

# Оптимизация технологии получения радиопоглощающих материалов на основании измерений $S$ -параметров образцов в коаксиальной линии передачи

С.А. Леухин<sup>1,2</sup>, Н.В. Соннов<sup>1,2</sup>, О.А. Тестов<sup>1</sup>, К.Г. Гареев<sup>1</sup>, И.О. Тестов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>ОАО «Завод Магнетон»

**Аннотация:** в работе опробована экспресс-методика оптимизации технологии создания радиопоглощающих материалов, получаемых методом литья в форму. Получены и исследованы образцы, различающиеся по компонентному составу и концентрации наполнителей. Представлены частотные зависимости параметров  $S_{11}$  и  $S_{21}$  в диапазоне частот 0,1–5,0 ГГц. Показана возможность применения коаксиальной линии передачи для оптимизации процесса формирования слоя радиопоглощающего композиционного материала на элементе радиоэлектронной аппаратуры.

**Ключевые слова:** радиопоглощающий материал, композитный материал, экспресс-методика, оптимизация технологии, коаксиальная линия передачи,  $S$ -параметры.

## 1. Введение

Актуальной задачей требующей решения при создании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является обеспечение электромагнитной совместимости компонентов, входящих в ее состав [1]. При этом защита элемента или части схемы от воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) часто возникает в процессе эксплуатации готового изделия. Эффективный метод, позволяющий изолировать локальную область, заключается в заполнении свободного пространства вокруг нее радиопоглощающим композитным материалом (РКМ) на полимерной основе, которое может быть реализовано методом литья в форму. Такой подход позволяет сократить время, затрачиваемое на решение задачи защиты РЭА от воздействия ЭМИ. Эффективность применения материала в качестве РКМ можно оценить по частотным зависимостям параметров  $S_{11}$  и  $S_{21}$ . Сокращение времени подбора состава РКМ может быть достигнуто путем выбора метода исследований образцов, обеспечивающего высокую точность при максимально возможном количестве измеряемых параметров. Такие возможности обеспечивают измерения при помощи коаксиальной линии передачи, для проведения испытаний в которой требуется небольшой объем материала.

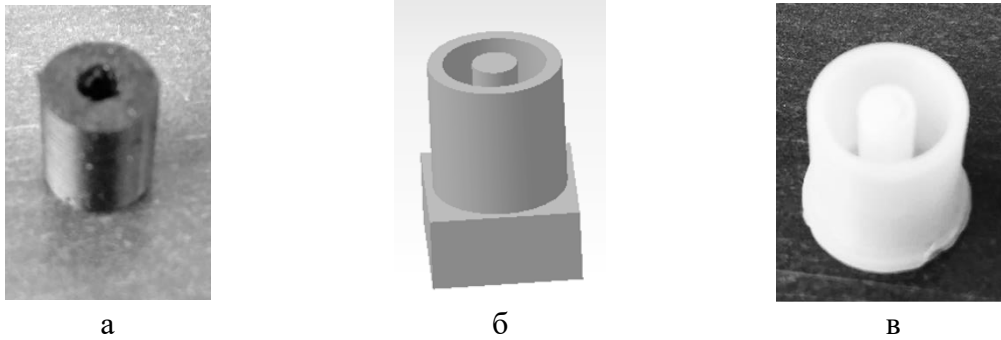
Целью настоящей работы является исследование путей оптимизации метода литья в форму, позволяющих производить образцы РКМ, обеспечивающих требуемый уровень защиты РЭА от воздействия ЭМИ в заданном диапазоне частот, на основании измерений  $S$ -параметров образцов в коаксиальной линии передачи.

## 2. Получение и исследование образцов РКМ

Для исследования в коаксиальной линии передачи используются образцы РКМ, представляющие собой полые цилиндры с внешним и внутренним диаметрами соответственно 6,95 и 3,05 мм, высотой 9 мм (рисунок 1а). Образцы для исследований, также, как и материал для защиты РЭА от воздействия ЭМИ, были изготовлены одним и тем же методом – литья в форму. В качестве наполнителей РКМ использовались карбонильное железо (КЖ) марки Р-20 по ГОСТ 13610-79, ферриты марок Д1 и 6000 НМ

(ОАО «Завод Магнетон», Россия). Для каждого из выбранных материалов потери энергии ЭМИ максимальны в различных частотных диапазонах.

В качестве связующего применялась мягкая эпоксидная смола марки ERF и отвердитель марки HRF (ООО «Аксель», Россия). Полимеризация эпоксидной смолы в нормальных климатических условиях позволяет обеспечивать экранирование элемента РЭА даже без его демонтажа. Формы для литья разрабатывались в системе автоматизированного проектирования КОМПАС 3D (АО «Аскон», Россия) и были получены методом 3D-печати (рисунок 1б, в). Составы исследуемых образцов приведены в таблице 1.

