

Государственный первичный эталон единиц комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 10 Гц до 10 МГц ГЭТ 121—2015

О. О. АЛТАЕВ, В. Н. ЕГОРОВ, М. В. КАЩЕНКО, В. Л. МАСАЛОВ, Е. Ю. ТОКАРЕВА

Восточно-Сибирский филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, Иркутск, Россия,
e-mail: dep14@niiftri.irk.ru

Представлен состав Государственного первичного эталона единиц комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 10 Гц до 10 МГц. Описаны используемые в эталоне методы измерений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Приведены метрологические характеристики эталона и результаты измерений диэлектрических параметров эталонных мер.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, первичный эталон, эталонные меры.

A structure of the national primary permittivity unit standard of the frequency range from 10 Hz to 10 MHz is presented. The measurement methods for dielectric permittivity and tangent of dielectric loss are described. Metrological characteristics of the standard and measurement results of dielectric parameters of the standard reference specimens are given.

Key words: permittivity, dielectric loss tangent, primary standard, standard reference specimens.

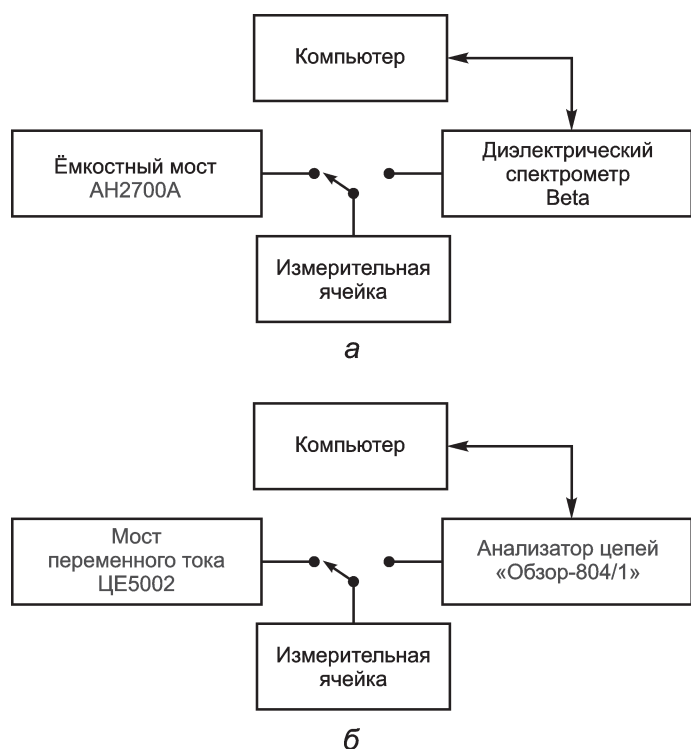
Диэлектрики широко применяют в устройствах и системах электроэнергетики и радиоэлектроники, телекоммуникаций, радиолокации, навигации, авиационной и ракетно-космической техники. Эти материалы в значительной степени определяют предельно достижимые характеристики устройств и систем в целом. Одной из важнейших величин, характеризующих влияние электромагнитного поля на диэлектрические материалы, является их комплексная диэлектрическая проницаемость $\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$. На практике обычно измеряют и используют относительную диэлектрическую проницаемость (вещественную часть комплексной величины) $\epsilon = \epsilon'$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$.

Диэлектрические измерения начали интенсивно развиваться с 30-х гг. прошлого столетия [1, 2]. Методы диэлектрических измерений применяют при изучении электрофизических свойств материалов в радиоэлектронике, кабельной промышленности, химии и других отраслях. Контроль ϵ , $\tan \delta$ необходим при производстве изоляционных и радиотехнических материалов, электронных компонентов, радиочастотных кабелей и других изделий [3]. Измерения диэлектрических параметров материалов в диапазоне частот 10 — 10⁷ Гц регламентированы рядом российских и международных стандартов [4—6]. Достоверные данные о диэлектрических свойствах веществ и материалов в твердом и жидком состояниях в широком диапазоне частот необходимы во многих отраслях промышленности и научных исследованиях для эффективного применения систем автоматизированного проектирования, при разработке стандартных образцов и стандартных справочных данных [7—9]. Существующий парк средств измерений диэлектрических параметров охватывает широкий спектр частот 10⁻⁵ — 10¹¹ Гц. Развитие диэлектрических

измерений требует совершенствования эталонной базы и системы метрологического обеспечения в этой области [10, 11].

