

*Ковалева И.К., Гареев К.Г., Иваница М.Г.,  
Леонтьев А.А., Соннов Н.В., Тестов И.О.,  
Тестов О.А., Хорошенкова Е.К.*

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»*

## **Испытание радиоэкранирующих свойств композиций на основе гелей с распределенными магнитными частицами**

*Представлены результаты экспериментальных исследований радиоэкранирующих свойств композиций на основе полиметилсилоксана полигидрата с распределенными частицами феррита марки ЗСЧ. Измерение коэффициента экранирования производилось с использованием методик, основанных на копланарном волноводе и на рупорных антеннах. Установлено, что полученная композиция при толщине слоя 6 мм обеспечивает коэффициент экранирования электромагнитной волны 6–52 дБ в диапазоне частот 2–18 ГГц.*

**Ключевые слова:** Электромагнитное экранирование, гидрогель, феррит, полиэтилен, линия передачи, рупорная антенна, копланарный волновод.

Нормативная документация Российской Федерации устанавливает, что испытания поглотителей электромагнитных волн в диапазоне частот 0,4–37,5 ГГц основаны на измерении коэффициента отражения с использованием рупорной приемопередающей антенны [1]. Образец испытываемого материала располагают на определенном расстоянии от окружающих предметов, которое зависит от максимальной длины волны  $\lambda_{\max}$  в исследуемом диапазоне частот радиоволн и не может быть менее  $10 \lambda_{\max}$ . При этом пространство за образцом должно быть закрыто радиопоглощающим экраном размерами не менее  $5\lambda_{\max} \times 5\lambda_{\max}$ . Таким образом, в соответствии с нормативной документацией, измерения коэффициента отражения требуют наличия протяженного пространства и применения большого количества радиопоглощающих материалов, что является достаточно трудоемкой задачей в условиях проведения лабораторных испытаний.

Альтернативными методиками оценки электродинамических характеристик радиопоглощающих материалов являются измерения, основанные на использовании линий передачи различных типов. В этом случае образец помещается в секцию линии передачи (например, коаксиального, копланарного волновода или в раскрыв рупорных антенн [2]), что приводит к изменению волнового сопротивления данной секции и, следовательно, к изменению коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны, частотная зависимость которых измеряется с использованием векторного анализатора цепей [3]. Применение методик, основанных на линиях передачи, позволяет производить предварительные и оценочные измерения коэффициента экранирования с применением компактных настольных стендов с использованием сравнительно малых количеств исследуемых материалов.

Традиционные поглотители электромагнитных волн обеспечивают эффективное поглощение при толщине слоев материала, кратной четверти длины волны электромагнитного излучения [4]. Разработка композиций на основе гелей с магнитными

частицами может позволить создать широкодиапазонный электромагнитный экран, который может быть альтернативой использованию сложной многослойной конструкции, обычно применяемой для решения этой задачи. Использование в качестве матрицы для внедрения наполнителей биологически инертного геля обеспечивает совместимость экранирующей композиции с биологическими объектами [5].

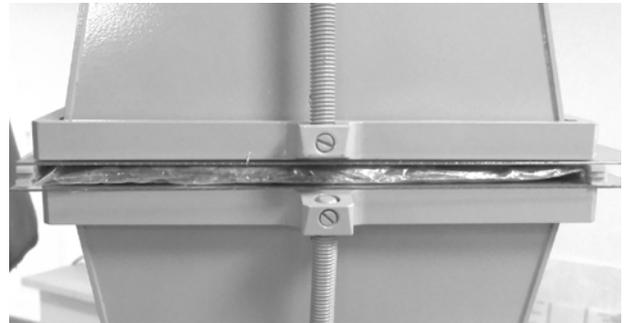
В настоящей работе исследовали экранирующие свойства композиции на основе частиц феррита марки ЗСЧ (ОАО «Завод «Магнетон», Россия), распределенных в биологически инертном геле из полиметилсилоксана полигидрата (торговая марка «Энтеросгель», ООО «ТНК СИЛМА», Россия). Полиметилсилоксана полигидрат и феррит смешивались в пропорции по массе 2:1 соответственно. Полученная гомогенная смесь с целью предотвращения удаления воды помещалась в оболочку из полиэтилена с последующей герметизацией запаиванием. Размеры образца, предназначенного для испытания в копланарной измерительной ячейке, составляли в плоскости  $60 \times 40$  мм (масса образца 22,5 г), размеры образца, предназначенного для испытания в рупорной измерительной ячейке на основе антенн П6-124 (ЗАО «СКАРД-Электроникс», Россия) –  $170 \times 170$  мм (масса образца 275 г). Внешний вид исследуемых образцов приведен на рисунке 1. Вид используемых измерительных ячеек с установленным образцом приведен на рисунке 2.



