

Исследование электрофизических характеристик магнитных материалов методом коаксиальной измерительной линии

Разработан измерительный стенд на основе метода коаксиальной измерительной линии, предназначенный для измерения комплексных магнитной и диэлектрической проницаемости в диапазонах частот $10^7 \dots 10^{10}$ Гц. В качестве аппаратного обеспечения стенда использован векторный анализатор цепей ZVA-8 производства компании Rohde&Schwarz. Программное обеспечение для съема и обработки данных разработано в среде NI LabVIEW.

Ключевые слова: магнитные материалы, коаксиальная измерительная линия, электрофизические характеристики, векторный анализатор цепей

Применение современных магнитных материалов, включая композиты, задает требования к их электрофизическим характеристикам, таким как комплексные магнитная и диэлектрическая проницаемости [1]. На низких частотах наиболее широко используются емкостной и индуктивный методы, что обусловлено их простотой и доступностью [2-4]. Для измерения электрофизических характеристик в микроволновом диапазоне может быть использован метод коаксиальной измерительной линии. Он основан на определении комплексных коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны при помещении образца в секции линии путем измерения комплексных параметров рассеяния S_{11} и S_{21} с использованием векторного анализатора цепей [5].

Измерительный стенд состоял из векторного анализатора Rohde&Schwarz ZVA-8 (рис. 1), персонального компьютера ПК с автоматизированной программой сбора и обработки данных на основе NI LabVIEW (рис. 2), контроллера GPIB-USB и коаксиальной измерительной линии. Коаксиальная измерительная линия (рис. 3) изготовлена из бронзы с гальваническим покрытием золотом. Образец материала для проведения измерений представляет собой полый цилиндр длиной 9 мм с внешним диаметром 7 мм и внутренним 3 мм (рис. 3). Исследуемый образец были изготовлен из марганец-цинкового феррита марки 2000 НМ.

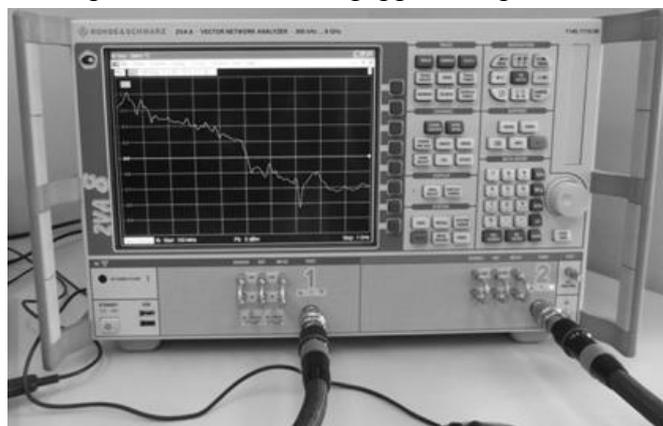


Рисунок 1.

