

Государственный первичный эталон единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей в диапазоне частот от 1 МГц до 18 ГГц

*Н.М. Карих, канд. техн. наук, В.Ф. Матвейчук, канд. техн. наук,
А.В. Серов, С.Н. Сибирцев, Н.Н. Черноусова, канд. техн. наук*

В октябре 2009 года приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии утвержден новый Государственный первичный эталон единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей в диапазоне частот от 1 МГц до 18 ГГц. Развитие электронного приборостроения и микроэлектроники, радиолокации и средств связи, телевидения и информационно-телекоммуникационных систем в существенной степени зависит от метрологического обеспечения технологий производства новых перспективных материалов для ВЧ и СВЧ диапазонов.

В настоящее время перед промышленностью стоит задача разработки новых радиотехнических материалов, а также методов и средств измерений относительной комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов в широком диапазоне частот вплоть до 100 ГГц.

Ряд ведущих предприятий России, среди которых концерн Алмаз-Антей, ОАО «Гириконд», ОКБ Кабельной промышленности, ЦКБ Радиоматериалов, научно-производственная фирма «Микран» и др., поставили перед ФГУП «СНИИМ» и Ростехрегулированием

задачу расширения пределов воспроизводимых и передаваемых единиц относительной диэлектрической и магнитной проницаемости в диапазон частот до 20 ГГц и обеспечения единства измерений электромагнитных свойств материалов на ВЧ и СВЧ.

Эти предприятия разрабатывают новые современные материалы в широком диапазоне электромагнитных свойств, различные элементы и устройства СВЧ техники, в том числе и в оборонном комплексе. Некоторые материалы и изделия на их основе представлены на рис. 1.

Для всех этих элементов электромагнитные свойства материалов и устройства должны измеряться и контролироваться с высокой степенью точности. Ключевую роль при этих разработках играют методы измерения электромагнитных свойств материалов на высоких и сверхвысоких частотах при различных внешних воздействиях. Оборудование для испытаний электронной компонентной базы стратегически значимых для национальной безопасности объектов также нуждается в метрологическом обеспечении.



Рис.1. Диэлектрические резонаторы, устройства селекции, фильтры, планарные конденсаторы, подложки и другие изделия

Отсутствие метрологического обеспечения измерений электромагнитных свойств радиоматериалов в России в диапазоне частот от 10 до 20 ГГц, является сдерживающим фактором отечественного приборостроения, в том числе и в оборонном комплексе.

ФГУП «СНИИМ» в соответствии с Приказом Госстандарта является головной организацией в области обеспечения единства измерений электромагнитных свойств материалов на ВЧ и СВЧ. В 2006 году Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии была поставлена работа по созданию Государственного первичного эталона единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей в диапазоне частот от 1 МГц до 18 ГГц для обеспечения потребностей промышленности в метрологическом обеспечении разработки, производства, как материалов, так и изделий на их основе. При создании эталона использованы научные разработки, полученные по выполненным в институте договорам с различными предприятиями России. Максимально использован зарубежный опыт ведущих лабораторий мира NIST и NPL, а также рекомендации Международных организаций, в частности, Международной электротехнической комиссии (МЭК) по методам измерений [1] и МБМВ в части оценки стандартных неопределенностей результатов измерений [2].

Государственный первичный эталон единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей ГЭТ 174-2009 предназначен для воспроизведения, хранения единиц относительных диэлектрической, магнитной проницаемостей и тангенса угла диэлектрических и магнитных потерь в диапазоне частот от 1 МГц до 18 ГГц и передачи единиц с помощью эталонов

средствам измерений, применяемым в производственной и научной сферах экономики с целью обеспечения единства измерений в стране.

Государственный первичный эталон единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей представляет собой комплекс средств измерений, в состав которого входят:

- эталонная установка для воспроизведения единиц относительной магнитной проницаемости (μ') и тангенса угла магнитных потерь ($tg\delta_\mu$) в диапазоне частот от 1 до 200 МГц, ЭУ — 1;
- эталонная установка для воспроизведения единиц относительной диэлектрической проницаемости (ϵ') в диапазоне частот от 1 до 200 МГц, ЭУ — 2;
- эталонная установка для воспроизведения единиц относительных диэлектрической (ϵ') и магнитной (μ') проницаемостей и тангенса угла диэлектрических ($tg\delta_\epsilon$) и магнитных ($tg\delta_\mu$) потерь в диапазоне частот от 600 МГц до 4 ГГц, ЭУ — 3;
- эталонная установка для воспроизведения единиц относительной диэлектрической проницаемости (ϵ') и тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta_\epsilon$) в диапазоне частот от 200 МГц до 2 ГГц, ЭУ — 4;

- эталонная установка для воспроизведения единиц относительной диэлектрической проницаемости (ϵ') и тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta_\epsilon$) в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц (на основе конструкции радиального волновода), ЭУ — 5;

- эталонная установка для воспроизведения единиц относительной диэлектрической проницаемости (ϵ') и тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta_\epsilon$) в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц (на основе конструкции круглого волновода), ЭУ — 6;

- меры единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей и тангенса угла диэлектрических и магнитной потерь;

- программное обеспечение для эталонных установок.

