О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ ВЕЩЕСТВА МЕТОДОМ СПИРАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

К. П. Яцук

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] был описан резонаторный вариант метода спирального резонатора для измерения диэлектрических проницаемостей вещества на сверхвысоких частотах. Представляет интерес рассмотрение вопроса о погрешностях указанного метода. Можно сказать, что погрешности метода обусловлены двумя причинами: погрешностями измерений и приближениями, допущенными при выводе формул. Анализ формулы, по которой рассчитывается ε, позволит определить величину погрешностей измерений и указать пути уменьшения их. Правильность принятых предположений может быть оценена путем проверки формулы на образцах с известным значением диэлектрических проницаемостей вещества.

§ 1. О погрешностях формулы для измерения ε твердых образцов

Как показано в работе [1], формула для определения ε образцов, выполненных в виде тонких стержней и расположенных по оси системы «спираль в резонаторе», имеет вид

$$\varepsilon = \frac{A(\alpha^2 - 1)}{z} + 1 = \frac{(\mu_1^b + \mu_0^b)(\alpha^2 - 1)}{(\mu_0^b - \mu_0^R) - \alpha(\mu_0^b - \mu_0^a)} + 1,$$

где

$$A = \mu_1^b - \mu_0^b; \tag{1}$$

$$z = (\mu_0^b - \mu_0^R) - \alpha^2(\mu_0^b - \mu_0^a);$$

$$\mu_m^n = \frac{K_m^n}{I_m^n} = \frac{K_m\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} n\right)}{I_m\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} n\right)};$$

$m = 0,1$;

$n = a, b, r$ — радиусы спирали, образца и резонатора соответственно;

λ_g — длина замедленной волны на частоте f_0;

I^n, I_1^n, K_0^n, K_1^n — модифицированные функции Бесселя от аргумента $\frac{2\pi}{\lambda_g} n$;

$\alpha^2 = (f_0/f_1)^2$; f_0, f_1 — резонансные частоты резонатора без образца и с образцом соответственно.

порядка 16 *мм* абсолютная ошибка измерения его должна быть порядка 0,16 *мм*, что достигается легко при измерении с помощью штанген-циркуля.

Обеспечить $\frac{\Delta a}{a} = 10^{-3}$ и $\frac{\Delta b}{b} = 10^{-3}$ значительно сложнее. Например, если радиус спирали $a = 7 \div 10$ *мм*, а измерение с помощью штанген-циркуля обеспечивает относительную ошибку измерения в 0,1 *мм*, то $\frac{\Delta a}{a} = 10^{-2}$. Так как коэффициенты ошибок для a составляют порядок $1 \div 2{,}5$, то и слагаемое относительной ошибки измерения за счет неточности измерения радиуса a составит величину $\varkappa_a = 1-2{,}5\%$. При измерении диаметра образца с помощью микрометра можно обеспечить абсолютную ошибку измерений $\Delta b = 10^{-2}$ *мм*, а так как диаметры образцов составляют величину порядка 0,5—1 *мм*, то $\frac{\Delta b}{b} = 1 \div 2 \cdot 10^{-2}$ и слагаемое относительной ошибки измерения за счет неточности измерения диаметра образца даст величину порядка 1—2%.

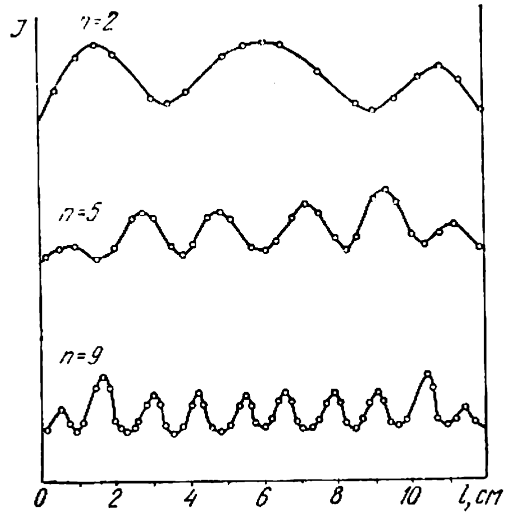

Рис. 3.

Можно увеличить точность измерения a и b путем использования микроскопа. С этой стороны задача оказывается разрешимой. Гораздо сложнее выполнить условия неизменности радиуса спирали за счет натяжения при сборке системы и изготовление образца с допуском $\frac{\Delta b}{b} = 10^{-3}$ по всей длине образца.