Государственный специальный эталон единицы относительной диэлектрической проницаемости твердых и жидких диэлектриков в диапазоне частот 10 — 10⁷ Гц ГЭТ 121—80 был создан в Восточно-Сибирском филиале ВНИИФТРИ. Новые измерительные задачи и произошедшие изменения технических и метрологических характеристик средств измерений потребовали совершенствования эталона. В течение 2013—2015 гг. были проведены работы по совершенствованию ГЭТ 121—80. Было осуществлено аппаратное обновление и расширены функциональные возможности эталона в части воспроизведения единицы тангенса угла диэлектрических потерь.

В результате выполненных работ в 2015 г. утверждён усовершенствованный Государственный первичный эталон единиц комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 10 Гц до 10 МГц ГЭТ 121—2015, который воспроизводит и передает единицу комплексной диэлектрической проницаемости в следующих диапазонах: $\epsilon = 1 \dots 100$ для твердых и $\epsilon = 1 \dots 3$ для жидких диэлектриков; $\tan \delta = 2 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ для твердых и $5 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ для жидких диэлектриков. Диэлектрические измерения являются косвенными, при этом определяют параметры измерительных ячеек (ёмкость, резонансную частоту, добротность, диэлектрические потери, геометрические размеры электродов и межэлектродное расстояние), геометрические размеры образца твердого диэлектрика и рассчитывают диэлектрические параметры по указанным данным.



Структурные схемы эталонных установок ЭУ-1 (а) и ЭУ-2 (б)

Состав ГЭТ 121—2015. В состав ГЭТ 121—2015 входят эталонные установки ЭУ-1 (10 Гц — 1 МГц), ЭУ-2 (1—10 МГц) и вспомогательное оборудование. На рисунке приведены структурные схемы эталонных установок ЭУ-1 и ЭУ-2. Установка ЭУ-1 содержит диэлектрический спектрометр Beta (High Performance Impedance Analyzer) для работы в диапазонах частот 10—50 Гц и 20 кГц — 1 МГц, прецизионный ёмкостный мост АН2700А для работы в диапазоне частот 50—20·10³ Гц, набор измерительных ячеек, меры электрической ёмкости и тангенса угла потерь. Установка ЭУ-2 состоит из измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения (анализатор цепей) «Обзор-804/1», моста переменного тока ЦЕ5002 и измерительной ячейки.

В составе эталона имеется также следующее оборудование:

средства измерений линейных размеров образцов диэлектриков — микроскоп инструментальный БМИ-1Ц, высокотомер Tesa, электронные цифровые индикаторы Vogel;

набор эталонных мер относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твёрдых и жидких диэлектриков;

вспомогательное оборудование — жидкостный и воздушный термостаты, вытяжной шкаф, вакуумный насос, измерители температуры и влажности.

Воспроизведение единиц ϵ , $\text{tg}\delta$ осуществляется на образцах диэлектриков (эталонных мерах), диэлектрические свойства которых отвечают ряду требований (однородность, стабильность свойств во времени и при изменении условий окружающей среды). Методы воспроизведения единиц зависят от диапазона частот и представлены в табл. 1.

На эталонной установке ЭУ-1 для образцов из стекла, ситалла и керамики применяют держатель диэлектрических образцов ДДО-1Э, для образцов из полимерных материалов — измерительные ячейки ИЯИТ-4Э и ИЯТ-2Э, для жидких диэлектриков — измерительную ячейку ЯДС-2.

В основу воспроизведения и передачи единицы ϵ эталонных мер (в комплекте с держателем ДДО-1Э) положен ёмкостный метод с применением трёхэлектродной системы, выполненной непосредственно на эталонной мере. Для реализации метода плоские поверхности дисковых образцов эталонных мер металлизуются методом напыления слоя меди в вакууме. На одной металлизированной поверхности методом фотолитографии наносится межэлектродный зазор, образующий на этой стороне образца систему из измерительного и охранного электродов для исключения краевого эффекта.

Воспроизведение единицы ϵ основано на измерении ёмкости эталонной меры твёрдого диэлектрика и расчёте ёмкости данной электродной системы при $\epsilon = 1$. Далее в формулах ёмкость приводится в пикофарадах, а линейные размеры эталонных мер и электродов измерительной ячейки — в

