

УДК 621.317

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

Л.И. Дмитриева

*Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», Новосибирск, Россия,
k403@sniim.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты измерений электромагнитных характеристик дисперсных систем. В качестве измерительного оборудования использовались скалярный анализатор цепей, анализатор импеданса прецизионный и необходимая для их подключения система фидерных линий передач. В ходе проведения измерений выявлена возможность создания методик измерений электромагнитных характеристик дисперсных систем.

Ключевые слова: коаксиальная измерительная линия, дисперсные системы, спектральные сигнатуры, коэффициент передачи, коэффициент отражения.

STUDY OF ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF DISPERSE SYSTEMS IN THE MICROWAVE RANGE

L.I. Dmitrieva

*West Siberian branch of FSUE "VNIIFTRI", Novosibirsk, Russia,
k403@sniim.ru*

Annotation. The paper presents the results of measurements of the electromagnetic characteristics of dispersed systems. A scalar network analyzer, a precision impedance analyzer and a system of feeder transmission lines required for their connection were used as measuring equipment. In the course of the measurements, the possibility of creating methods for measuring the electromagnetic characteristics of dispersed systems was revealed.

Key words: coaxial measuring line, dispersed systems, spectral signatures, transmission coefficient, reflection coefficient.

Введение

Анализ электромагнитных свойств материалов на сегодняшний день представляет актуальную научно-техническую задачу [1], результаты решения которой находят применение в создании принципиально новых типов материалов для самого широкого круга прикладных задач, от биологии и медицины до космоса и нанотехнологий. Также большой интерес представляет исследование механизма межмолекулярного взаимодействия различных сред с целью эффективного управления химическими и технологическими процессами.

Согласно анализу работ [2–4], посвящённых заявленной теме, для измерений характеристик дисперсных систем наиболее широко применяются методы коаксиального пробника и волноводной линии передачи. При этом на результат измерений существенным образом влияют параметры этих линий [5–7]. Среди недостатков теоретических моделей измеряемых характеристик можно отметить недостаточную базу знаний о межмолекулярных взаимодействиях веществ и их математических моделях. Среди недостатков существующих инструментов измерений можно отметить ограниченность верхнего частотного диапазона, а также ограниченность количества исследуемых дисперсных частиц в межэлектродном пространстве. Последний недостаток устраняется путём физического увеличения пространства между электродами, с одновременным увеличением мощности сигналов на измерительных щупах, что характерно для метода измерительного пробника. Согласно методу измерительного пробника электроды разнесены на большее расстояние.

Стратегия развития средств высокоточных измерений предполагает в самом ближайшем будущем освоение всё более высоких значений частотного диапазона и увеличение точности измеряемых параметров. Исходя из этой стратегии, представляется целесообразным не только совершенствование существующих методов, но и поиск новых измерительных технологий, использующих более широкий круг инструментов измерений.

В качестве основных измерительных инструментов в данной работе использовались: комплекс оборудования для исследования зависимостей модуля коэффициента передачи от частот в диапазоне от 10 МГц до 40 ГГц; комплекс оборудования для исследования зависимостей ёмкости измерительной ячейки от частоты в диапазоне от 20 Гц до 10 МГц; измерительный пробник.

Теория

В основе математической модели измерений параметров дисперсных сред лежит их зависимость от параметров приложенного гармонического напряжения, в частности от частоты. Так, например, функция измеренных потерь в материале ведёт себя по-разному на различных частотах, что иллюстрируется формулой (1):

$$\varepsilon''_{rr} = \varepsilon''_{rd} + \frac{\sigma}{\omega_0 \varepsilon_0}, \quad (1)$$

где σ — электрическая проводимость среды; ω_0 — круговая частота; ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость; ε''_{rd} — диэлектрические потери.

На низких частотах ионная проводимость обратно пропорциональна частоте $1/\omega$. Сама связь диэлектрической проницаемости с частотой выражается соотношением Дебая:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (2)$$

в котором в качестве математической абстракции использованы соотношения: $\omega = 0$, $\varepsilon(0) = \varepsilon_s$, $\omega = \infty$, $\varepsilon(\infty) = \varepsilon_\infty$.