Обобщенная структурная схема эталона представлена на рис. 2.

Эталонная установка ЭУ-1 (рис. 3) воспроизводит единицы относительной магнитной проницаемости от 1,5 до 100 и тангенса угла магнитных потерь от $1 \cdot 10^{-3}$ до 1 в диапазоне частот от 1 до 200 МГц. Компаратор ЭУ-1 выполнен по схеме двойного Т-образного моста. Особенности Т-схем является возможность включения источника

Рис. 2. Структурная схема эталона



ЭТАЛОН

тока и нулевого индикатора так, что они имеют общую заземленную точку. В этом случае емкости и проводимости утечек, существующие между сопротивлениями и экранами или между экранами и землей, включены параллельно и вход генератора не шунтирует отдельные участки схемы. Существенным обстоятельством является и то, что один из полюсов измеряемого сопротивления (проводимости) можно подключить к заземленной точке. Это дает возможность обеспечить высокую точность измерения на высоких частотах. Т-схемы работают по принципу резонансных схем, поэтому они частотно зависимы, что определяет дополнительные требования к частотной стабильности генераторов. Отсчетными элементами являются переменные конденсаторы, как по реактивной, так и активной составляющей измеряемой проводимости.

Для воспроизведения единиц относительной магнитной проницаемости от 1,5 до 100 разработаны десять мер, выполненных в виде расчетных короткозамкнутых отрезков коаксиальной линий различной длины.

В основу метода воспроизведения единиц магнитной проницаемости по-



Рис.3. Эталонная установка ЭУ-1

ложены волновые свойства воздушных коаксиальных линий.

Входное сопротивление короткозамкнутого отрезка коаксиальной линии Z связано с магнитной проницаемостью заполняющей среды μ' и длиной l отрезка соотношением:

$$Z = Z_c \operatorname{th} \gamma_c l = Z_o \sqrt{\frac{\mu_o \tilde{\mu}}{\epsilon_o \tilde{\epsilon}}} \operatorname{th} \sqrt{\mu_o \epsilon_o \tilde{\mu} \tilde{\epsilon}} l. \quad (1)$$

Искомое расчетное значение единицы относительной магнитной проницаемости определяется по формуле [3]:

$$\mu' = \frac{Z_o \operatorname{tg} \beta l}{\omega L_o}. \quad (2)$$

Тангенс угла магнитных потерь воспроизводится компаратором, через его постоянную K , которую определяют при аттестации компаратора. На клеммах компаратора определяют полную проводимость

$$Y_{ex} = g_{ex} + j b_{ex} \quad g_{ex} = K \Delta C_{rf}$$

$$b_{ex} = \omega \Delta C_{e'} \operatorname{tg} \delta = \frac{g_{ex}}{b_{ex}} = \frac{\mu''}{\mu'}. \quad (3)$$

Эталонная установка ЭУ-2 (рис. 4) воспроизводит единицы относительной диэлектрической проницаемости от 1,5 до 20 в диапазоне частот от 1 до 200 МГц. Компаратор ЭУ-2 выполнен по резонансной схеме. Воспроизведение единицы относительной диэлектрической проницаемости ϵ' производится расчетными мерами, выполненными в виде разомкнутых отрезков коаксиальной линии с воздушным заполнением различной длины. Метод воспроизведения основан на волновых свойствах коаксиальной линии.

Входное сопротивление разомкнутого отрезка линии, заполненного воздухом, выражается как



Рис.4. Эталонная установка ЭУ-2

$$Z = \frac{jZ_0}{\text{tg}\beta_0 \cdot l_{\text{ко}}} \quad (4)$$

Воспроизводимое значение диэлектрической проницаемости определяется частотой и длиной коаксиального отрезка $l_{\text{ко}}$.

$$\epsilon_{\text{ко}} = \frac{\text{tg} \frac{2\pi f}{c} \cdot l_{\text{ко}}}{120C_0 \pi f \ln \frac{D}{d}} \quad (5)$$

Эталонная установка ЭУ-3 (рис. 5) воспроизводит единицы относительных диэлектрической и магнитной

резонансной длины и добротности пустого резонатора — компаратора и при внесении в него меры. На основании решения электродинамической задачи получены измерительные уравнения, которые связывают воспроизводимые параметры ϵ' , μ' , $\text{tg}\delta_\epsilon$, $\text{tg}\delta_\mu$ с измеряемыми величинами — частотой электромагнитных колебаний, добротностью резонатора, геометрическими размерами резонатора и меры.

