

Методы исследования диэлектрических свойств электроизоляционных материалов

Электроизоляционные материалы (ЭИМ) могут обладать поляризацией различных типов: электронной, ионной, миграционной, спонтанной и упругой. Каждой из них присуща своя предельная частота. Следовательно, для измерения относительной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ ЭИМ необходимо использовать соответствующие по частоте методы.

В таблице приведены методы и соответствующие им диапазоны частот, используемых при измерении ϵ и $\text{tg}\delta$ ЭИМ.

Рассмотрим вкратце методы измерения ϵ и $\text{tg}\delta$ ЭИМ, используемых в качестве электрической изоляции кабельных изделий.

Исследование диэлектрических свойств новых ЭИМ целесообразно начинать, на наш взгляд, с низких частот с помощью мостовых методов, которые позволяют производить измерения ϵ и $\text{tg}\delta$ с любым наперед заданным шагом по частоте и обнаруживать наличие максимумов или минимумов на кривых ϵ и $\text{tg}\delta$, если таковые имеются.

1. МОСТ VKB

Действующий с 1965 года и до настоящего времени в ФГУП «ОКБ КП» измерительный конденсаторный мост Шеринга типа VKB фирмы ROND&SCHWARZ с согласующим усилителем-индикатором типа UBM и измерительным конденсатором типа KMT с охраняемым кольцом позволил исследовать большое количество новых ЭИМ.

Мост переменного тока VKB (рис. 1) имеет следующие технические характеристики:

- диапазон рабочих частот — от 50 Гц до 300 кГц;
- пределы измерения $\text{tg}\delta$ — от $5 \cdot 10^{-4}$ до $3,5 \cdot 10^{-1}$;
- пределы измерения C_x — от 10 пФ до 1 мкФ;
- погрешность измерения $\text{tg}\delta \pm 5\%$;
- погрешность измерения $C_x \pm 2\%$;
- диаметр защищенного электрода — 80,3 мм;
- расстояние между электродами — от 0 до 7,5 мм.

Принцип действия моста основан на балансировке мостовой схемы с помощью переменного конденсатора C_x и переменного сопротивления R_x по нулевому индикатору. При равновесии моста

$$\text{tg}\delta = R_x \cdot \omega \cdot C_x.$$

Таблица. Диапазоны частот и соответствующие им методы измерения ϵ и $\text{tg}\delta$ электроизоляционных материалов:

Методы			Диапазон частот														
Квазистатические методы измерения	Мостовые методы																
	Резонансные методы																
Динамические методы измерения	Управляемые волны	Резонансные волноводные															
		Длинных линий и мостовые															
	Свободные волны	Оптические методы															
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	гг

- 1 — мост Гарриса;
- 2 — мосты Шеринга;
- 3 — трансформаторные мосты;
- 4 — метод вариации реактивной проводимости;
- 5 — метод куметра;
- 6 — метод проходных объемных резонаторов;
- 7 — методы объемных резонаторов;

- 8 — методы коаксиальных резонаторов;
- 9 — квазиоптические резонаторные методы;
- 10 — методы измерительных линий;
- 11 — методы коаксиальных линий;
- 12 — мостовые СВЧ-методы;
- 13 — методы квазиоптических полых волноводов;
- 14 — оптические методы.



Рис.1. Внешний вид моста VKB с измерительной ячейкой, генератором ГЗ-112/1 с блоком-усилителем

Практическая формула для расчета угла диэлектрических потерь имеет вид $\text{tg}\delta = A \cdot B \cdot f$ [кГц], где A и B — показания на шкалах прибора.

Диэлектрическую проницаемость определяют прямым измерением емкости C_x плоского образца и рассчитывают по формуле:

$$\epsilon = \frac{C_x \cdot d}{45,3}$$

где d — толщина образца.

Одновременно с мостом Шеринга типа VKB в ОКБ КП использовался куметр типа TF-329G и измеритель диэлектрических потерь TF-704G фирмы Marconi на частотах от 50 кГц до 100 МГц. Куметр был дополнительно снабжен простой измерительной ячейкой, состоящей из нижнего массивного латунного электрода и верхнего подпружиненного точечного электрода. На образец диаметром 50 мм наклеивались с помощью вазелина электроды из алюминиевой фольги и проводились измерения. Куметр обеспечивал за счет набора сменных эталонных индуктивностей измерения с погрешностью 20 % для $\text{tg}\delta$ и 5 % для ϵ в диапазоне частот до 30 МГц.

