частоте перекрытия рабочих диапазонов низкочастотного и высокочастотного методов. Результаты измерения КДП водонасыщенной бентонитовой глины приведены на рис. 5.

Рис. 5. Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей КДП для раствора бентонитовой глины...

Относительное отклонение значений действительной части КДП ϵ' , полученных методом из настоящей работы, от данных высокочастотного метода не превысило 1% на частоте перекрытия (75 МГц). Аналогично отклонение значений мнимой части КДП ϵ'' , полученных методом из настоящей работы, составило 6%. Относительные отклонения известных методов превысили 90% как для мнимой, так и для действительной частей КДП.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку известные методы обработки емкостных измерений КДП являются предельными случаями разработанного, естественной представляется полученная идентичность методов для частот $\omega \ll \omega_r$. Для материалов с малым значением тангенса угла диэлектрических потерь (порядка 0.01) известный метод приближения малых потерь обеспечивает точные измерения в более широкой полосе, нежели метод низкочастотного приближения, но уступает методу из настоящей работы. Для материалов с большими потерями ($\text{tg}\delta > 0.1$) известный метод приближения малых потерь оказывается менее эффективным, чем метод низкочастотного приближения. Разработанный метод обеспечивает расширение полосы проводимых измерений КДП при сохранении их точности более чем в 1.3 раза (табл. 1) по сравнению с известными. Средняя величина методической погрешности измерения КДП как мнимой, так и действительной частей в диапазоне частот до резонансной частоты ω_r ИЯ принимает значения 5% для разработанного метода при измерении КДП изопропилового спирта. Большая погрешность определения мнимой части КДП для диметилсульфоксида обусловлена отчасти малыми значениями измеряемой величины $\text{tg}\delta$, она наблюдается во всем частотном диапазоне и для всех исследованных методов (возможно, она связана с чистотой измеряемого материала).

Использование известных методов при исследовании релаксационного процесса изопропилового спирта обеспечивает точное определение действительной части КДП, но не позволяет достоверно оценить (ни качественно, ни количественно) мнимую часть, в отличие от метода из настоящей статьи.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С ростом потерь в измеряемом материале разработанный метод превосходит по точностным характеристикам известные методы, при этом он аналогичен им для материалов с малыми потерями. Метод, разработанный в настоящей статье, может быть рекомендован к

применению для измерения спектров КДП материалов с потерями как в высокочастотном (сантиметровом) диапазоне, так и в низкочастотном (метровом) диапазоне.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 125013101211-4).

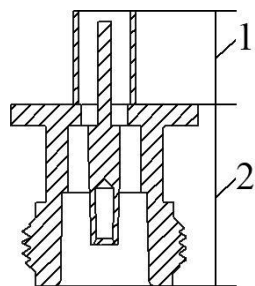
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bore T., Bhuyan H., Bittner T., Murgan V., Wagner N., Scheuermann A. // Meas. Sci. Technol. 2017. V. 29. № 1. P. 015602. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9407>
2. Журавлев В.А., Сусяев В.И., Журавлев А.В., Коровин Е.Ю. // Известия Вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 11. С. 40. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30626638>
[Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., Zhuravlev A.V., Korovin E.Yu. // Russ. Phys. J. 2018. V. 60. P. 1893. <https://doi.org/10.1007/s11182-018-1299-4>]
3. Брандт А.А. Исследования диэлектриков на сверхвысоких частотах. Москва: Физматгиз, 1963.
4. Gregory A.P., Clarke R.N. // Meas. Sci. Technol. 2005. V. 16. № 7. P. 1506. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/7/013>
5. Mriminal M. Galois theory and the abel-ruffini theorem. The University of Chicago Mathematics REU, 2019.
6. Бобров П.П., Беляева Т.А., Крошка Е.С., Родионова О.В. // Почвоведение. 2019. № 7. С. 859. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19050034>
[Bobrov P.P., Belyaeva T.A., Kroshka E.S., Rodionova O.V. // Eurasian Soil Science. 2019. V. 52. № 7. P. 822. <https://doi.org/10.1134/S106422931905003X>]
7. Arcone S.A., Boitnott G.E. // J. Appl. Geophys. 2012. V. 81. P. 97. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.005>.
8. Witula R., Słota D. // J. Math. Anal. Appl. 2010. V. 363. № 2. P. 639. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2009.09.056>.
9. Gregory A., Clarke R. Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 GHz. NPL Report MAT 23, Teddington, UK, 2012.
10. Carlin H. // IRE Trans. Circuit Theory. 1956. V. 3. № 2. P. 88. <https://doi.org/10.1109/TCT.1956.1086297>.