Эталонные меры представляют собой отрезки коаксиальной линии, заполненные воздухом, диэлектрическим (стекло кварцевое, корунд) и

ферромагнитным (ферроэпоксид) материалами.

Значения ϵ' , $\text{tg}\delta_\epsilon$ и μ' , $\text{tg}\delta_\mu$ воспроизводимые мерами, рассчитывают по формулам [3]

$$\sqrt{\frac{\mu'}{\epsilon'}} \text{tg}(k'_{\text{кв}} \sqrt{\mu' \epsilon'} \cdot h) - \text{tg} k'_{\text{кв}} (h - L_{\text{кв}}) = 0 \quad (6)$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon'}{\mu'}} \text{tg}(k'_{\text{кв}} \sqrt{\mu' \epsilon'} \cdot h) \cdot \text{tg} k'_{\text{кв}} (L_{\text{кв}} - h) - 1 = 0 \quad (7)$$

$$\text{tg}\delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon', \text{tg}\delta_\mu = \mu''/\mu' \quad (8)$$

Эталонная установка ЭУ-4 (рис. 6) воспроизводит единицы относительной диэлектрической проницаемости

Рис.5. Эталонная установка ЭУ-3



проницаемостей от 1,2 до 20, тангенса угла диэлектрических от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ и магнитных потерь от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ в диапазоне частот от 0,6 до 4,0 ГГц. В основу положен метод измерения параметров материалов в коаксиальном резонаторе переменной длины, при котором измеряемый образец помещается в разрыв внутреннего и внешнего проводников резонатора в максимум магнитной или электрической составляющих электромагнитного поля, так называемый метод «короткого замыкания» и «холостого хода». При этом измеряют изменения

Рис.6. Эталонная установка ЭУ-4



ЭТАЛОН

Рис.7. Эталонные установки ЭУ-5, ЭУ-6



от 1,2 до 30 и тангенса угла диэлектрических потерь от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ в диапазоне частот от 0,2 до 2,0 ГГц. Метод основан на использовании тороидального резонатора с частичным заполнением измерительной ячейки, в который введен дополнительный измерительный коаксиальный конденсатор. Измерительная ячейка представляет собой дисковый конденсатор, образованный кольцевой щелью во внутреннем электроде резонатора.

Весь частотный диапазон 0,2-2 ГГц разбит на три поддиапазона: 0,2-0,5 ГГц, 0,4-1,5 ГГц, 1,0-2,0 ГГц, для каждого из которых изготовлен резонатор.

При воспроизведении диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь проводится последовательно настройка резонатора в резонанс с мерой и без нее, определяется смещение максимума и изменение ширины резонансной кривой.

Меры единиц относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь выполнены в виде плоскопараллельных дисков из полиэтилена, пленки полиимидной и стеклотекстолита различных диаметров.

Диэлектрическую проницаемость определяют из решения трансцендентного уравнения [3]

$$\sqrt{\epsilon'} J_1(k_0 r \sqrt{\epsilon'}) / J_0(k_0 r \sqrt{\epsilon'}) = X1, \quad (9)$$

$$\text{где } X1 = \frac{R_{0B} (R_{0A} h / L - 8k_0 L^2 C / \pi^3 h)}{R_{0A} (H_2 - H_1 + h) / L - 8k_0 L^2 (A1 / H_2 - B1 / h) / \pi^3}$$

Эталонные установки ЭУ-5, ЭУ-6 (рис. 7) воспроизводят единицы относительной диэлектрической проницаемости от 1,2 до 400,0 и тангенса угла диэлектрических потерь от $5 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц.

В основу эталонной установки ЭУ-5 положен резонансный метод согласно стандарту МЭК, при котором используется электромагнитная система, состоящая из запердельного радиального волновода, в который по оси помещается мера диэлектрической проницаемости, и подвижных элементов возбуждения электромагнитных колебаний H_{01n} типа.