Таблица 1

Методы воспроизведения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь

Эталонная установка, рабочий диапазон	Воспроизводимая единица и её значение	Метод воспроизведения
ЭУ-1 10 Гц — 1 МГц	$\epsilon = 1 \dots 100$ $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	Контактный ёмкостный с применением трёхэлектродной системы, нанесённой на эталонную меру твёрдого диэлектрика и использованием трёх- или пятизажимных схем измерения. Воспроизведение единицы ϵ полимеров проводится иммерсионным методом. Воспроизведение единицы $\text{tg}\delta$ твёрдых диэлектриков осуществляется контактным методом с сохранением ёмкости измерительной ячейки
	$\epsilon = 1 \dots 3$ $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$	Воспроизведение единиц ϵ , $\text{tg}\delta$ эталонных мер жидких диэлектриков основано на измерениях ёмкости и потерь измерительной ячейки без жидкости и с жидкостью
ЭУ-2 1—10 МГц	$\epsilon = 1 \dots 100$ $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	Воспроизведение единицы ϵ основано на измерениях резонансных частот колебательного контура с мерой и без неё в ёмкостной измерительной ячейке. Используются контактный и бесконтактный методы. Воспроизведение единицы $\text{tg}\delta$ основано на измерении добротности измерительной ячейки с мерой и без неё с восстановленной резонансной частотой

миллиметрах. Диэлектрическая проницаемость определяется как

$$\varepsilon = C_\varepsilon / C_0; \quad (1)$$

$$C_0 = \varepsilon_0 S_{\text{эфф}} / t; \quad (2)$$

$$S_{\text{эфф}} = \pi D_{\text{эфф}}^2 / 4, \quad (3)$$

где C_ε — ёмкость между измерительным и потенциальными электродами эталонной меры; C_0 — расчётная ёмкость той же системы электродов в вакууме при $\varepsilon = 1$; $\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-15}$ пФ/мм — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; $S_{\text{эфф}}$ — эффективная площадь измерительного электрода; $D_{\text{эфф}} = D_{\text{изм}} + g$ — эффективный диаметр измерительного электрода, выполненного на мере; $D_{\text{изм}}$ — диаметр измерительного электрода; g — расстояние между измерительным и охранным электродами; t — толщина меры.

После подстановки (3) в (2) расчётная формула примет вид

$$C_0 = AD^2/t, \quad (4)$$

где $A = \varepsilon_0 \pi / 4 = 6,9540628 \cdot 10^{-3}$ пФ/мм; $D = D_{\text{эфф}}$.

Диэлектрическую проницаемость эталонных мер из полимерных материалов измеряют иммерсионным методом и рассчитывают как [12]:

$$\varepsilon = \frac{C_3/C_1 + C_3/C_4 - C_3/C_2 - 1}{C_3/C_4 - C_1/C_2} \varepsilon_B,$$

где C_1, C_2 — ёмкости измерительной ячейки с воздушным заполнением без эталонной меры и с мерой, соответственно; C_3, C_4 — ёмкости измерительной ячейки с иммерсионной средой без меры и с мерой, соответственно; ε_B — диэлектрическая проницаемость воздуха в условиях измерения.

Тангенс угла диэлектрических потерь эталонных мер твёрдых диэлектриков измеряют с использованием измерительной ячейки ИЯТ-2Э контактным методом с сохранением ёмкости. Определение $\text{tg} \delta$ меры данным методом основано на измерениях $C_1, \text{tg} \delta_1$ ячейки с мерой и $\text{tg} \delta_2$ ячейки без меры с восстановленной ёмкостью C_1 . Тангенс угла диэлектрических потерь меры вычисляют по формуле

$$\text{tg} \delta = C_1 (\text{tg} \delta_1 - \text{tg} \delta_2) / C_2,$$

где C_2 — расчётная ёмкость плоского конденсатора, заполненного мерой диаметром D , толщиной t , проницаемостью ε :

$$C_2 = \varepsilon AD^2/t. \quad (5)$$

Измерения $\varepsilon, \text{tg} \delta$ жидких диэлектриков проводят ёмкостным методом на эталонной установке ЭУ-1 в комплекте с ячейкой ЯДС-2. Конструкция измерительной ячейки и заполнение всего её объёма исследуемой жидкостью позволяют полностью исключить влияние краевых ёмкостей. Диэлектрическую проницаемость жидких диэлектриков определяют по формуле (1), в которой C_ε, C_0 — ёмкости ячейки с

жидкостью и без неё. Тангенс угла диэлектрических потерь жидких диэлектриков находят из выражения

$$\text{tg} \delta = \text{tg} \delta_1 - C_0 \text{tg} \delta_2 / C_\varepsilon,$$

где $\text{tg} \delta_1, \text{tg} \delta_2$ — тангенсы угла потерь ячейки с жидкостью и без неё.