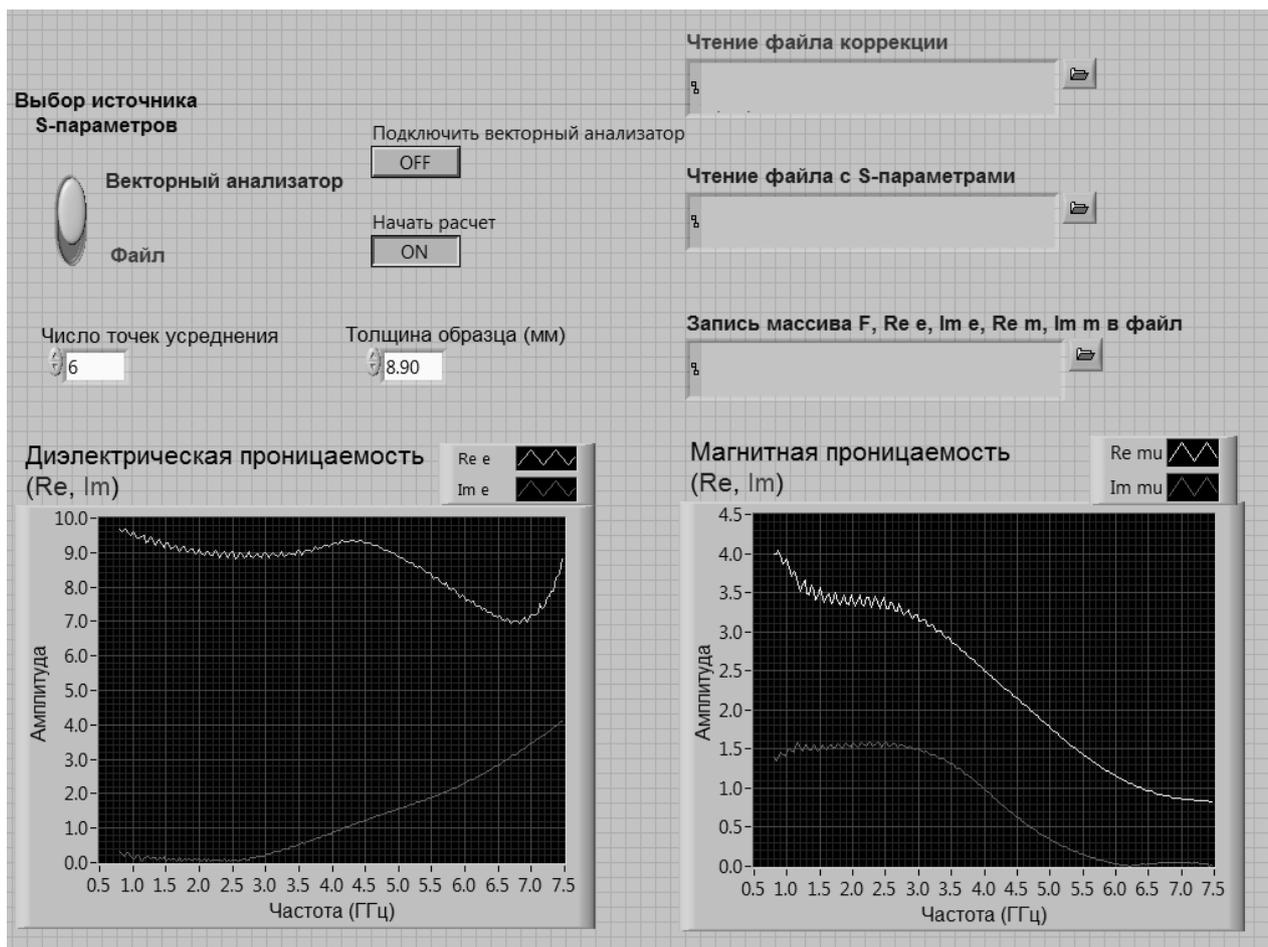


Рисунок 2.

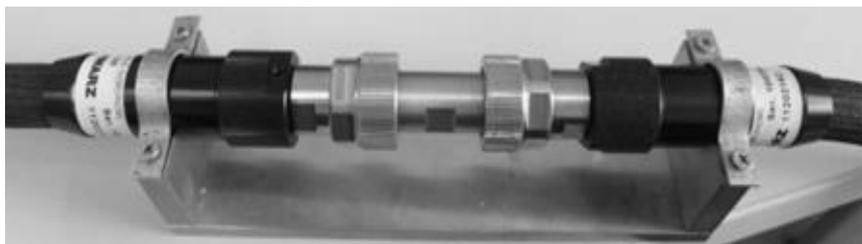


Рисунок 3.

Для расчета электрофизических характеристик с использованием данных измерений был использован алгоритм Николсона-Росса [5]. Расчет комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, использующий алгоритм Николсона-Росса, основан на решении следующего уравнения:

$$\varepsilon_r \mu_r / \lambda_0^2 = - (1/2\pi L \ln(1/T))^2,$$

где ε_r – комплексная диэлектрическая проницаемость, μ_r – комплексная магнитная проницаемость, λ_0 – длина волны в вакууме, L – длина образца, T – коэффициент пропускания, найденный из измеренных параметров S_{11} и S_{21} . Данное уравнение содержит комплексный логарифм $\ln(1/T)$, мнимая часть которого равна $j(\theta + 2\pi n)$, где n – целая часть отношения (L/λ_g) , $n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$. В данной работе для решения неопределенности было использовано начальное

предположение, что $n = 0$. Для достижения непрерывных зависимостей электрофизических характеристик при расчете последующих точек зависимостей были использованы предыдущие значения (сдвиговый регистр).

Процесс калибровки измерительного стенда представлял собой стандартную процедуру TOSM [5] (прохождение, холостой ход, короткое замыкание и согласованная нагрузка линии) и загрузку файла коррекции, основанного на результатах контрольных измерений образца, выполненных в ГНЦ ФГУП "ЦНИИ КМ "Прометей" с использованием аттестованного стенда с коаксиальной линией. Результаты измерений образца на основе марганец-цинкового феррита представлены на рисунках 4 и 5.