Решение электродинамической задачи позволяет получить расчетные соотношения для электромагнитной системы, которые связывают параметры ϵ' и $tg\delta$ с измеряемыми величинами — частотой, добротностью

электромагнитных колебаний и геометрическими размерами меры относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь меры рассчитывают из решения трансцендентного уравнения [4, 5, 6]

$$p_B J_1(p_A R) H_0^{(2)}(p_B R) - p_A J_0(p_A R) H_1^{(2)}(p_B R) = 0, \quad (10)$$

$$\text{где } p_A = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - (m\pi / L)^2};$$

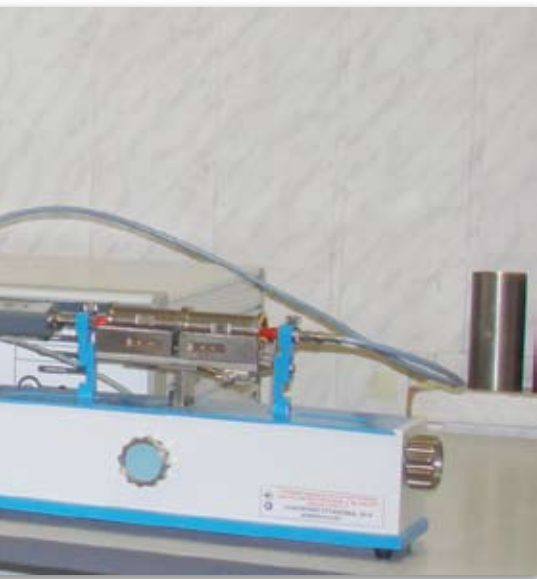
$$p_B = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - (m\pi / L)^2}.$$

$$tg\delta = \frac{1}{Q_0} \left[1 + \frac{W}{\epsilon} \right] -$$

$$- \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \frac{4\pi^2 m^2}{\omega^3 \mu_0^2 \epsilon \epsilon_0 L^3} (1+W), \quad (11)$$

$$\text{где } W = - \frac{J_1^2(p_A R)}{H_1^2(p_B R)} \frac{H_1^2(p_B R) - H_0(p_B R) H_2(p_B R)}{J_1^2(p_A R) - J_0(p_A R) J_2(p_A R)}$$

В основу эталонной установки ЭУ-6 положен резонансный метод, при котором используется электромагнитная система, состоящая из отрезка круглого запердельного волновода, внутрь которого помещается мера диэлектрической проницаемости такого же диа-



метра. В этой системе возбуждаются осесимметричные электромагнитные колебания H_{0n} типов. Использование H_{0n} типов колебаний обусловлено структурой компонент электромагнитных полей, характеризующейся отсутствием нормальных составляющих электрического поля на границе волновод-образец, что исключает необходимость металлизации поверхности меры, прилегающей к стенкам волновода. Для перекрытия диапазона частот от 1 до 18 ГГц рассчитано семь отрезков волноводов различного диаметра и длины (рис. 8).



Рис. 8. Отрезки волноводов

Диэлектрическую проницаемость ϵ' и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ мер рассчитывают из решения трансцендентного уравнения (12) и уравнения (13)

$$(\gamma_{n\epsilon} + \gamma_{n0}) = (\gamma_{n\epsilon} - \gamma_{n0}) \cdot e^{-i\gamma_{n\epsilon} \cdot L}, \quad (12)$$

где $\gamma_{n\epsilon} = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \epsilon' - p_n^2}$, $\gamma_{n0} = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - p_n^2}$.

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{Q_0} \left[1 + \frac{G}{\epsilon'} \right] -$$

$$\sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2\sigma}} \cdot \frac{2p_n^2}{R \cdot \omega^3 \mu_0^2 \epsilon_0 \epsilon'} [1 + G], \quad (13)$$

$$\text{где } G = \frac{2i\gamma_{n\epsilon}^2}{\gamma_{n0} [L(\gamma_{n\epsilon}^2 - \gamma_{n0}^2) - 2i\gamma_{n0}]}$$

Меры единиц относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь выполнены в виде цилиндров из керамики Д-10, В-40, В-120, BSM и фторопласта-4 различных геометрических размеров.

Меры единиц относительных диэлектрической, магнитной проницаемостей и тангенса угла диэлектрических и магнитных потерь Государственного эталона представлены на рис. 9.

Одной из основных метрологических характеристик эталона является погрешность воспроизведения, выраженная в виде среднего квадратического отклонения и неисключенной систематической погрешности. Эта погрешность определяется суммированием погрешностей результатов прямых и косвенных измерений характеристик, входящих в расчетные соотношения диэлектрической, магнитной проницаемости и тангенсов угла диэлектрических и магнитных потерь.

