

Система измерения электродинамических характеристик материалов в широком диапазоне внешних воздействий

А.И. Малкин, А.Н. Коротков, В.А. Чечеткин, Н.С. Князев

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Аннотация: в работе описываются возможности разработанного измерительного комплекса для исследования электродинамических параметров материалов и использование полученных результатов при разработке новых материалов и изделий на их основе.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, измерительная система, диапазон частот, цифровой двойник.

1. Введение

В настоящее время мы наблюдаем все возрастающий интерес к новым радиотехническим материалам и расширение сферы их применения. Рост плотности компоновки электронных устройств, тенденция к размещению в одном корпусе устройств, работающих в различных частотных диапазонах, возрастающие требования к стабильности характеристик разрабатываемого устройства в процессе эксплуатации, все это требует знания реальных характеристик материалов во всех возможных режимах его работы и для всех типов внешних воздействующих факторов.

Тенденция к созданию цифровых двойников изделий так же предъявляет требования к набору известных характеристик материалов. При этом ключевым моментом становится информация о частотной зависимости электродинамических параметров используемых материалов, что позволит обеспечить максимальную реалистичность создаваемой цифровой модели в случае имитации воздействия поля электромагнитной волны.

2. Система для измерения электродинамических характеристик в широком диапазоне частот.

Важной составляющей исследования нового материала является наличие возможности измерения исходных характеристик всех входящих в его состав компонентов и соединений. При этом наибольшую ценность для радиотехнических материалов имеет информация об электродинамических характеристиках в широкой полосе частот. Наличие такой информации позволяет строить реалистичные электродинамические модели и минимизировать временные затраты на разработку изделий [1–3].

Внешний вид измерительной системы представлен на рисунке 1. Главное рабочее окно управляющего программного обеспечения разработанной автоматизированной измерительной системы представлено на рисунке 2.