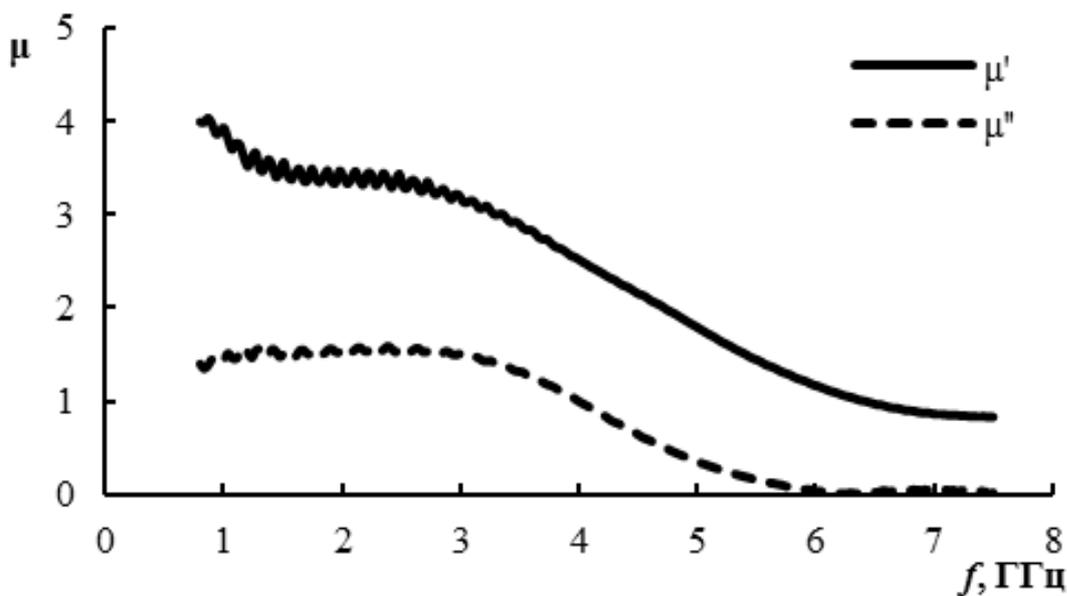


Рисунок 4.

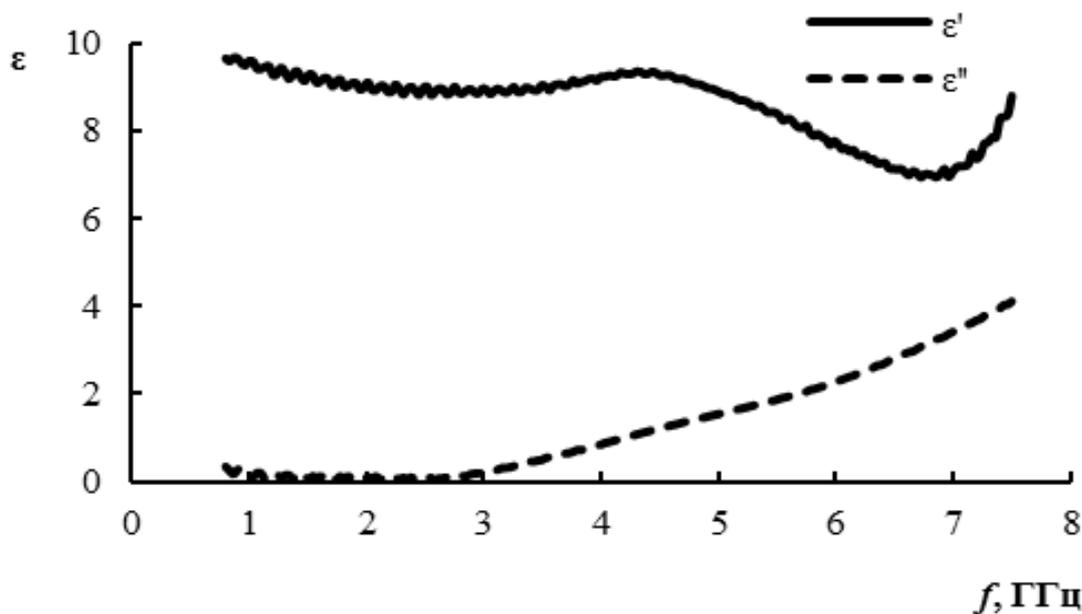


Рисунок 5.

Как видно из представленных экспериментальных зависимостей электрофизических характеристик, магнитные свойства композита на основе феррита 2000 НМ ухудшаются на частотах выше 4 ГГц при сохранении диэлектрических свойств. Полученный результат можно объяснить преимущественным вкладом изолирующего связующего в диэлектрические свойства и наличием магнитных потерь в области естественного ферромагнитного резонанса марганец-цинкового феррита. При этом до достижения граничной частоты сигнала материал проявляет свойства, характерные для промышленных магнитодиэлектриков, в которых изолирующее связующее обычно определяет значения диэлектрической и магнитной проницаемостей [1].

Авторы выражают свою благодарность к.ф.-м.н., с.н.с. Луцеву Леониду Владимировичу (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН) и к.т.н. Голубкову Алексею Григорьевичу (ООО «ИМЦ») за помощь в разработке программного обеспечения и подготовку образцов соответственно.

Библиографический список

1. К.Г. Гареев, В.П. Мирошкин. Физические основы магнитных материалов. Под общ. ред. В.П. Мирошкина. Санкт-Петербург. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. 408 с.
2. K.C. Yaw, "Measurement of Dielectric Material Properties," Application Note. Rohde & Schwarz. Germany. 2012. 36 p.
3. Agilent Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance Analyzers. Application Note 1369-1. Publication No. 5980-2862EN. USA. 2014. 25 p.
4. Основы измерения диэлектрических свойств материалов. Application notes. Publication No. 5989-2589. Agilent Technologies, Inc. США. 2010. 32 с.
5. Vector network analyzer R&S® ZVA 8 / ZVA 24. Инструкция по эксплуатации. Rohde&Schwarz. Германия. 2012. 810 с.
6. S. Dubrovskiy, K. Gareev. Measurement Method for Detecting Magnetic and Dielectric Properties of Composite Materials at Microwave Frequencies. Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electroinc Engineering Confernce. Saint Petersburg. February 2-4. 2015. P. 24-26.