2. РЕЗОНАНСНЫЕ ДИЭЛЬКОМЕТРЫ

Коаксиальные резонаторы

В 70-х годах в ОКБ КП были разработаны и изготовлены четвертьволновые коаксиальные резонаторы КР-300, КР-500 и КР-1000 (300; 500 и 1000 МГц соответственно), с помощью которых проводились исследования температурно-частотных зависимостей широкого класса ЭИМ. Основными недостатками этих резонаторов были их громоздкость (вес — до 10 кг) и отсутствие визуального наблюдения за симметричным расположением исследуемого образца на поверхности внутреннего электрода внутри резонатора, так как малейший толчок резонатора приводил

к смещению образца или к его падению во внутреннюю полость резонатора и повторению сложной процедуры измерения).

В начале 80-х годов Ангарским ОКБА НПО «Химавтоматика» разработан ряд автоматизированных измерителей диэлектрических параметров твердых (объемных и пленочных) материалов: Ш2-6, Ш2-7, Ш2-10, ИДПМ-1. Они позволяют измерять ϵ и $\text{tg}\delta$ ЭИМ на фиксированных частотах от 0,1 до 9000 МГц. В кабельном производстве при входном контроле ϵ и $\text{tg}\delta$ изоляционных полиэтиленов низкой и высокой плотности в соответствии с ГОСТ 16337-77 используются частоты 1 и 500 МГц.

Диэлькометр Ш2-6

На смену резонатору КР-500 пришел диэлькометр Ш2-6 [1]. Сравнительные измерения показали, что их результаты в пределах погрешности совпадают.

Диэлькометр имеет встроенную микро-ЭВМ, работает на фиксированной частоте 500 МГц и обеспечивает получение прямых цифровых отсчетов толщины образца, ϵ и $\text{tg}\delta$. Время проведения трех измерений ϵ и $\text{tg}\delta$ одного образца диэлектрика составляет 6 — 10 мин. В основу прибора положена измерительная ячейка ИПДП-1 (рис.2), представляющая собой коаксиальный резонатор 4 с сосредоточенной емкостью, образованной торцевыми поверхностями внутренних электродов 5 и 7. Верхний внутренний электрод 5 соединен шаровым шарниром со штоком 2 преобразователя перемещений 1 и может перемещаться в осевом направлении. Электрический контакт верхнего электрода с корпусом резонатора осуществляется через сильфон 3, а связь резонатора с генератором и детектором — через петли связи 6.

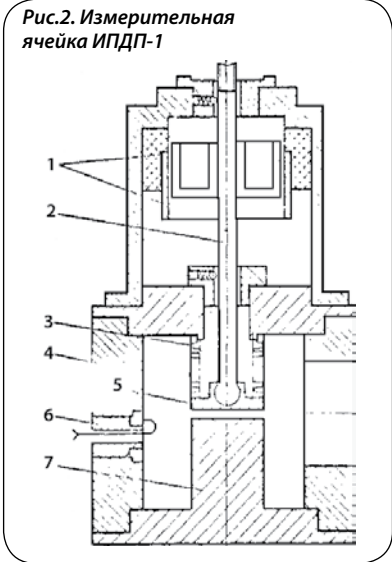
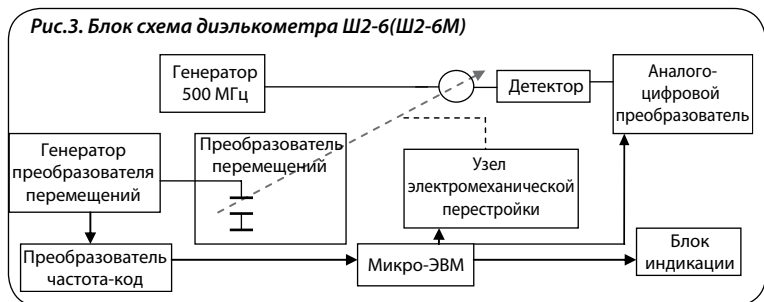


Рис.2. Измерительная ячейка ИПДП-1

Генератор рабочего сигнала с частотой 500 МГц построен по схеме последовательного умножения сигнала кварцевого автогенератора, стабилизация мощности генерируемого сигнала осуществляется схемой АРУ (рис. 3).