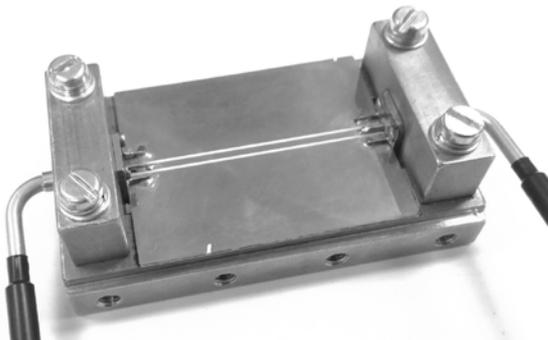
Рис. 1. Внешний вид исследуемых образцов: а – для рупорной измерительной ячейки, б – для копланарной измерительной ячейки.



а



б



в

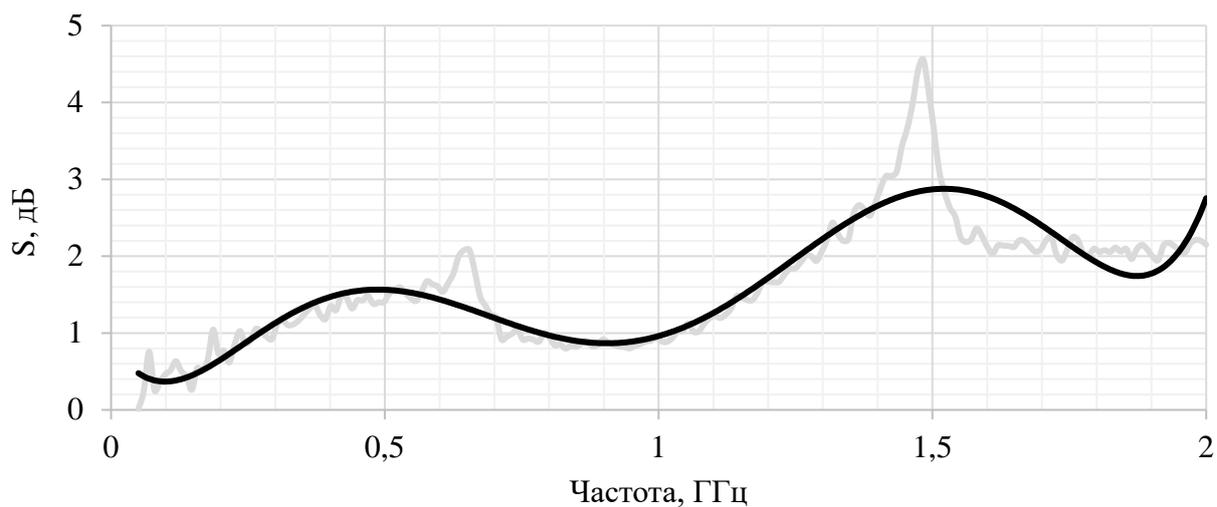


г

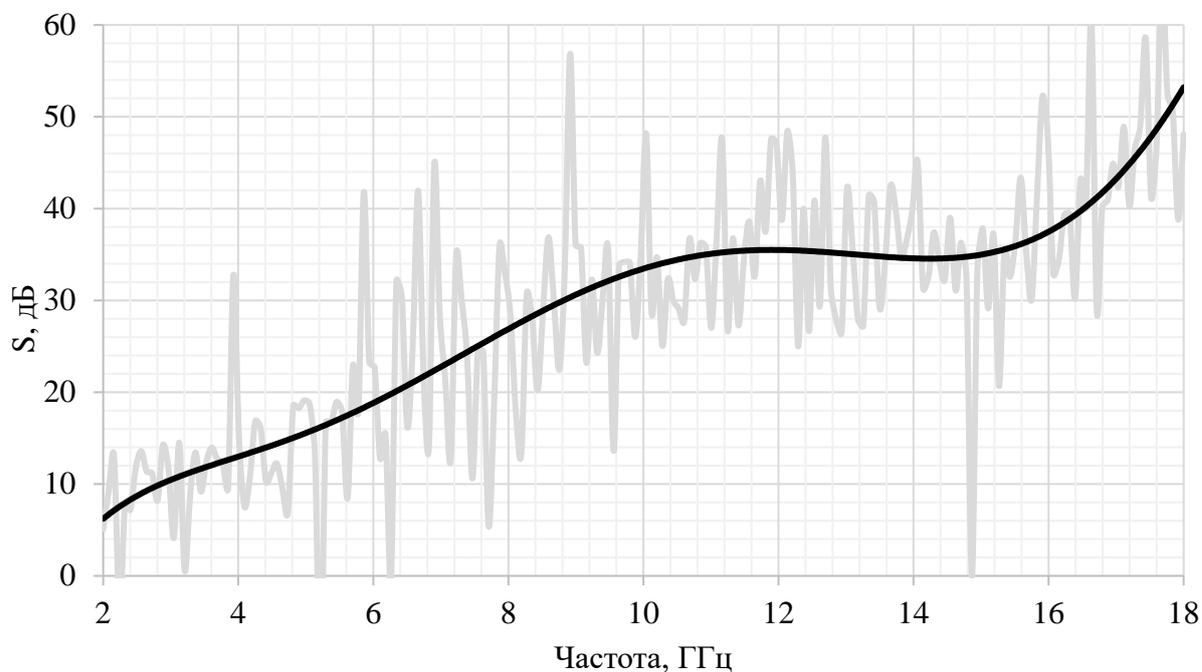
Рис. 2. Внешний вид измерительных ячеек: а – рупорной ячейки, б – рупорной ячейки с образцом, в – копланарной ячейки без образца, г – копланарной ячейки с образцом.

Испытания проводили с использованием векторного анализатора цепей ZVB-20 («Rhode&Schwarz», ФРГ) с частотным диапазоном от 10 МГц до 20 ГГц. При помощи векторного анализатора измерялись зависимости модуля комплексного коэффициента рассеяния  $S_{21}$ . Результирующий спектр (в дБ) представляет собой арифметическую разность между спектром при отсутствии испытуемого образца  $|S_{21}|_{пуст}$  и спектром при его наличии  $|S_{21}|_{обр}$ :  $S = |S_{21}|_{обр} - |S_{21}|_{пуст}$ , что соответствует значению коэффициенту экранирования электрического поля в дБ. Измерения с использованием копланарной измерительной ячейки (см. рис. 2, б) производили в частотном диапазоне 50–2000 МГц, измерения с использованием рупорной ячейки (см. рис. 2, а) – в диапазоне 2–18 ГГц.

Полученные частотные зависимости коэффициента экранирования приведены на рисунке 3. Экспериментальные точки аппроксимированы полиномом шестой степени для уменьшения влияния переотражений в измерительных ячейках.



а



б

Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента экранирования, полученные с использованием измерительных ячеек: а – копланарной, б – рупорной.