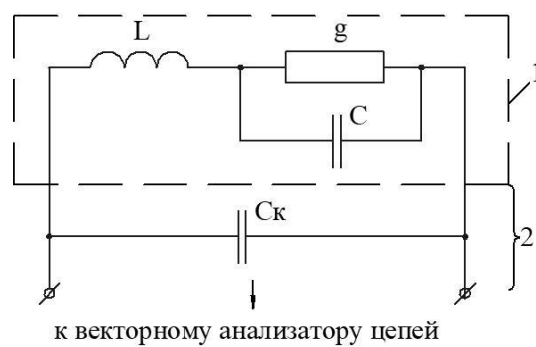
11. *Stogryn A.* // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1971. V. 19. № 8. P. 733.
<https://doi.org/10.1109/TMTT.1971.1127617>.
12. *Bobrov P.P., Kostychov Yu.A., Krivaltsevich S.V., Rodionova O.V.* // Russ. Phys. J. 2024. V. 67. № 8. P. 1213. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03243-9>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Сечение коаксиальной емкостной ИЯ (а) и ее эквивалентная схема (б) с выделенными рабочей областью 1 и переходной областью 2
- Рис. 2.** Графики частотной зависимости измеренных модуля 1, аргумента коэффициента отражения S_{11} от входа области измерений коаксиальной ячейки 2, заполненной изопропиловым спиртом 99% (а) и диметилсульфоксидом (б)
- Рис. 3.** Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей КДП для изопропилового спирта в коаксиальной ячейке, полученные согласно методу из настоящей статьи 1, методам приближения малых потерь и низкочастотного приближения (2 и 3 соответственно), а также в рамках модели Дебая 4. Область серого цвета отмечает диапазон приборной погрешности
- Рис. 4.** Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей КДП для диметилсульфоксида в коаксиальной ячейке, полученные согласно методу из настоящей статьи 1, методам приближения малых потерь и низкочастотного приближения (2 и 3 соответственно), а также в рамках модели Дебая 4. Область серого цвета отмечает диапазон приборной погрешности
- Рис. 5.** Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей КДП для раствора бентонитовой глины (с объемной влажностью 98.6%) в ячейке на базе СПЛ, полученные согласно методу из настоящей статьи 1, методам низкочастотного приближения и приближения малых потерь (2 и 3 соответственно), а также в высокочастотным методом 4

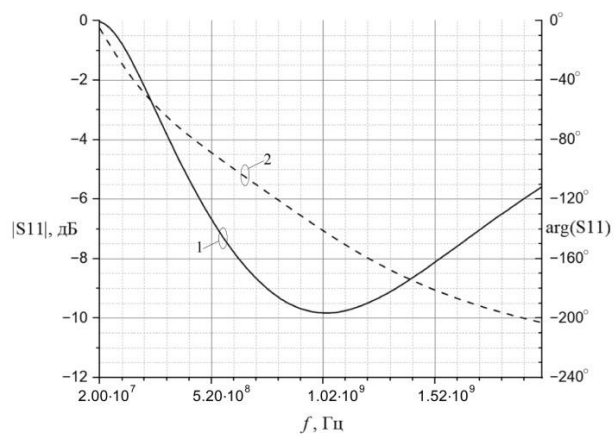


(a)

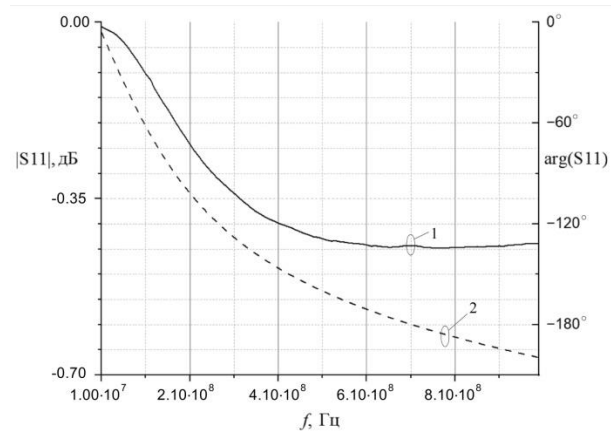


(б)

Рис. 1

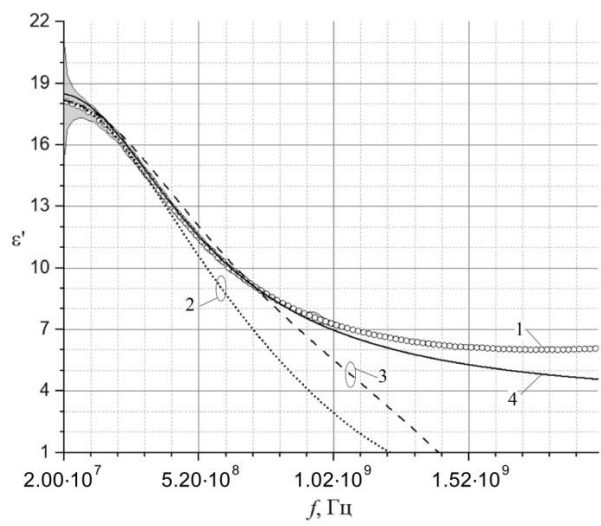


(a)

