

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

METHODS OF MEASUREMENT OF PARAMETERS OF LIQUID DIELECTRICS USING A MEASURING CELL

N. Petuhova

Summary. In works on the measurement of parameters of liquid dielectrics at microwave frequencies [1, p. 82–85] was the existing classical methods of measurement [2, Pp. 51–56], was modeled on the installation, allowing to measure the tangent of dielectric loss angle and dielectric constant [3, p. 65–66],[4], as well as written computer program [5, p. 64–66], allowing to automate the installation. This remote power analysis data obtained in the course of modeling, the description of methodic and algorithm parameter measurement of liquid dielectrics as well as the development of the original model setup for the measurement of parameters of liquid dielectrics.

Keywords: dielectric, multipole calibrated, measuring cell, measuring system, measuring cell.

Петухова Наталья Александровна

Аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики в г. Санкт-Петербург
1natasha_91@mail.ru

Аннотация. В работах по измерению параметров жидких диэлектриков на СВЧ [1, С. 82–85] были рассмотрены существующие классические методы измерения [2, С. 51–56], была смоделирована установка, позволяющая измерять тангенс угла диэлектрической потерь и диэлектрическую проницаемость [3, С. 65–66],[4], а также написана программа для ЭВМ [5, С. 64–66], позволяющая автоматизировать установку. Данная работа посвящена проведению анализа данных полученных в ходе моделирования, описанию методики и алгоритма проведения измерений параметров жидких диэлектриков, а также разработке авторской модели установки для измерения параметров жидких диэлектриков.

Ключевые слова: диэлектрик, калибруемый многополюсник, измерительная ячейка, измерительная установка, измерительная ячейка.

Произведем расчет погрешностей косвенных измерений по погрешностям прямых измерений. В данном случае исходными данными для расчета погрешности являются метрологические характеристики калибруемого многополюсника. По этим характеристикам следует определить погрешности измерений мощностей P_i — исходные данные для расчета фазы и модуля коэффициента отражения. Так как диапазон измерений мощности можно определить как: $P_i = \bar{P}_i \pm \Delta P$, где \bar{P}_i — средняя измеряемая мощность на каждом зонде, ΔP — абсолютная погрешность измерения мощности, исходя из разности сигналов с детекторов:

$$P_5 - P_3 = 4k|a|^2 |\rho_{\pi}| \sin(\varphi_{\rho}),$$

1. Рассчитаем абсолютную погрешность искомой величины по формуле:

$$\Delta\varphi(P_5, P_3, P_6, P_4, \Delta P) =$$

$$= \sqrt{\Delta P \left(\frac{d}{dP_6} \varphi(P_5, P_3, P_6, P_4) + \frac{d}{dP_4} \varphi(P_5, P_3, P_6, P_4) + \frac{d}{dP_3} \varphi(P_5, P_3, P_6, P_4) + \frac{d}{dP_5} \varphi(P_5, P_3, P_6, P_4) \right)}$$

Где $\frac{d\varphi}{dP_i}$ — частная производная от функции φ по P_i

$$P_6 - P_4 = 4k|a|^2 |\rho_{\pi}| \cos(\varphi_{\rho}),$$

где $|\rho H|$ и φ_{ρ} — модуль и фазовый угол коэффициента отражения выведем следующий алгоритм:

Рассчитаем средние арифметические значения $\langle P_3 \rangle$, $\langle P_4 \rangle$, $\langle P_5 \rangle$, $\langle P_6 \rangle$, на основе их прямых измерений.

Рассчитаем среднее значение искомой величины φ , подставив в расчетную формулу полученные средние значения мощностей, т.е.

$$\varphi(P_5, P_3, P_6, P_4) = \text{atan} \left(\frac{P_5 - P_3}{P_6 - P_4} \right)$$

$$\frac{d}{dP_6} \varphi(P_5, P_3, P_6, P_4) \rightarrow \frac{1}{(P_4 - P_6) \left[\frac{(P_3 - P_5)^2}{(P_4 - P_6)^2} + 1 \right]}$$

$$\frac{d}{dP_4} \varphi(P_5, P_3, P_6, P_4) \rightarrow \frac{1}{(P_4 - P_6)^2 \left[\frac{(P_3 - P_5)^2}{(P_4 - P_6)^2} + 1 \right]}$$

$$\frac{d}{dP_5} \varphi(P_5, P_3, P_6, P_4) \rightarrow \frac{1}{(P_4 - P_6) \left[\frac{(P_3 - P_5)^2}{(P_4 - P_6)^2} + 1 \right]}$$

$$\frac{d}{dP_6} \varphi(P_5, P_3, P_6, P_4) \rightarrow \frac{1}{(P_4 - P_6)^2 \left[\frac{(P_3 - P_5)^2}{(P_4 - P_6)^2} + 1 \right]}$$



