

УДК 620.22–026.61

## ГИБКИЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.А.А. АХМЕД, Т.А. ПУЛКО, Н.В. НАСОНОВА, Л.М. ЛЫНЬКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 3 июня 2015

Исследовано влияние состава многослойной конструкции для резонансного поглотителя на характеристики экранирования электромагнитного излучения в диапазоне частот 1,0...17 ГГц. Показано, что пропитка тканых полотен раствором жидкого полярного диэлектрика приводит к изменению условий согласования волнового сопротивления материала и свободного пространства, снижению коэффициента отражения до  $-18...-4$  дБ и сдвигу характеристики в область низких частот 2,7...6,45 ГГц.

*Ключевые слова:* резонансные поглотители, наноструктурированный ферромагнитный микропровод, многослойные конструкции.

### Введение

Поглотители электромагнитных волн применяются в самых различных сферах: маскировка военной техники от радиолокационного обнаружения, предупреждение несанкционированного съема информации по электромагнитному каналу, решение проблем электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, решение проблем биологической электромагнитной безопасности (защита организма человека от электромагнитного излучения (ЭМИ) промышленных и бытовых источников медицинские приборы, вычислительная техника и т.п.).

В последнее время в качестве материалов для создания конструкций экранов и поглотителей электромагнитного излучения используют композиты, содержащие электропроводящие или ферритовые частицы субмикронных размеров. Перспективными методами создания таких материалов являются формирование нанокристаллической структуры в полимерной матрице и использование волокнистых материалов. Исследования в области разработки, синтеза и структурных свойств волокнистых материалов особенно актуальны с точки зрения практического применения, поскольку позволяют реализовать гибкие модульные конструкции экранов электромагнитного излучения.

### Обоснование проведения исследования

Из всего многообразия материалов, применяющихся для экранов и поглотителей ЭМИ, можно выделить составы на основе соединений железа и других металлов, обладающих магнитными потерями – ферромагнетики и ферриты.

Эффект поглощения ЭМИ ферромагнетиками связан с явлением естественного ферромагнитного резонанса (ЕФР), при котором происходит взаимодействие переменного ЭМП с суммарными магнитными моментами макроскопических объемов вещества. При этом положение ЕФР на частотной оси зависит от химического и фазового состава материала, его структурных особенностей.

Для экранирования ЭМИ магнитные материалы могут применяться как в виде спеченных керамических плиток, так и в виде наполнителей, которые распределяются в

диэлектрической матрице – различных полимерах, резинах, каучуках [1–4]. Изготовление микропровода из ферромагнетика и вязывание его в структуру ткани позволяет значительно увеличить технологичность, гибкость и механическую прочность получаемых композиционных материалов (рис. 1) [5, 6].

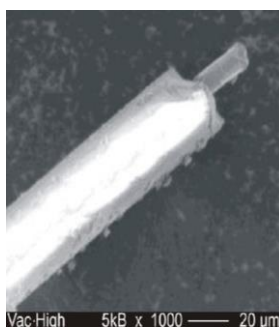


Рис. 1. Электронная микрофотография строения наноструктурного ферромагнитного микропровода в стеклянной изоляции (длина масштабного штриха на снимке – 20 мкм) [5]

Введение в состав композиционных материалов компонентов с резистивными и диэлектрическими потерями позволяет увеличить эффективность и расширить рабочий диапазон частот радиопоглотителей ЭМИ с магнитными включениями [7–9].

В резонансных поглотителях используется механизм компенсации падающих волн и волн, отраженных от проводящих, полупроводящих поверхностей и просто границ раздела воздух-материал с потерями. Расстояние между отражающими поверхностями должно составлять четверть длины волны излучения (в свободном пространстве, если между поверхностями находится воздух, или если пространство заполнено диэлектриком).

### Методика проведения эксперимента

Были разработаны и исследованы образцы экранирующих многослойных конструкций, состоящие из слоя материала с магнито-диэлектрическими потерями, промежуточного и металлизированного слоев (рис. 2).