В диапазоне частот 1—10 МГц измерения выполняют на эталонной установке ЭУ-2 с использованием ячейки ИЯРТ-3Э. Измерение ε эталонных мер твёрдых диэлектриков проводят контактным или бесконтактным резонансными методами с сохранением расстояния между электродами измерительной ячейки [13]. В контактном методе расстояние между электродами ячейки с образцом и без него сохраняется равным толщине t меры. В бесконтактном методе сохраняется расстояние $h > t$ с зазором над образцом $h - t$. Ёмкостная измерительная ячейка является частью колебательного контура. Методы основаны на измерении резонансных частот f_1, f_2 контура с эталонной мерой толщиной t в ячейке и контура с ячейкой без меры при том же расстоянии t или h между электродами.

Контактный метод применяют для мер, диэлектрическая проницаемость которых $\varepsilon \leq 10$, в этом случае $\varepsilon = \Delta C / C_0 + \varepsilon_B$, где $\Delta C = C_1 - C_2$ — изменение резонансной ёмкости ячейки; C_i — резонансные ёмкости ячейки с мерой ($i = 1$) и без неё ($i = 2$), определяемые по формуле

$$C_i = B / (f_i^2 L); \quad (6)$$

$B = 10^6 / (2\pi)^2 = 25330,3$ пФ·мкГн·МГц²; f_i — резонансная частота ячейки с мерой ($i = 1$) и без неё при восстановленном расстоянии между электродами ячейки ($i = 2$); L — индуктивность колебательного контура, устанавливаемая при калибровке ячейки.

Для мер с $\varepsilon > 10$ используют бесконтактный метод и вычисления производят по формуле (1), где C_0 — ёмкость меры, рассчитываемая по (4). Ёмкости меры C_ε , воздушного зазора C_4 и пустой ячейки C_5 определяют как

$$C_\varepsilon = C_4(C_5 + \Delta C) / (C_4 - C_5 - \Delta C);$$

$$C_4 = AD^2 \varepsilon_B / (h - t); C_5 = AD^2 \varepsilon_B / h.$$

Тангенс угла диэлектрических потерь меры вычисляют как

$$\text{tg} \delta = C_1(Q_2 - Q_1) / (C_2 Q_2 Q_1),$$

где C_1 — полная резонансная ёмкость, определяемая по (6) на резонансной частоте f ; C_2 — ёмкость меры из (5); Q_1, Q_2 — добротности ячейки с мерой и без неё на частоте f .

Результаты измерений обрабатывают в соответствии с требованиями стандартов [14, 15]. В табл. 2 приведены результаты расчётов диэлектрических параметров эталонных мер и неопределённостей измерений, где СКО — среднее квадратическое отклонение, НСП — неисключённая систематическая погрешность, u_A, u_B — неопределённости по типам А, В, u_c — суммарная стандартная неопределённость.

Таблица 2

Результаты расчётов диэлектрических параметров эталонных мер и неопределённостей измерений

Название эталонной меры, материал, толщина t , частота f , средние значения $\bar{\epsilon}$ и $\overline{\text{tg} \delta}$	ϵ					$\text{tg} \delta$				
	СКО	НСП	u_A	u_B	u_c	СКО	НСП	u_A	u_B	u_c
ЭМ-КВ-50/5, кварц КВ; $t = 4,907$ мм; $f = 50$ Гц; $\bar{\epsilon} = 3,8145$; $\overline{\text{tg} \delta} = 3,3 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$
ЭМ-КВ-50/5, кварц КВ; $t = 4,907$ мм; $f = 1$ кГц; $\bar{\epsilon} = 3,8144$; $\overline{\text{tg} \delta} = 3,9 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$
ЭМ-К75-50/5, керамика К75; $t = 4,952$ мм; $f = 1$ кГц; $\bar{\epsilon} = 77,46$; $\overline{\text{tg} \delta} = 5,4 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
ЭМ-К8-50/5, стекло К8; $t = 4,906$ мм; $f = 50$ Гц; $\bar{\epsilon} = 6,724$; $\overline{\text{tg} \delta} = 7,2 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$
ЭМ-К8-50/5, стекло К8; $t = 4,906$ мм; $f = 1$ кГц; $\bar{\epsilon} = 6,646$; $\overline{\text{tg} \delta} = 4,6 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
ЭМ-К100-50/5, керамика К100; $t = 0,9916$ мм; $f = 1$ кГц; $\bar{\epsilon} = 107,75$; $\overline{\text{tg} \delta} = 3,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
ЭМ-К8-50/2, стекло оптическое К8; $t = 1,746$ мм; $f = 0,89350744$ МГц; $\bar{\epsilon} = 6,604$; $\overline{\text{tg} \delta} = 2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3