Как видно из полученных экспериментальных результатов, образец композиции на основе частиц феррита марки ЗСЧ, распределенных в геле из полиметилсилоксана полигидрата, при толщине 6 мм обеспечивает коэффициент экранирования от 6 дБ на частоте 2 ГГц до 52 дБ на частоте 18 ГГц. Результаты измерений с использованием копланарной ячейки показывают, что образец толщиной 3 мм обеспечивает коэффициент экранирования 2 дБ на частоте 2 ГГц, что коррелирует с результатами, полученными с использованием рупорной измерительной ячейки. Повышение достоверности получаемых экспериментальных результатов может быть достигнуто при помощи калибровки измерительных ячеек с использованием эталонных образцов с известными электродинамическими характеристиками.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 30381. Совместимость технических средств электромагнитная. Поглотители электромагнитных волн для экранированных камер. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов. 2005. 23 с.
2. Андрущенко М.С., Гусаковский В.Е., Штагер Е.А., Штагер Д.Е. Методы расчета средств защиты радиоэлектронных систем от электромагнитного излучения. Монография. Под ред. С. С. Щесняка. СПб.: Изд-во ВВМ. 2016. 310 с.
3. Богуш В.А., Борботько Т.В., Гусинский А.В., Лыньков Л.М., Тамело А.А. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Под ред. Л. М. Лынькова. Мн.: Бестпринт. 2003. 406 с.
4. Сонгсонг Ц., Банний В.А., Самофалов А.Л., Семченко И.В., Хахомов С.А. Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе полимерных композитов и киральных структур. Проблемы физики, математики и техники. № 4 (21). 2014. С. 40–45.
5. Гареев К.Г., Гасников А.О., Ершов М.И., Кондрашов К.К., Лучинин В.В., Петров А.А., Тестов О.А. Обеспечение электромагнитной безопасности объектов биотехносферы. Биотехносфера. № 6(54). 2017. С. 28–53.