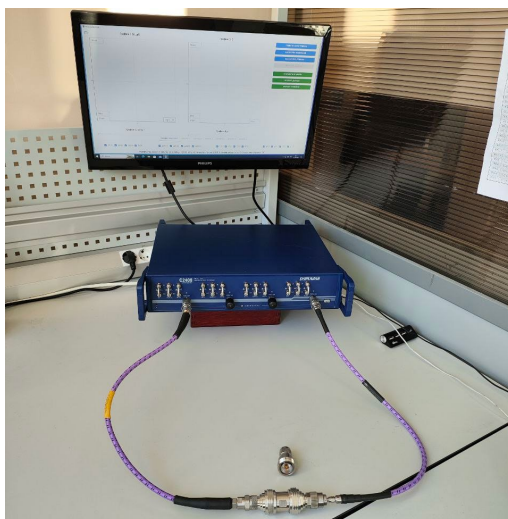


Рисунок 1. Внешний вид разработанной автоматизированной измерительной системы

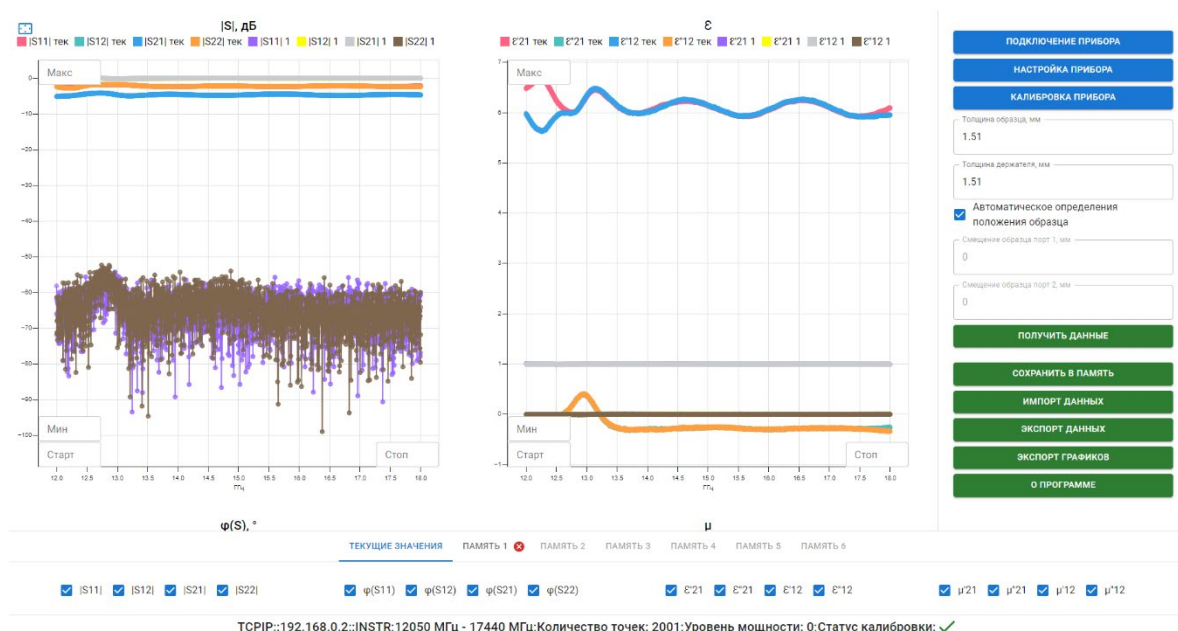


Рисунок 2. Главное рабочее окно управляющего программного обеспечения разработанной автоматизированной измерительной системы

Реализованная система позволяет выстроить процесс измерения таким образом, что оператор не взаимодействует с измерительным оборудованием, все настройки и процедура коррекции систематической ошибки измерительной системы выполняются непосредственно из программного интерфейса управляющего программного обеспечения, что дает возможность устранить источники погрешности измерения, связанные с некорректной настройкой измерительного оборудования. В качестве метода измерения электродинамических характеристик выбран метод линии передачи [4], что позволяет использовать стандартизированные типы линий в качестве измерительной оснастки.

В программном обеспечении реализован механизм автоматического учета положения образца в держателе, что значительно упрощает процедуру выполнения измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей [5].

3. Исследование электродинамических характеристик сыпучих материалов.

Сыпучие материалы являются исходным компонентом практически всех существующих композиционных радиотехнических материалов. Исследование и контроль электродинамических характеристик сыпучих материалов является важным шагом к повышению стабильности технологического процесса получения композиционного материала и позволяет обеспечить решение задачи получения материалов с заданными электродинамическими характеристиками. В рассматриваемой измерительной системе реализован функционал измерения образцов сыпучих материалов, что значительно расширяет область ее применения [6]. На рисунке 3 приведен пример измерения влияния дополнительной термообработки порошка диоксида титана на его электродинамические характеристики, что находит применение при входном контроле поступающего сырья.

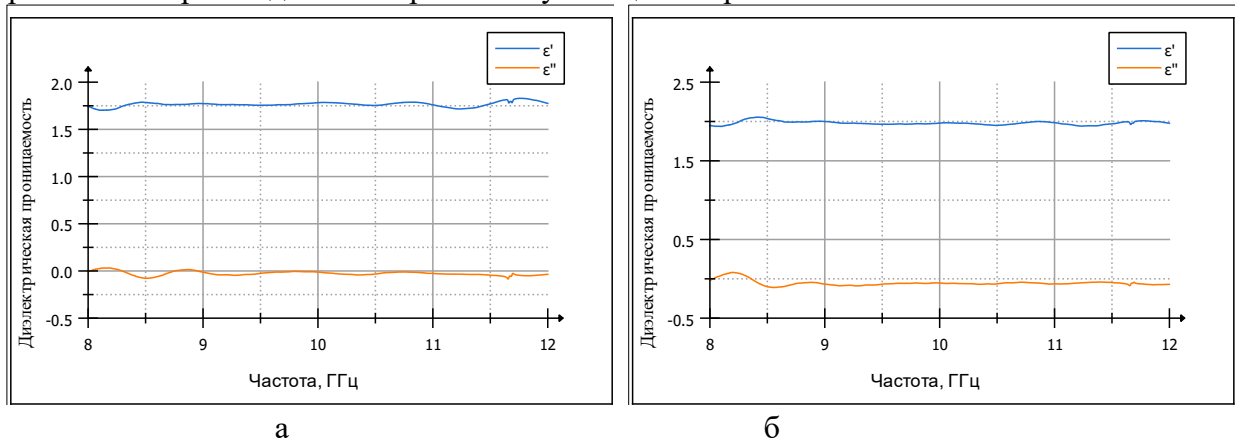


Рисунок 3. Частотная зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости нанопорошка диоксида титана до (а) и после (б) дополнительной обработки при температуре 800 °С.