Алгоритм измерения ϵ и $\text{tg}\delta$ в диэлькометре Ш2-6 состоит из измерения резонансных расстояний между электродами резонатора, измерения соответствующих резонансных напряжений, а также измерения

Рис.3. Блок схема диэлькометра Ш2-6(Ш2-6М)



толщины образца. В последующие годы диэлькометр Ш2-6 подвергся модернизации (рис. 4) [2].

Принцип действия диэлькометра Ш2-6М основан на определении резонансной характеристики нагруженного измерительного преобразователя с образцом и без образца (диаметр образца 30 мм, толщина — до 6 мм). Сканирование межэлектродного пространства осуществляется шаговым двигателем, перемещающим электрод, одновременно напряжение на резонаторе измеряется интегрирующим АЦП, а соответствующее ему межэлектродное расстояние — с помощью емкостного преобразователя перемещение-частота. У вершины резонансного пика, с целью повышения точности, скорость сканирования уменьшается.

В состав каждого из диэлькометров входит унифицированный блок управления, представляющий собой специализированную микро-ЭВМ, управляющую процессом измерений и осуществляющую математическую обработку результатов. Приборы комплектуются емкостным преобразователем перемещение-частота, позволяющим определять среднюю толщину образца путем измерения толщины образца в произвольном числе точек его поверхности. Обработка результатов измерения толщины производится автоматически с помощью блока управления.

Обеспечен вывод результатов измерений на цифровое печатающее устройство. Имеется набор тестовых

Рис.4 Внешний вид диэлькометра Ш2-6М



программ, обеспечивающих самодиагностику и юстировку приборов.

Поверка диэлькометров осуществляется по государственными стандартным образцам (ГСО).

При поверке диэлькометров по ϵ используются около тридцати ГСО разной толщины из фторопласта ($\epsilon = 2,02$), эбонита ($\epsilon = 2,75$), кварца ($\epsilon = 3,81$) и керамики ($\epsilon = 5,25; 9,6$ и $19,9$).

При поверке по $\text{tg}\delta$ используются ГСО из фторопласта, полистирола, оргстекла, эбонита, кварца и трех видов керамики.

Резонансный диэлькометр Ш2-7

Диэлькометр Ш2-7 предназначен для экспресс-измерений ϵ и $\text{tg}\delta$ на частотах 1 и 10 МГц. При использовании внешнего генератора прибор может быть легко модифицирован на любую частоту измерения в диапазоне 0,1-10 МГц. Принцип действия и структура диэлькометра Ш2-7 в основном аналогичны диэлькометру Ш2-6 (Ш2-6М). Внешнее оформление диэлькометров Ш2-6 и Ш2-7 практически идентично.

Сканирование резонансной характеристики осуществляется реверсивным двигателем на постоянной скорости, что оказалось возможным благодаря более низкой добротности резонансного контура ($Q = 150 - 200$) и пикового детектора, запоминающего резонансное напряжение.

Резонансное межэлектродное расстояние находится путем определения координаты вершины резонансной характеристики методом сглаживания.

При автокалибровке собственная добротность контура определяется путем измерения частотной ширины резонансной характеристики на уровне 0,7.

Диэлькометры Ш2-6М и Ш2-7 используются в ФГУП «ОКБ КП» для определения ϵ и $\text{tg}\delta$ при входном контроле электроизоляционных материалов свыше 20 лет и показали себя надежными и удобными в работе.

В следующей публикации будут рассмотрены объемные цилиндрические резонаторы, с помощью которых в ОКБ КП было проведено большое количество работ по изучению диэлектрических свойств ЭИМ.

*В.В. Костромин, к.т.н., Б.С. Романов, к.ф-м.н.,
ФГУП «ОКБ КП»*

Литература

1. Метрология / Немаров А.В., Подгорный Ю.В., Шерстов К.Д., Костромин В.В. 1982. №11, С.45–52.
2. Подгорный Ю.В., Пинхусович РЛ. Резонансные диэлькометры твердых материалов // Всесоюзное совещание «Метрологическое обеспечение диэлектрических измерений» (тезисы докладов), 21-23 мая 1991 г., Иркутск, 1991, С.6-10.