Для этих целей использовались образцы экранирующих материалов в виде тканых полотен толщиной 0,5 мм с вплетенным ферромагнитным микропроводом. Ткань включает нити, выполненные из наноструктурного ферромагнитного микропровода в стеклянной изоляции, которые скручены при 100...800 кр/м с основными и уточными нитями из натуральных и/или химических волокон и составляют 1,0...3,2 % от поверхностной плотности ткани [10]. Аморфный наноструктурный ферромагнитный микропровод в стеклянной изоляции состоит из ферромагнитного сплава Fe, Co, Ni и металлоида В, Si, С. В низкочастотном диапазоне 30...100 МГц ослабление ЭМИ такой тканью составляет 20...40 дБ.

В качестве промежуточного слоя применялся вспененный самозатухающий полиэтилен с закрытыми воздушными порами, с одной стороны покрытый алюминием высокого качества, толщиной 14 мкм и чистотой 99,4 %.

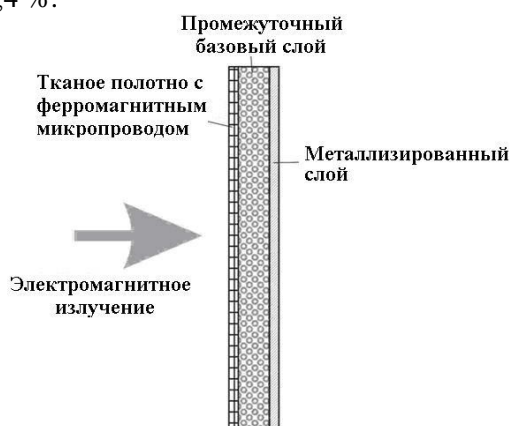


Рис. 2. Схема многослойной конструкции

Исследование экранирующих характеристик образцов резонансных поглотителей в виде одно- и многослойных конструкций различной толщины проводилось в диапазоне частот 1,0...17,0 ГГц. Описание структуры экранирующих конструкций представлены в таблице.

**Описание образцов экранирующих трехслойных конструкций для резонансного поглотителя**

№ образца	Описание эксперимента	Толщина, мм	Растворный наполнитель
Эксперимент 1			
1	тканое полотно / промежуточный слой / металлизированный слой	20	–
2	тканое полотно / промежуточный слой / металлизированный слой	20	45% mass. p-p щелочноземельного металла
Эксперимент 2			
3	тканое полотно / промежуточный слой / металлизированный слой	20	–
4	тканое полотно	0,5	–
5	тканое полотно / промежуточный слой / металлизированный слой	50	–
Эксперимент 3			
6	тканое полотно / промежуточный слой / металлизированный слой	50	45% mass. p-p щелочноземельного металла
7	тканое полотно	0,5	45% mass. p-p щелочноземельного металла
8	тканое полотно / промежуточный слой / металлизированный слой	20	45% mass. p-p щелочноземельного металла

Измерение экранирующих характеристик выполнялось в панорамном режиме измерения КСВН и ослабления. Калибровка приборов осуществлялась во всем рабочем диапазоне частот по стандартной методике после установки диапазона качания частоты и уровня падающей мощности.

Оценка эффективности экранирования уровня электромагнитных излучений исследуемых образцов проводилась в лабораторных условиях с помощью измерительного комплекса SNA 0,01...18 в диапазоне частот 0,5...18 ГГц, выбранном с учетом дальнейшего применения экранов электромагнитного излучения.

В ходе измерений исследуемые образцы экранирующих трехслойных конструкций 1–8, описание которых приведено в таблице, закреплялись между фланцев волноводов измерительного тракта, как показано на рис. 3. Измерения проводились как отдельно установленного образца экрана, так и образца экрана с металлическим отражателем. В ходе измерений были получены частотные зависимости коэффициентов передачи  $S_{21}$  (по модулю равен значению ослабления электромагнитного излучения) и отражения  $S_{11}$ .

