

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.335+337

Э. И. АРШ, Л. А. КРАСИН

(Днепропетровск)

МЕТОД АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Анализируются существующие методы измерений диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в широком диапазоне частот. Сравняются параметры двух идентичных автогенераторов качающейся частоты, в конденсатор колебательного контура одного из которых помещен диэлектрик. Выводятся выражения, позволяющие определить значения электрических параметров образца, и кратко описывается вариант схемы, дающей возможность автоматизировать снятие частотных характеристик исследуемого материала. Приводятся относительные погрешности измерений и определяется область применения рассмотренного метода.

Непрерывный рост объема измерений параметров диэлектриков в широком диапазоне частот требует развития точных методов, сводящих к минимуму участие человека в процессе измерения, широко использующих вычислительную технику и автоматическую регистрацию результатов.

С помощью резонансных методов кривую зависимости действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' и угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ от частоты обычно получают путем измерения этих величин в нескольких произвольно выбранных точках диапазона частот. При этом возможные резкие резонансы между точками измерений не фиксируются. Кроме того, приборы не дают непосредственного отсчета измеряемых величин, и для получения результатов необходимы трудоемкие вычисления [1].

Метод биений и интерференционный метод дают возможность измерять лишь ϵ' .

При использовании мостовых методов измерения параметров диэлектриков в непрерывном диапазоне частот резонансная частота моста должна лежать за пределами диапазона измерений, что значительно сужает рабочий диапазон частот [2], а при попытке избежать этого существенно усложняет измерительную цепь [3].

Исследование диэлектрика, помещенного в четырехполюсник, с помощью измерителя частотных характеристик при резонансных измерениях в непрерывном диапазоне частот после вычислений дает результаты, относящиеся только к резонансной частоте измеряемого четырехполюсника.

Метод, рассматриваемый в статье, позволяет избежать указанных недостатков. Автоматизация получения частотных характеристик ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$, повышающая точность и снижающая трудоемкость измерений, мо-

жет быть осуществлена путем сравнения параметров двух одинаковых автогенераторов качающейся частоты, в конденсатор колебательного контура одного из которых помещен исследуемый образец.

Если L и C_0 — соответственно индуктивность и емкость колебательного контура без образца, а $\epsilon' C_0$ — емкость колебательного контура с образцом, то отношение резонансных частот определяется как

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{L \epsilon' C_0}}{\sqrt{LC_0}}, \quad (1)$$

откуда

$$\epsilon' = \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2. \quad (2)$$

Мгновенное значение добротности резонансного контура генератора без образца равно

$$Q_1 = \frac{1}{2\pi f_1 C_0 (r + R')}, \quad (3)$$

где r — активное сопротивление катушки индуктивности и соединительных проводов;
 R' — потери в контуре в момент измерения, вносимые сердечником модулятора.

Конденсатор с образцом можно заменить последовательной схемой замещения с емкостью $\epsilon' C_0$ и активным сопротивлением R_3 .

Тогда для мгновенного значения добротности резонансного контура генератора с образцом справедливо соотношение

$$Q_2 = \frac{1}{2\pi f_2 \epsilon' C_0 (r + R' + R_3)}. \quad (4)$$

Отношение этих добротностей имеет вид

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{2\pi f_2 \epsilon' C_0 (r + R' + R_3)}{2\pi f_1 C_0 (r + R')}. \quad (5)$$

Однако на частоте f_2 $2\pi f_2 \epsilon' C_0 R_3 = \operatorname{tg} \delta$, и поэтому соотношение (5) упрощается:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \operatorname{tg} \delta Q_1 + \frac{f_2}{f_1} \epsilon'. \quad (6)$$

Подставляя значение ϵ' из выражения (2) в (6), после соответствующих преобразований получим

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q_2} - \frac{f_1}{f_2} \frac{1}{Q_1}. \quad (7)$$

Мнимая часть диэлектрической проницаемости равна

$$\epsilon'' = \epsilon' \operatorname{tg} \delta. \quad (8)$$

Если качание частоты производится путем линейного изменения индуктивностей колебательных контуров автогенераторов, резонансная частота и добротность изменяется линейно:

$$\frac{\Delta L}{2L} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (9)$$

и выражения для ϵ' (2) и $\text{tg} \delta$ (7) справедливы во всем диапазоне качания.

Если качание обоих автогенераторов и горизонтальная развертка осциллографа осуществляется от одного генератора пилообразного напряжения, то при подаче на вертикальные пластины осциллографа напряжения, пропорционального ϵ' , ϵ'' или $\text{tg} \delta$, частотные характеристики исследуемых параметров наблюдаются визуально. Напряжения, соответствующие диэлектрической проницаемости и тангенсу угла потерь, могут быть получены с помощью преобразователей частота — напряжение, детектирования и использования стандартных решающих блоков аналоговых машин.

Выражения (2) и (7) выведены без учета емкости C_1 , обусловленной краевыми полями рассеяния в измерительных конденсаторах, и индуктивности соединительных проводов L_1 . С учетом C_1 емкость конденсатора без образца равна $C_n = C_0 + C_1$, а емкость конденсатора с образцом — $C_s = \epsilon' C_0 + C_1$.