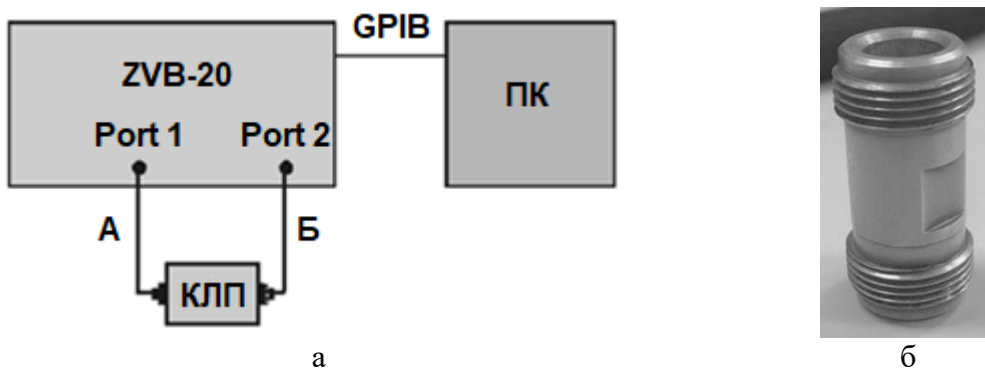


**Рисунок 1.** Образец и форма для его изготовления: а – вид образца; б – трехмерная модель формы, в – вид формы.

**Таблица 1.** Составы образцов

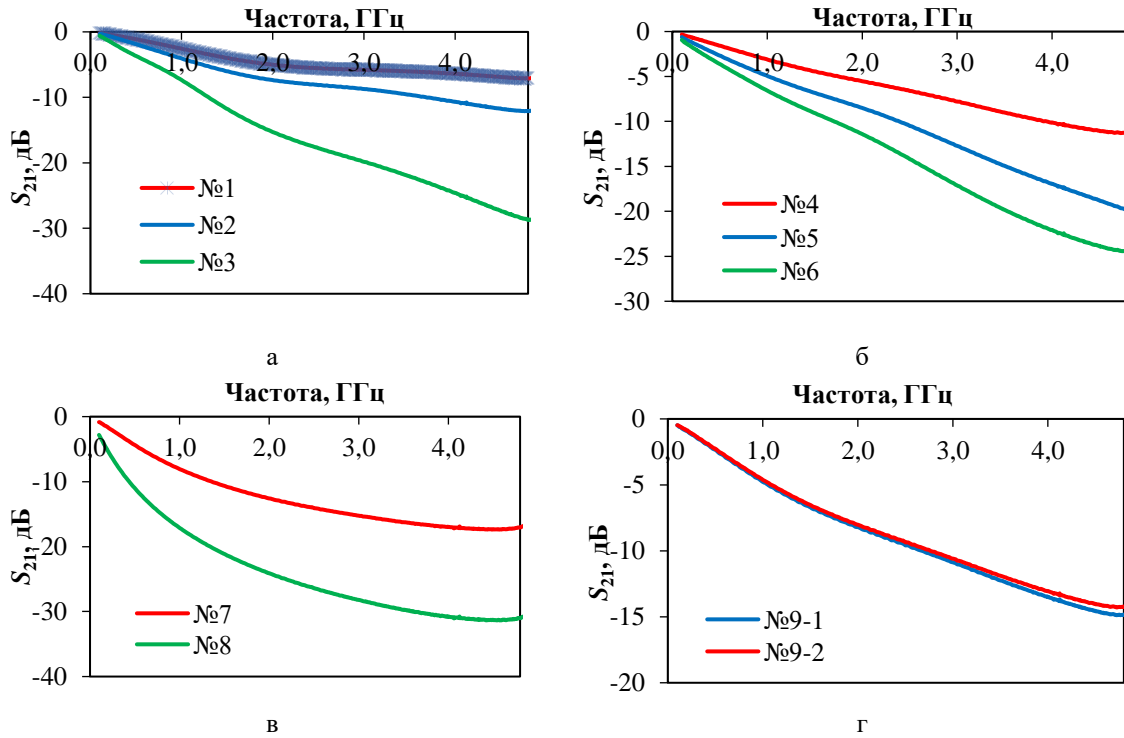
№ состава	Массовая доля, %			
	КЖ	Наполнитель		Связующее
		Д1	6000НМ	
1	70	-	-	30
2	80	-	-	20
3	90	-	-	10
4	-	70	-	30
5	-	80	-	20
6	-	90	-	10
7	-	-	70	30
8	-	-	90	10
9	35	35	10	20

Измерения параметров  $S_{11}$  и  $S_{21}$  производились при помощи стенда с использованием коаксиальной линии передачи (рисунок 2).