Для обеспечения в нашем случае $\varkappa_{\lambda_g}$ меньше 1% необходимо производить измерения длины замедленной волны в системе с абсолютной ошибкой порядка 1 *мм* в длинноволновой части диапазона, порядка нескольких миллиметров в средней части и порядка 0,1 *мм* в коротковолновой части диапазона частот. Измерять длину замедленной волны в системе можно по числу полуволн в системе и известной длине резонатора. При этом допускается определенная неточность в определении длины волны λ_g за счет наличия краевых эффектов. Как отметил еще Л. Н. Дерюгин [2], для спиральной системы не существует плоской зеркальной симметрии, необходимой для точного формирования поля в резонансном макете, и потому поля в системе будут несколько отличаться от полей в бесконечной спирали, для которой и получены все формулы.

На рис. 3 представлены зондограммы полей, снятые для случаев, когда в системе укладывается 2,5 и 9 полуволн. Из рисунка видно, что у торцов системы картины полей искажены. Измеренные по зондограммам длины волн λ_g без учета искажений у торцов отличаются от длин волн, определенных по числу полуволн в системе таким образом, что $\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g}$ оказывается порядка 10%. Если считать, что именно это различие в длинах волн и определяет величину относительной ошибки измерения λ_g, то с учетом величин коэффициентов ошибок $S(\lambda_g)$ слагаемое $\varkappa_{\lambda_g}$ будет составлять величину порядка 1% в средней части диапазона и величины порядка 5—7% по краям диапазона частот.

Точность измерения резонансных частот определяется как прибором, примененным для измерений, так и добротностью резонатора. Применение волномеров высокой точности решает первую часть вопроса. Так, для описываемого резонатора в области от 200 до 800 *мгц* точность определения частоты была равна $\frac{\Delta f}{f} = 10^{-5}$, так как был применен волномер ВВТ-Д. И при этом слагаемое за счет измерения частоты $\varkappa f$ оказывалось порядка 0,8%. Точность измерения частоты f_1, соответствующая резонансу системы при наличии в ней испытуемого образца, уже не определяется только возможностями измерителя частоты, но и зависит в большой степени от точности установления резонанса, т. е. от добротности резонатора. При работе было обнаружено, что при внесении в резонатор одного и того же образца в разное время сдвиги частот могли отличаться на 5—6%, что говорит о том, что точность определения частоты f_1 составляет величину $\frac{\Delta f_1}{f_1} = 10^{-4}$ и это приводит к ошибке $\varkappa_{f_1} =$ 5—7%.

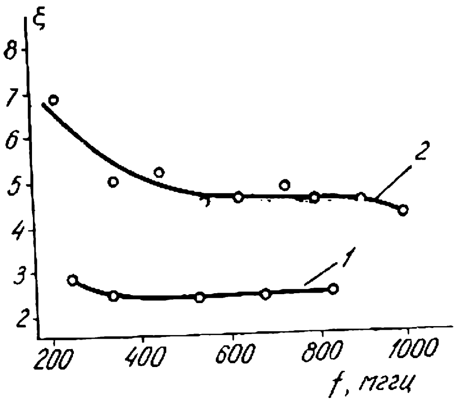

Рис. 4.

Как видно из сказанного, общая ошибка измерения ε в нашем случае составляла величину порядка 13—15% по краям диапазона частот и величину порядка 10% в средней его части.

Для примера на рис. 4 показаны результаты измерения и расчета ε стеклянного стержня диаметром $2b = 1,19$ *мм* в диапазоне частот и для сдвигов частот, указанных на графике 1, и для длин волн λ_g, определенных по числу полуволн в системе (см. кривую *2*). Кривая *1* представляет собой рассчитанные значения ε для образца из полиэтилена диаметром $2b = 0,72$ *мм*. Из графика видно, что наибольшие отклонения значений диэлектрических проницаемостей вещества получаются по краям диапазона частот. Отмеченное завышение значений ε и для других образцов и материалов со стороны длинных волн позволяет сделать вывод о существовании систематической ошибки со стороны длинных волн. Вероятнее всего, это завышение обусловлено наибольшим искажением поля на этих частотах по сравнению с полем в бесконечной спирали, для которой выведены все соотношения.

Так как основная доля ошибки измерения ε определяется неточностью измерения частот и длин замедленных волн в системе, то для увеличения точности измерений нужно идти по пути устранения погрешностей, обусловленных указанными двумя параметрами. При этом следует идти в направлении увеличения жесткости конструкции для устранения разброса в значениях сдвигов частот и уменьшения ошибки в определении радиуса спирали. Для уменьшения ошибки за счет неточности измерения замедленной длины волны следует применять спирали с более густой намоткой, т. е. максимально приблизить реальный случай к условию анизотропно проводящего цилиндра. Можно ожидать, что указанным путем можно будет понизить общую ошибку измерения ε примерно до 3%.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. П. Яцук, В. П. Шестопалов. ЖТФ, XXXII, № 1, 1962.
2. Электромагнитные замедляющие системы. «Тр. МАИ им. С. Орджоникидзе», 125, М., Оборонгиз, 1960.