4. Исследование электродинамических характеристик в диапазоне температур.

Одним из важных факторов, определяющих возможность использования диэлектрических материалов, является температурная стабильность. Однако, широко используемые диэлектрические материалы не обладают высокими коэффициентами теплопередачи и влияние рабочей температуры на электродинамические характеристики устройства становится важным фактором, требующим учета при разработке и моделировании устройств [7, 8].

Изучение температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот позволяет получить информацию об изменении характеристик материалов и учесть это поведение в процессе разработки и моделирования устройства [5].

В работе [9] было рассмотрено влияние температурного расширения измерительной оснастки на результат измерения и возможные пути минимизации этого эффекта.

Помимо расширения используемой линии передачи и измерительной оснастки в процессе нагрева также происходит термическое расширение образца за счет нагрева его объема. Следует уточнить, что для корректного определения электродинамических характеристик материала в измерительной системе на основе линии передачи необходимо обеспечить сдвиг опорной плоскости измерения непосредственно к поверхности образца. На рисунках 4 и 5 приведены частотная зависимость комплексных относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей при температурном воздействии, измеренные с использованием функции автоматического

определения положения образца исследуемого материала в держателе. Более подробно данный функционал описан в работе [5]

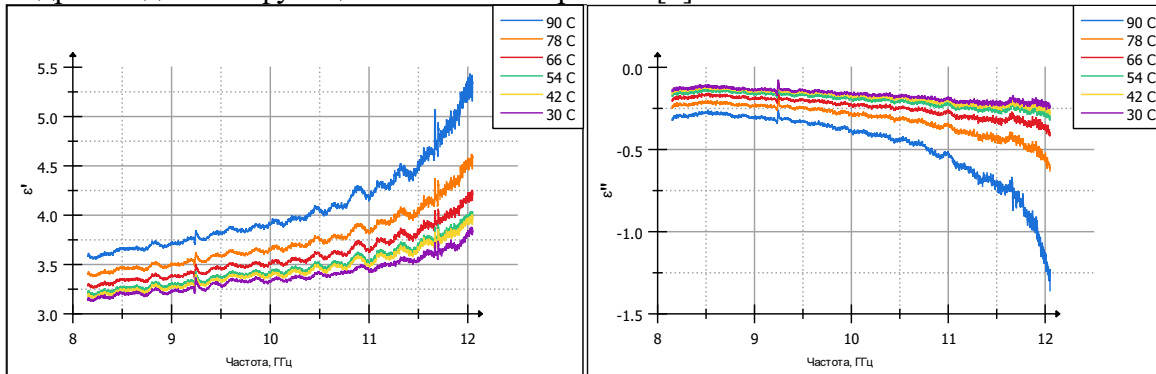


Рисунок 4. Частотная характеристика действительной и мнимой части относительной диэлектрической проницаемости в зависимости от температуры исследуемого образца

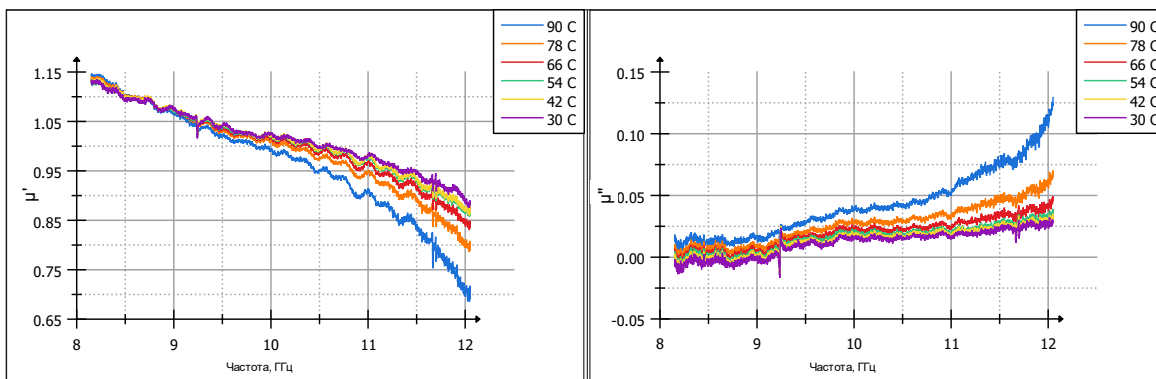


Рисунок 5. Частотная характеристика действительной и мнимой части относительной магнитной проницаемости в зависимости от температуры исследуемого образца