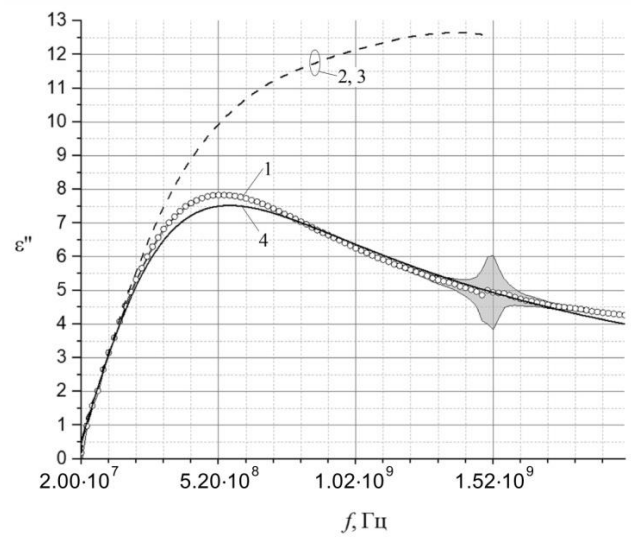


(б)

Рис. 2

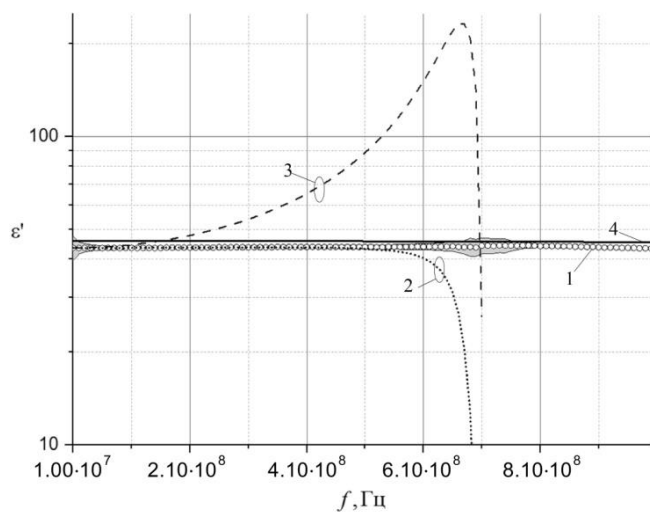


(а)

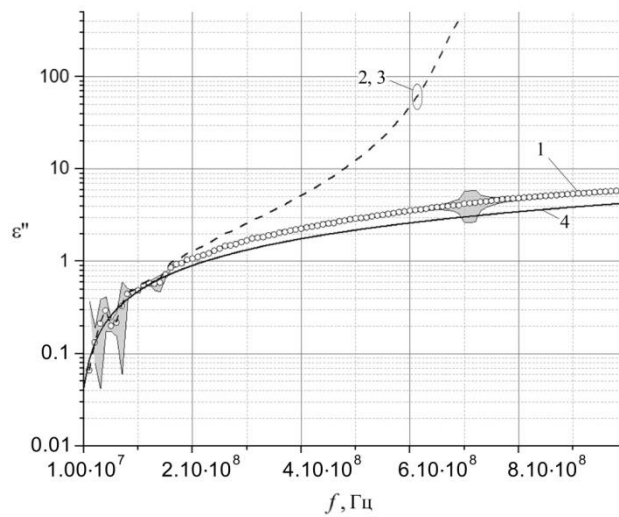


(б)

Рис. 3

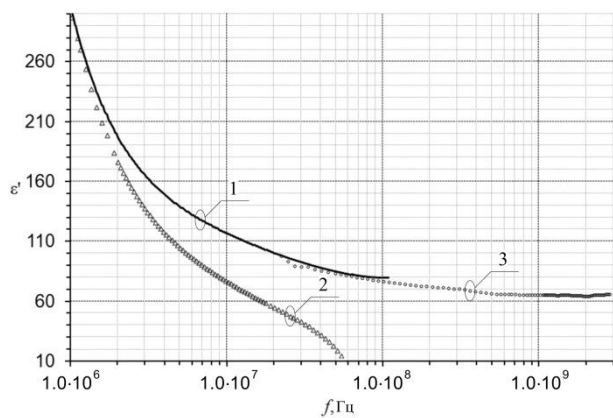


(a)

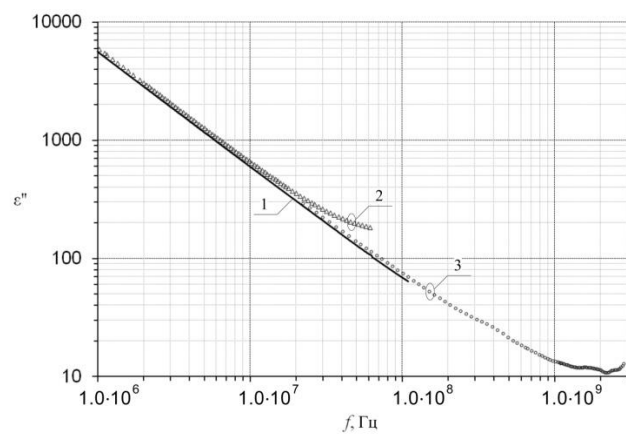


(б)

Рис. 4



(а)



(б)

Рис. 5