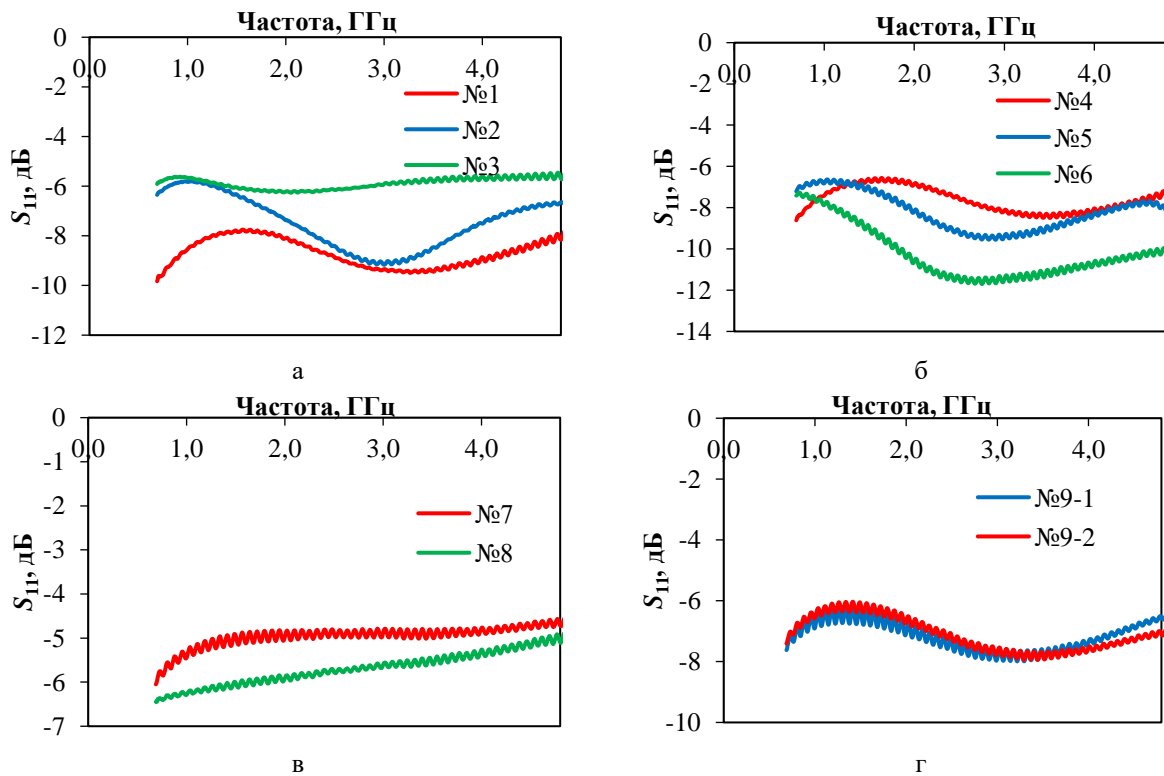


**Рисунок 2.** Стенд для измерения электродинамических параметров образцов: а – структурная схема; б – вид коаксиальной измерительной ячейки; ZVB-20 – векторный анализатор (Rhode&Schwarz, Германия); ПК – персональный компьютер; КЛП – коаксиальная измерительная ячейка; А, Б – кабели высокочастотные; GPIB – шина передачи данных.

Для каждого состава была изготовлена серия образцов. На рисунках 3 и 4 приведены характерные частотные зависимости параметров  $S_{11}$  и  $S_{21}$  соответственно для образцов РКМ с различными компонентными составами. В процессе измерений каждой серии значения параметров образцов расходились не более чем на 6%.



**Рисунок 3.** Характерные частотные зависимости параметра  $S_{21}$  для образцов на основе: а – карбонильного железа, б – феррита марки Д1, в – феррита марки 6000НМ, г – карбонильного железа, ферритов марок Д1 и 6000НМ, взятых в массовом соотношении 3,5:3,5:1.



**Рисунок 4.** Характерные частотные зависимости параметра  $S_{11}$  для образцов на основе: а – карбонильного железа, б – феррита марки Д1, в – феррита марки 6000НМ, г – карбонильного железа, ферритов марок Д1 и 6000НМ, взятых в массовом соотношении 3,5:3,5:1.

Полученные результаты соответствуют данным, приведенным в технической литературе [2, 3], что подтверждает возможность использования выбранного подхода для оптимизации процесса формирования слоя РКМ на элементе РЭА. Увеличение массового содержания наполнителя в составе РКМ приводит к снижению параметра  $S_{21}$ . При этом образцы на основе феррита марки 6000НМ обеспечивают наименьшие значения  $S_{21}$  в исследуемом диапазоне частот. Образец на основе смеси наполнителей показывает меньшие значения  $S_{21}$  по сравнению с образцами на основе КЖ и Д1. Наименьшие значения параметра  $S_{11}$  имеют образцы, содержащие Д1.

### 3. Заключение

В результате проведения исследований была опробована экспресс-методика оптимизации технологии литья в форму РКМ, предназначенных для решения задачи электромагнитной совместимости. Методика позволяет установить различие между  $S$ -параметрами образцов РКМ при варьировании массовой концентрации компонентов.

#### Список литературы

1. Латыпова А. Ф., Калинин Ю. Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник ВГТУ. — 2012. — №6. — С. 70–76.
2. Wang, M. Absorption properties of carbonyl-iron / M. Wang, [at al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials — 2009. — Vol. 321. — P. 3442 – 3446.
3. Baoshan, Z. Microwave-absorbing properties of de-aggregated flake-shaped carbonyl-iron particle composites at 2–18 GHz / Z. Baoshan, [at al.] // Transactions on magnetics — 2006 — Vol. 42. — NO. 7. — P. 1778 – 1781.