Оценка неисключенной систематической погрешности проводилась на основании анализа источников этой погрешности расчетным путем и представлена в правилах хранения и применения каждой эталонной установки.

Обобщенные среднеквадратические отклонения, неисключенные систематические погрешности и неопределенности Государственного эталона единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей приведены в табл. 1.

Государственный первичный эталон единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей в



Рис. 9. Меры единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей и тангенса угла диэлектрических и магнитных потерь

Табл. 1. Метрологические характеристики эталона

Наименование характеристики	Значение	
	Среднее квадратическое отклонение	ϵ', μ'
$tg\delta_\epsilon, tg\delta_\mu$		0,01 — 0,05
Неисключенная систематическая погрешность	ϵ', μ'	0,0006 — 0,006
	$tg\delta_\epsilon, tg\delta_\mu$	0,03 — 0,1
Стандартная неопределенность, оцененная по типу А	ϵ', μ'	0,0002 — 0,002
	$tg\delta_\epsilon, tg\delta_\mu$	0,01 — 0,05
Стандартная неопределенность, оцененная по типу В	ϵ', μ'	0,0003 — 0,003
	$tg\delta_\epsilon, tg\delta_\mu$	0,01 — 0,04
Суммарная стандартная неопределенность	ϵ', μ'	0,0004 — 0,004
	$tg\delta_\epsilon, tg\delta_\mu$	0,02 — 0,06
Расширенная неопределенность	ϵ', μ'	0,001 — 0,01
	$tg\delta_\epsilon, tg\delta_\mu$	0,05 — 0,15

диапазон частот от 1 МГц до 18 ГГц производит следующие единицы:

- диэлектрической проницаемости ϵ' → от 1,2 до 400,0
- магнитной проницаемости μ' → от 1,5 до 100,0
- тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta_\epsilon$ → от $5 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$
- тангенса угла магнитных потерь $tg\delta_\mu$ → от $1 \cdot 10^{-3}$ до 1

Государственный эталон единиц относительных диэлектрической и магнитной проницаемости возглавляет государственную поверочную

схему, которая обеспечивает прослеживаемость передачи единиц от Государственного эталона средствам измерений через эталоны и стандартные образцы. Поверочная схема обеспечена комплексом стандартных образцов, имеющих статус государственных и межгосударственных.

Парк средств измерений комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости в настоящее время в России оценочно составляет более тысячи штук.

Их основное назначение и области применения:

- в оборонном комплексе — элементная база электронных систем и комплексов, защита и маскировка объектов;

- в науке и технологии — при разработке новых материалов с уникальными электромагнитными свойствами для промышленного применения, а также изделий на их основе;

- в метрологии и приборостроении — при создании эталонов и средств измерений электромагнитных величин;

- в системах связи и телекоммуникациях — обеспечение качества и надежности как самих устройств, так их параметров.

Ввод в действие эталона и государственной поверочной схемы позволяет повысить точность определения электромагнитных параметров радиотехнических материалов. Главным показателем эффективности внедрения эталона является обеспечение задач промышленной метрологии: расширение парка поверяемых средств измерений, повышение точности измерений, снижение брака выпускаемой продукции. Благодаря этому обеспечена потребность промышленности и оборонного комплекса.

Литература

1 IEC 61338-1-3. Waveguide type dielectric resonators. Pt. 1-3: General information and test conditions — Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at microwave frequency. — 1999.

2 «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement» published by the International Organisation for Standardisation (ISO), Geneva, Switzerland, ISBN 92-67-10188-9, 1st edition 1993.

3 Матвейчук В.Ф., Сибирцев С.Н., Черноусова Н.Н., Карих Н.М. Метрологическое обеспечение измерений электромагнитных свойств радиотехнических материалов на ВЧ и СВЧ. Измерительная техника. 2004. №8. С.24—29.

4 Матвейчук В.Ф., Сибирцев С.Н., Карих Н.М., Серов А.В. // Актуальные проблемы электронного приборостроения, АПЭП-2004: Тр. VI Международной конференции — Новосибирск. — 2004. — Т. 3. — С. 175—182.

5 Матвейчук В.Ф., Сибирцев С.Н., Карих Н.М. Измерения электромагнитных свойств материалов с низкими потерями на СВЧ методами диэлектрического резонатора. // Измерительная техника. — 2004. — № 8. — С. 30—35.

6 МИ 00173-2000. ГСИ. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь материалов с высокой проницаемостью в диапазоне частот от 0.5 до 18 ГГц. Методика выполнения измерений методом волноводно-диэлектрического резонатора.