5. Исследование электродинамических характеристик при воздействии внешних агрессивных сред

При определении возможности использования диэлектрического материала для решения определенных задач важным является не только определение его электродинамических параметров в нормальных условиях, но и исследование влияния на его характеристики различных внешних воздействий. Например, биологические и химические загрязнители, которые могут при эксплуатации попадать на поверхность изделия из исследуемого материала, способны вызывать изменения комплексной диэлектрической проницаемости материала.

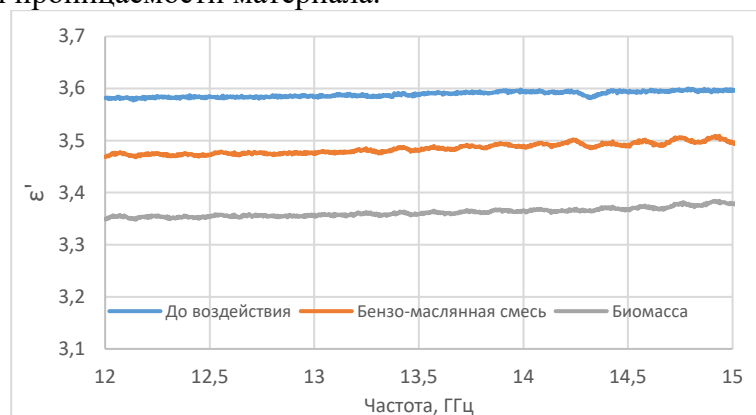


Рисунок 6. Частотная характеристика действительной части относительной диэлектрической проницаемости в зависимости от воздействия внешней химически агрессивной среды [10].

Проведенные исследования, результаты которых представлены на рисунке 6, показывают необходимость контроля параметров материалов при реальных условиях эксплуатации для возможной дальнейшей коррекции параметров разрабатываемой системы с целью уменьшения влияния изменения электродинамических характеристик используемых материалов на деградацию изначальных характеристик устройства.

Заключение

Рассмотренная в статье измерительная система позволяет обеспечить полное исследование электродинамических характеристик как получаемых композиционных материалов, так и всех их исходных составляющих. Получаемая информация позволяет значительно сократить срок создания композиционных материалов с заданным электродинамическими характеристиками, а также повысить достоверность электродинамической модели изделия, в состав которого входят исследуемые материалы.

Список литературы

1. Knyazev N.S., Malkin A.I. Dielectric permittivity and permeability measurement system. 2017. P. 45–51.
2. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1970. Vol. 19, № 4. P. 377–382.
3. Weir W.B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies // Proceedings of the IEEE. 1974. Vol. 62, № 1. P. 33–36.
4. Baker-Jarvis J. Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurement. National institute of standards and technology, 1990.
5. Malkin A.I. et al. Peculiarities of Measurement of Relative Permittivity of Materials Considering External Influencing Factors // 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). 2023. P. 740–743.
6. Malkin A., Korotkov A., Knyazev S. Measurement of Electrodynamic Parameters of Powder Materials // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). 2019. P. 409–411.
7. Takahashi K. et al. Complex Permittivity Measurements in a Wide Temperature Range for Printed Circuit Board Material Used in Millimeter Wave Band // 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2020. P. 938–945.
8. Burger S., Taute W., Höft M. Accurate permittivity measurement of PTFE. 2018. P. 3433 p.
9. Malkin A. et al. Measuring system for studying the frequency dependence of the complex permittivity of dielectric solids and bulk materials in the temperature range // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). 2022. P. 156–159.
10. Malkin A. et al. The Method for Measuring the Permittivity to Assess the Influence of External Factors. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021.