Такой параметр, как диэлектрическая проницаемость среды, может быть использован как один из ключевых параметров, характеризующий любые материальные среды. Доля мощности, отражённой от среды, является функцией диэлектрической проницаемости ε' и угла падения электромагнитной волны. Для нормально падающей волны доля отражённой мощности равна:

$$P_r(90) = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon'} - 1}{\sqrt{\varepsilon'} + 1} \right)^2. \quad (3)$$

Из формулы (3) напрямую получается формула для доли мощности, прошедшей через диэлектрическую среду:

$$P_{res}(90) = 1 - \left(\frac{\sqrt{\varepsilon'} - 1}{\sqrt{\varepsilon'} + 1} \right)^2. \quad (4)$$

Спектральные сигнатуры, получающиеся при анализе сигналов, проходящих через слой исследуемого материала, имеют характерные признаки и могут быть, таким образом, использованы при формальном описании этих сред. В самом общем смысле это означает, что, меняя параметры сигнала, можно оценивать количественные характеристики исследуемого вещества.

Измерения

Для экспериментальных исследований электромагнитных характеристик была выбрана дисперсная система, состоящая из смеси дистиллированной воды и микрочастиц полистирола различного диаметра.

Установка для измерения коэффициентов передачи и отражения от частоты показана на рис. 1. В её состав входят: персональный компьютер для визуализации данных на графиках; скалярный анализатор цепей P2M-40; измерительный пробник; соединительные провода. Ниже представлены результаты измерений коэффициента передачи для суспензий с разной концентрацией полистирола.

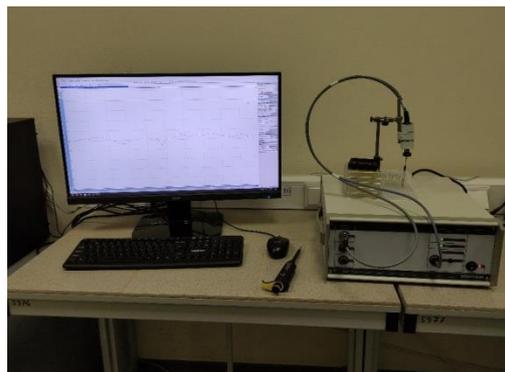


Рис. 1. Комплекс оборудования для исследования зависимостей модуля коэффициента передачи от частот в диапазоне 10 МГц – 40 ГГц

Измеренные зависимости модуля коэффициента передачи показаны на рис. 2.

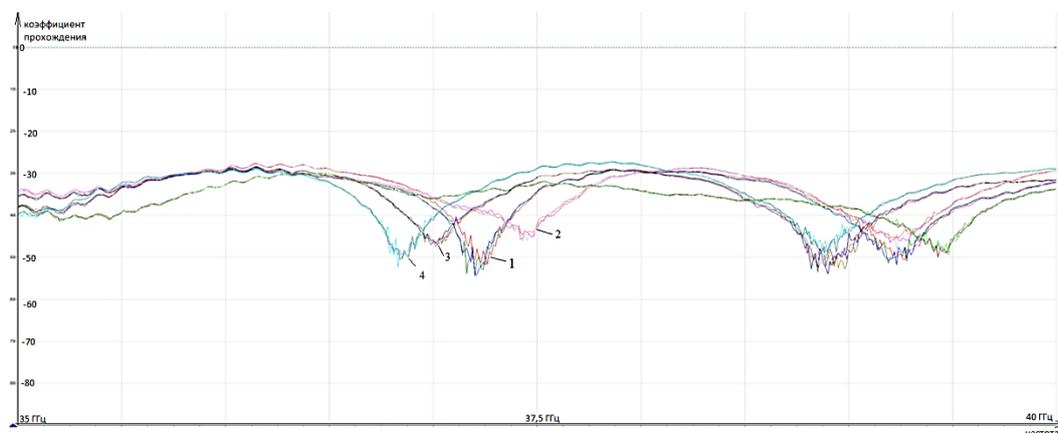


Рис. 2. Зависимости модуля коэффициента передачи от частоты в диапазоне 35–40 ГГц:
 1 — дистиллированная вода; 2 — 25%-й раствор стандартного образца частиц полистирола с дистиллированной водой; 3 — 50%-й раствор стандартного образца частиц полистирола с дистиллированной водой; 4 — 75%-й раствор стандартного образца частиц полистирола с дистиллированной водой