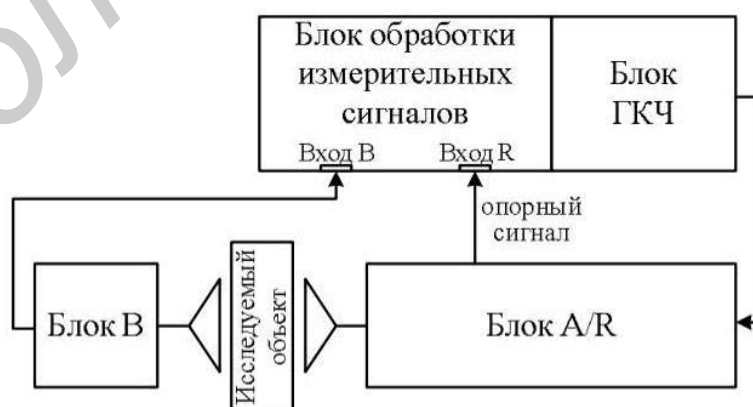


Рис. 3. Схема установки в режиме измерения ослабления ЭМИ

## Обсуждение результатов

Частотные зависимости коэффициента отражения и ослабления ЭМИ описанных образцов экранирующих конструкций представлены на рис. 4.

В диапазоне частот 3...17 дБ наблюдается снижение величины ослабления ЭМИ с повышением частоты для всех образцов. Ослабление ЭМИ водосодержащими образцами превышает величину ослабления ЭМИ исходными ткаными полонями с ферромагнитным микропроводом на 2...3 дБ. Как показывают результаты измерений, пропитка тканых полотен раствором жидкого полярного диэлектрика приводит к изменению условий согласования волнового сопротивления материала и свободного пространства, снижению коэффициента отражения до -18...-4 дБ и сдвигу характеристики в область низких частот 2,7...6,45 ГГц.

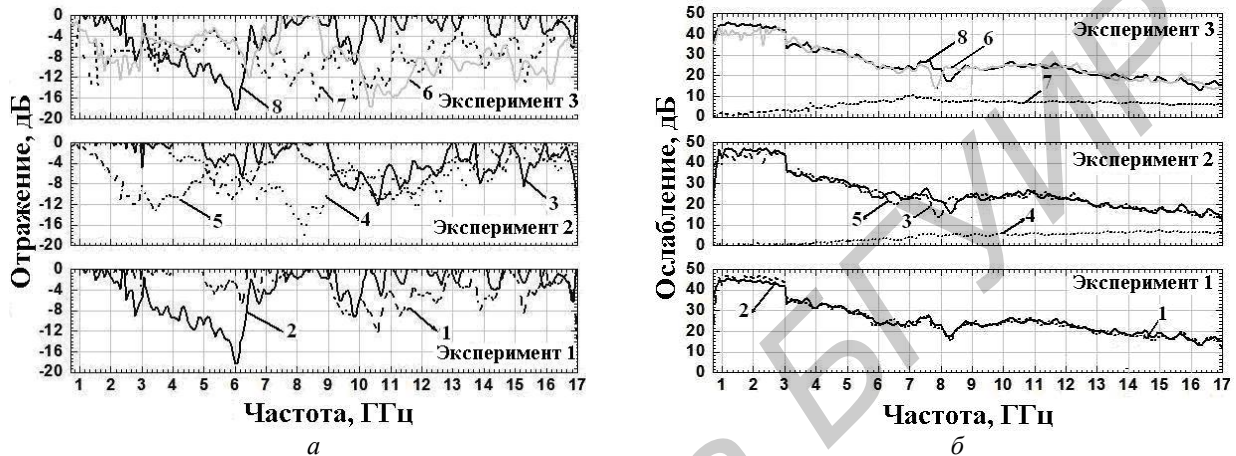


Рис. 4. Экранирующие характеристики одно- и многослойных конструкций для резонансных поглотителей ЭМИ в диапазоне 0,7...17,0 ГГц: а – коэффициент отражения; б – ослабление ЭМИ

Исследовалось поглощение ЭМИ образцами экранирующих многослойных конструкций для резонансного поглотителя в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц (рис. 5).