Рис. 1. Схема установки для измерения параметров диэлектриков

Из всего многообразия элементов вектора значений φ найдем максимальное значение абсолютной погрешности $\Delta\varphi$:

$$\varphi = \begin{cases} \varphi \leftarrow 0, & \text{для } i \in 1 \dots 891, \\ \varphi_i \leftarrow \Delta\varphi(P_{5i}, P_{3i}, P_{6i}, P_{4i}, \Delta P) \end{cases}$$

$$\max(\varphi) = 2.018 \cdot 10^{-3}, \max(\varphi) \cdot \frac{180}{\pi} = 0.116$$

В расчете учитывались абсолютные значения ΔP равные 10–8 Вт.

Методика выполнения измерений

Использование в установке калибруемого многополюсника позволяет по данным мощности сигналов с его выходов рассчитать комплексный коэффициент отражения, не прибегая к фазовым измерениям. При прохождении гармонического сигнала через диэлектрик, сигнал теряет свою энергию из-за потерь в диэлектрике,

и меняет свою фазу. В силу того что потери в диэлектрике влияют только на амплитуду проходящего через него сигнала, изменение значения фазы сопоставим со значением диэлектрической проницаемости. Суть методики измерения в установке сводится к определению диэлектрической проницаемости через измеренные значения фазы, и определение тангенса диэлектрических потерь через модуль коэффициента отражения. Схема установки приведена на рисунке 1.

Конструкция состоит из генератора, калибруемого многополюсника (включающего 4 амплитудных квадратичных детектора), измерительной ячейки (ИЯ) и четырехканальный АЦП. Каждый элемент схемы рассмотрим подробнее далее. При использовании калибруемого многополюсника измерения проводятся автоматизировано на одной заданной генератором частоте. Измерения можно было бы проводить в диапазоне частот, для этого понадобилось бы использовать анализатор спектра, или другую стандартную аппаратуру, но это существенно повысит стоимость установки.

Опишем подробную методику выполнения измерений:

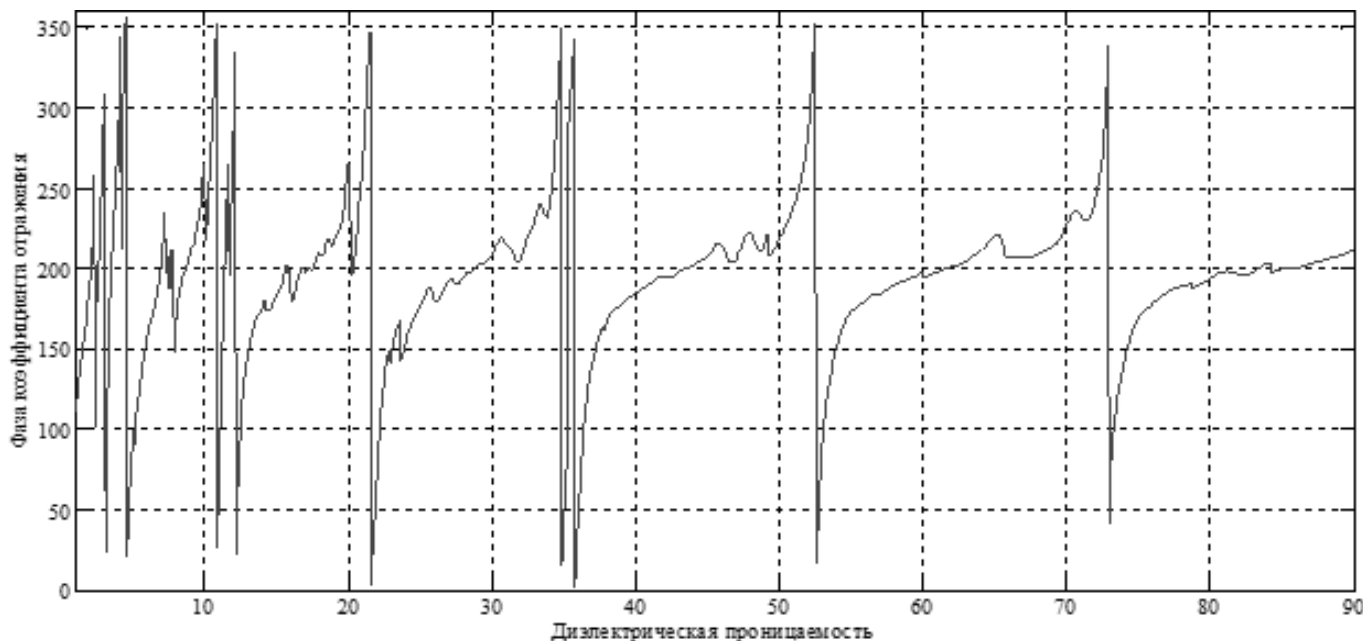


Рис. 2. Зависимость фазы коэффициента отражения от диэлектрической проницаемости, с использованием пробирки № 1

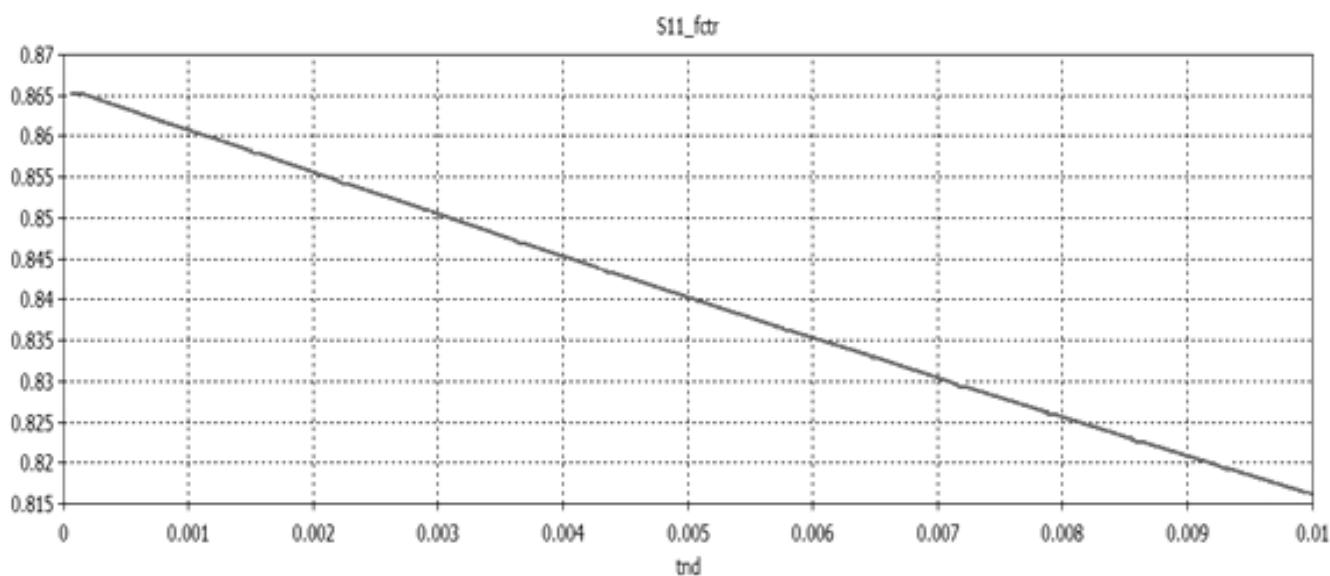


Рис. 3. Графики зависимости модуля коэффициента отражения от тангенса диэлектрических потерь для значения

1. На генераторе гармонических колебаний G выставить частоту сигнала 10 ГГц.
2. Подключить выход четырехканального АЦП на вход ЭВМ с установленной программой для обработки данных (программа приведена в [5, С. 64–66]).
3. Непосредственно перед исследованием свойств диэлектрика необходимо провести калибровку установки:
 - 3.1. в первую очередь нужно измерить фазу и модуль коэффициента отражения пустой измеритель-

- ной ячейки, эти значения показывают готовность установки к измерениям (по ним производят корректировку положения плунжера)
- 3.2 далее повторить пункт 3.1 для пустой пробирки № 1, № 2;
- 3.3. образец с известными параметрами залить в пробирку № 1, произвести измерения фазы и модуля коэффициента отражения. В качестве диэлектрика с известными параметрами будем использовать этиловый спирт (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=27$);

3.4. повторить измерения пункта 3.3 для пробирки № 2.