Как видно из приведённых зависимостей, дисперсные среды с различными характеристиками обладают разными спектральными сигнатурами, что говорит о потенциальной возможности создания перечня признаков, характерных для той или иной дисперсной среды, по которым впоследствии возможно построение алгоритмов их анализа.

Для исследования электромагнитных характеристик в низкочастотном диапазоне были проведены эксперименты по измерениям зависимости ёмкости от частоты для разных дисперсных систем (рис. 3). В качестве средства измерений использовался анализатор импеданса Wayne Kerr 6500 В. При этом также использовались разные концентрации смеси.

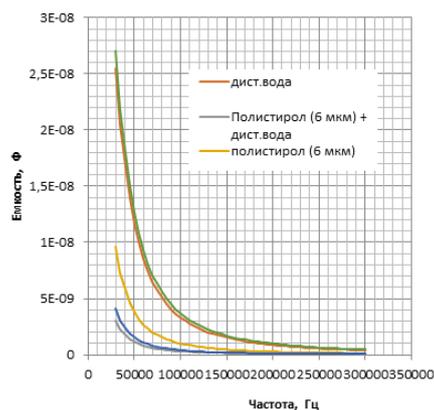


Рис. 3. Зависимость ёмкости от частоты для различных дисперсных систем с разной концентрацией полистирола в низкочастотном диапазоне

Как можно заметить, при возрастании частоты измеренная ёмкость уменьшается по закону, схожему с гиперболическим. При этом для разных дисперсных сред кривые имеют разную кривизну, что, как и в случае спектральных сигнатур коэффициентов передачи и отражения, даёт возможный инструмент для количественного анализа измеренных характеристик.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать выводы о возможности создания методик измерений электромагнитных характеристик дисперсных сред и на этой основе разработать комплекс средств измерений их параметров. В частности, совместный анализ спектральных сигнатур коэффициентов передачи, и отражения, и ёмкости дисперсных сред позволяет сформировать на начальном этапе их «электромагнитные портреты», по совокупности которых в дальнейшем возможен более глубокий анализ.

Список литературы

1. Venkatesh M.S., Raghavan G.S.V. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials // Biosystems Engineering. — 2004. — 88 (1). — P. 1–18.
2. Громаков Н.С. Дисперсные системы и их свойства. Учебное пособие по коллоидной химии. — Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2015. — 91 с.
3. Громаков Н.С. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебное пособие по коллоидной химии (лабораторные работы и задачи). — Казань: КГАСУ, 2009. — 75 с.
4. Дисперсные системы: конспект лекций // Белорусский государственный медицинский университет [сайт]. — URL: https://www.bsmu.by/downloads/kafedri/k_obschim/stud/disp.pdf.
5. Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплинам «Измерения на СВЧ», «Микроволновая техника». Измерение модуля и фазы коэффициентов передачи СВЧ-устройств с помощью комбинированного измерителя ФК2-18. — СПб.: СПбГЭТУ, 2011.
6. Шестопалов В.П., Яцук К.П. Методы измерения диэлектрических проницаемостей вещества на сверхвысоких частотах // Успехи физических наук. — 1961. — Вып. 4.
7. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: учеб. пособие для вузов. — М.: Радиотехника, 2008. — 184 с.
8. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии: учеб. пособие. — Казань: Казанский государственный университет, 2008. — 112 с.

Статья поступила в редакцию: 22.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 28.10.2021 г.

Статья принята в работу: 01.11.2021 г.