Подставляя эти значения вместо C_0 в отношение (1), после необходимых преобразований получим расчетное значение

$$\epsilon'_p = \frac{f_1^2}{f_2^2} + \frac{C_1}{C_0} \left(\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1 \right), \quad (10)$$

откуда абсолютная погрешность соответствует

$$\Delta \epsilon' = \epsilon'_p - \epsilon' = \frac{C_1}{C_0} \left(\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1 \right), \quad (11)$$

а относительная —

$$\delta \epsilon' = \frac{\Delta \epsilon'}{\epsilon'} = \frac{C_1}{C_0} \left(1 - \frac{f_2^2}{f_1^2} \right). \quad (12)$$

На низких частотах и при больших значениях $\epsilon' \frac{f_2^2}{f_1^2} \ll 1$ и выражение для наибольшей погрешности имеет вид

$$\delta \epsilon' \leq \frac{C_1}{C_0}. \quad (13)$$

Если расстояние между обкладками измерительного конденсатора относится к диаметру последнего, как 1 : 10, то $\frac{C_1}{C_0} \cong 3\%$, откуда $\delta \epsilon' \leq 3\%$.

Аналогично можно получить расчетное значение $\operatorname{tg}\delta$, если пренебречь величинами второго порядка малости:

$$\operatorname{tg}\delta_p = \frac{1}{Q_2} - \frac{f_1}{f_2} \frac{1}{Q_1} - \frac{f_2}{f_1} \frac{C_1}{C_0} \frac{1}{Q_1}, \quad (14)$$

откуда абсолютная погрешность определяется

$$\Delta \operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_p - \operatorname{tg}\delta = - \frac{f_2}{f_1} \frac{C_1}{C_0} \frac{1}{Q_1}, \quad (15)$$

а относительная —

$$\delta \operatorname{tg}\delta = \frac{\Delta \operatorname{tg}\delta}{\operatorname{tg}\delta} = - \frac{f_2}{f_1} \frac{C_1}{C_0} \frac{1}{Q_1 \operatorname{tg}\delta}. \quad (16)$$

Если учесть, что $Q_1 \operatorname{tg}\delta > 1$ и на высоких частотах $\frac{f_2}{f_1} \rightarrow 1$, то $\delta \operatorname{tg}\delta < \frac{C_1}{C_0}$, т. е. не более 3%.

Индуктивность проводов при измерении ϵ' не сказывается, а при измерении $\operatorname{tg}\delta$ влиянием индуктивности L_1 можно пренебречь, если выполняется условие $\frac{L_1}{L} \ll 1$.

Предельной частотой, на которой еще возможно применение контуров с сосредоточенными параметрами, следует считать частоту порядка 150 Мгц.

Если f_{\max} — верхняя граница рабочего диапазона частот, а f_{\min} — нижняя, то

$$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = (\sqrt{\mu_g})^n, \quad (17)$$

где μ_g — начальная проницаемость сердечника модулятора для качания частоты;

n — число поддиапазонов качания.

Тогда

$$n = \log_{\sqrt{\mu_g}} \frac{f_{\max}}{f_{\min}}. \quad (18)$$

Для модулятора с одним из типов высокочастотных ферритов получено $\sqrt{\mu_g} = 2$. Число поддиапазонов качания может быть снижено при использовании материалов с большим μ_g или благодаря применению других способов качания.

Рассмотренный метод автоматических измерений ϵ' и $\operatorname{tg}\delta$, отличающийся малыми относительными погрешностями, может быть использован для исследования параметров новых диэлектриков, для проведения большого объема работ по изучению электрических свойств различных материалов и горных пород с целью развития радиоволновых методов контроля неоднородностей и высокочастотной электротермии [4, 5].

Выводы

Сравнение параметров двух автогенераторов качающейся частоты, в конденсатор колебательного контура одного из которых помещен диэлектрик, дает возможность измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь образца в непрерывном диапазоне частот.

Относительные погрешности данного метода не превосходят погрешностей известных резонансных методов с контурами, содержащими сосредоточенные элементы.

Использование вычислительных блоков аналогового типа дает возможность непосредственно получать частотные характеристики диэлектриков, исключая трудоемкую обработку результатов измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Брандт. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 1963.
2. Louage Francis. Note sur un pont automatique a large bande de frequence pour l'etude des dielectrique.— Magnet. and Electr. Resonance and Relaxat., Amsterdam, 1963.
3. Ю. К. Азаров, Э. Д. Дубровин. Устройство для измерения и визуального наблюдения зависимости угла диэлектрических потерь от частоты электрического поля. Авторское свидетельство № 167672. Бюллетень изобретений, 1965, № 2.
4. А. В. Нетушил, Б. Я. Жуховицкий, В. Н. Кудин, Е. П. Парини. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
5. Э. И. Арш. Высокочастотная техника в горном деле.— Сб. «Горная электромеханика и автоматика», вып. 1. Харьков, Изд-во ХГУ, 1965.

*Поступила в редакцию
6 сентября 1965 г.*