Измеренные значения вносятся в программу, в которой в свою очередь корректируются эмпирические зависимости, полученные при моделировании [4].

4. Для измерения параметров исследуемого диэлектрика в пробирку № 1 заливается исследуемый диэлектрик, и проводятся измерения фазы и модуля коэффициента отражения.

4.1. Получив значение фазового сдвига и модуля коэффициента отражения при помещении исследуемого вещества в пробирку № 1, и по графикам полученной зависимости изображенных на рисунках 2 и 3 (или аналогичные ему, подробнее [4]) мы определяем значение диэлектрической проницаемости и тангенс диэлектрических потерь соответственно.

Как упоминалось выше, исходя из того, что измеряемое значение фазы коэффициента отражения варьируется в пределах от 0 до 360, измерение фазы только одного образца жидкого диэлектрика вызывает неоднозначность нахождения диэлектрической проницаемости. Исправить это положение предлагается, измеряя значение фазы у двух образцов разной толщины, что и обеспечивается двумя пробирками одинакового диаметра, но с разным внутренним диаметром, соответственно $d_1=5\text{мм}$ для пробирки № 1 и $d_2=4\text{мм}$ для пробирки № 2.

5. Повторить пункт 4 для пробирки № 2.

5.1. Значение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь определяются соответственно по графикам полученной зависимости [3].

6. По входным данным согласно заданному алгоритму (пример программы [5, С. 64–66]), определяются искомые значения параметров диэлектрика. Программа заменяет пункты 4.1 и 5.1.

Приведем данную методику измерения в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 4.

На рисунке 5 изображено сравнение разработанного метода с уже существующими методами [1, С. 82–85], в зависимости от частотного диапазона измерений (использования в последствии) и потерь в диэлектрике. Диаграмма сравнения с другими методами показывает отличительные особенности разработанного метода и модели, что он работает в малом диапазоне частот, зато с материалами с разными потерями. Методика может применяться в различных областях техники, от промышленности до медицины и хозяйственной деятельности.

В данной работе была сконструирована новая модель для измерения параметров жидких диэлектриков. Проведя моделирование и расчеты, подтвердилось положительные характеристики этого метода и модели. Достоинствами данной модели являются:

1. в установке используются волноводные структуры, которые не требуют специального изготовления, и легкодоступны;
2. несложность изготовления измерительной ячейки, производство основано на волноводных структурах;
3. легкость очищения пробирки от исследуемой жидкости — просто промывание и обезжиривание (пробирка может использоваться и как расходный недорогой материал);
4. автоматизированность установки;
5. в самой установке нет необходимости в фазовых измерениях, так как используется калибруемый многополюсник;
6. низкая стоимость установки;
7. компактные размеры установки;
8. метод прост в проведении опытов;
9. возможность подстройки с помощью плунжера (позволяет располагать образец исследуемого материала в максимуме электрического, что позволяет сделать более точные измерения);
10. используются достаточно большие образцы, следовательно, методика подходит и для измерения параметров диэлектриков с малыми потерями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петухова Н.А., Куракин А.С. К вопросу о измерении параметров диэлектриков // Мир науки и инноваций — 2015. — Т. 3. — № 1(1). — С. 82–85.
2. Петухова Н.А., Куракин А.С. Установки для измерения параметров диэлектриков // Инновации в науке — 2015. — № 44. — С. 51–56.
3. Петухова Н.А. Моделирование измерительной ячейки с полным заполнением диэлектриком, для измерения параметров жидких диэлектриков // Материалы международной научно-практической конференции. Наука сегодня: факты, тенденции, прогнозы — 2016. — № Часть 1. — С. 65–67.
4. Петухова Н.А. Моделирование установки для измерения параметров жидких диэлектриков // Вестник Тихоокеанского государственного университета — 2016. — № 3(42).
5. Петухова Н.А. Программа для обработки данных при измерении параметров жидких диэлектриков // Наука сегодня: материалы международной научно-практической конференции: в 4 частях (23 сентября 2015 г., Вологда) — 2015. — № Часть 1. — С. 64–66.