Метрологические характеристики эталона ГЭТ 121—2015

Характеристика	Диэлектрики	
	твёрдые	жидкие
Диапазон ϵ	1—100	1—3
СКО ϵ , не более	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
НСП	$4 \cdot 10^{-4}$ — $7 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$ — $3 \cdot 10^{-4}$
$u_{A\epsilon}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$u_{B\epsilon}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$ — $2,9 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$ — $1,2 \cdot 10^{-4}$
$u_{c\epsilon}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$ — $4,2 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$ — $1,3 \cdot 10^{-4}$
$U_{\epsilon} (k = 2)$	$6,8 \cdot 10^{-4}$ — $8,4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$ — $2,6 \cdot 10^{-4}$
Диапазон $\text{tg} \delta$	$2 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^{-3}$
СКО $\text{tg} \delta$	$1 \cdot 10^{-3}$ — $5 \cdot 10^{-2}$	
НСП $\text{tg} \delta$	$3 \cdot 10^{-3}$ — $3 \cdot 10^{-1}$	
$u_{A\text{tg} \delta}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$ — $5,0 \cdot 10^{-2}$	
$u_{B\text{tg} \delta}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$ — $1,2 \cdot 10^{-1}$	
$u_{c\text{tg} \delta}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$ — $1,3 \cdot 10^{-1}$	
$U_{\text{tg} \delta} (k = 2)$	$3,2 \cdot 10^{-3}$ — $2,6 \cdot 10^{-1}$	

Анализ показал, что для данных методов и аппаратуры усовершенствованный ГЭТ 121—2015 обеспечивает воспроизведение и передачу единиц и имеет следующие метрологические характеристики (табл. 3) (U — расширенная неопределённость).

Заключение. ГЭТ 121—2015 имеет улучшенные метрологические характеристики и расширенные измерительные возможности, включая воспроизведение единицы тангенса угла диэлектрических потерь. Разработаны и изготовлены измерительные ячейки новых типов. Эталон оснащён современными высокоточными измерительными приборами. По своим характеристикам ГЭТ 121—2015 не уступает зарубежным аналогам. Внедрение эталона и реализация поверочной схемы обеспечат удовлетворение современных и перспективных потребностей высокотехнологичных предприятий страны в области диэлектрических измерений и их единство.

Л и т е р а т у р а

1. **Эмме Ф.** Диэлектрические измерения. М.: Химия, 1967.
2. **Брандт А. А.** Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1963.
3. **Казарновский Д. М., Яманов С. А.** Радиотехнические материалы. М.: Высшая школа, 1967.
4. **ГОСТ 22372—77.** Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц.
5. **ГОСТ 6581—75.** Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний.
6. **ASTM D 150—98** (Reapproved 2004). Методы определения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь твёрдых электроизоляционных материалов при переменном токе.
7. **ГСССД 33—82.** Кварцевое стекло КУ, КВ, КИ; оптическая керамика КО-1; фториды кальция, магния, бария; хлориды калия и натрия; окись алюминия. Диэлектрическая проницаемость при температуре 293 К в частотном диапазоне от 10^{-1} до 10^{11} Гц. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости.
8. **ГСССД 24—81.** Пентан, гексан, гептан, октан, нонан, бензол, сероуглерод, четырёххлористый углерод, циклогексан. Диэлектрическая проницаемость и её температурный коэффициент в диапазоне частот от 0,1 до 10^{11} Гц при температурах от 273 до 333 К.
9. **ГСССД 178—96.** Оптические стекла ЛК 105, К8, ТК 21. Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь при температуре 293 К в частотном диапазоне от 10^{-1} до 10^6 Гц.
10. **Гудков О. И., Егоров В. Н., Кащенко М. В.** Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения диэлектрических измерений // Измерительная техника. 1994. № 12. С. 34—40.
11. **Егоров В. Н., Масалов В. Л., Кащенко М. В., Токарева Е. Ю.** Концепция развития метрологического обеспечения в области диэлектрических измерений // Известия вузов. Физика. 2010. № 9/2. С. 207—210.
12. **Andeen C., Fontantlla J., Shuele D.** Accurate determination of dielectric constant by the method of substitution // Rev. Sci. Instrum. 1970. V. 41. P. 1573.
13. **Lynch A. C.** Measurements of the dielectric properties of low-loss materials // Proc. IEE. 1965. V. 112. N. 2. P. 426—431.
14. **ГОСТ 8.381—2009 ГСИ.** Эталоны. Способы выражения точности.
15. **ГОСТ Р 54500.3—2011.** Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения.

Дата принятия: 06.10.2016.