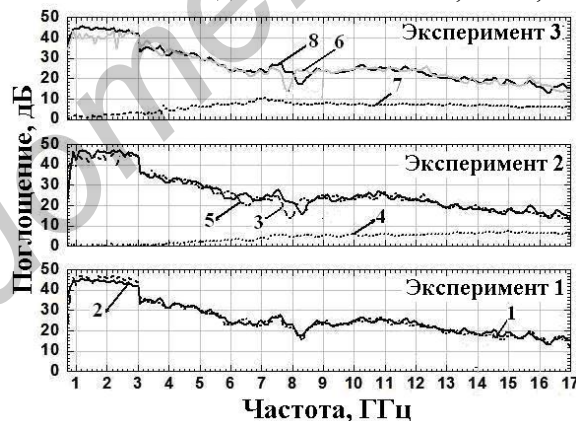


Рис. 5. Поглощение ЭМИ одно- и многослойными экранирующими конструкциями для резонансных поглотителей ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц

Как следует из рис. 5, в диапазоне 0,5...3 ГГц наблюдается стабильный уровень поглощения ЭМИ всеми образцами и составляет порядка 45 дБ. С увеличением частоты до 17 ГГц уровень поглощения ЭМИ снижается до 15 дБ и носит слабый резонансный характер.

## Заключение

Создание многослойной конструкции на основе композита с магнитными потерями позволяет дополнительно уменьшать величину коэффициента отражения до -16...-12 дБ и смещать положение минимума области низкого коэффициента отражения на 3,9...4,9 ГГц в зависимости от толщины промежуточного диэлектрического слоя. Дополнительная пропитка первого слоя с магнитными потерями диэлектриком также приводит к смещению резонансных областей поглощения ЭМИ в зависимости от концентрации раствора и толщины

промежуточного слоя диэлектрика. Таким образом, выбирая параметры материала и конструкции, возможно получать характеристику коэффициента отражения менее  $-8$  дБ в требуемом диапазоне частот.

## FLEXIBLE MULTILAYER ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDS

A.A.A. AHMED, T.A. PULKO, N.V. NASONOVA, L.M. LUNKOU

### Abstract

The multilayer construction for resonance absorber content influence on electromagnetic radiation shielding characteristics in frequency range 1.0...17 GHz is researched. It's shown that woven fabric impregnation by liquid polar dielectric results to change of wave resistance harmonization of the material and free space, reflection coefficient reduction to  $-18$ ... $-4$  dB and characteristic shift in low frequency area (2.7...6.45 GHz).

### Список литературы

1. Radiowave absorbers for microwave bands Vol.2. Commercial information / Tokin EMC engineering Co. Ltd [http](http://www.tee.tokin.jp/eng/ansitu/kyushu.html). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tee.tokin.jp/eng/ansitu/kyushu.html>. – Дата доступа: 02.06.2015.
2. Лопатин А.В., Казанцева Н.Е., Казанцев Ю.Н. // Радиотехника и электроника. 2008. № 5 (53). С. 517–526.
3. Гагулин В.В., Шевчук Ю.А., Корчагина С.К. Радиопоглощающий материал / Патент РФ № 2189954.
4. Суляев В.И., Найденов Е.П., Коровин Е.Ю. Способ получения многослойного радиопоглощающего материала и радиопоглощающий материал, полученный этим способом / Патент РФ № 2423761.
5. Устименко Л.Г., Хандогина Е.Н., Владимиров Д.Н. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2009. № 2. С. 81–85.
6. Устименко Л.Г., Владимиров Д.Н., Сергеев М.С. Средство защиты от электромагнитного излучения / Патент РФ № 87046.
7. Серебрянников С.В., Китайцев А.А., Чепарин В.П. Композиционный радиопоглощающий материал / Патент РФ № 2380867.
8. Николайчук Г., Иванов В., Яковлев С. // Электроника. 2010. № 1. С. 92–95.
9. Банный В.А., Царенко И.В. // Вест. ГГУ им. П.О. Сухого. 2009. № 4. С. 3–8.
10. Грищенко В.А., Владимиров Д.Н., Фукина В.А., Хандогина Е.Н., Шаповалова Е.И. Ткань для защиты от электромагнитных излучений / Патент РФ 2411315.