

УДК 621.315.56

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГИБКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков, Д. И. Пеньялоса Овальес, Х. А. Э. Айад

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013, Минск, ул. П. Бровки, д. 6

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2019 г.

Аннотация. Разработана и обоснована методика получения многослойных гибких электромагнитных экранов на основе порошкообразного древесного угля и фольгированных материалов. Исследованы частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7...17 ГГц экранов, полученных в соответствии с разработанной методикой. На основе результатов такого исследования установлено, что по сравнению с аналогами эти экраны характеризуются пониженными значениями коэффициента отражения при сопоставимых величинах коэффициента передачи электромагнитного излучения. Показано, что путем добавления в их состав порошкообразного электрокорунда можно обеспечить дополнительное снижение (в среднем на 5 дБ) значений их коэффициента отражения электромагнитного излучения.

Ключевые слова: диоксид титана, древесный уголь, кварцевый песок, коэффициент отражения, коэффициент передачи, электрокорунд, электромагнитный экран.

Abstract. A method for producing of multilayer flexible electromagnetic shields based on powdered charcoal and foiled materials has been developed and substantiated. The frequency dependences of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients in the range of 0.7...17 GHz of screens obtained in accordance with the developed method are investigated. On the basis of such a study results, it has been established that, compared with analogues, these screens

are characterized by lower values of electromagnetic radiation reflection coefficient at comparable transmission coefficient values. It is shown that by adding powdered electrocorundum to their composition, it is possible to provide an additional decrease (on average by 5 dB) of electromagnetic radiation reflection coefficient values.

Keywords: titanium dioxide, charcoal, quartz sand, reflection coefficient, transmission coefficient, electrocorundum, electromagnetic shield.

Введение

Проводящие материалы широко используются в настоящее время в качестве основных компонентов электромагнитных экранов. Это обусловлено их доступностью, разнообразием номенклатуры, а также высокими значениями ослабления электромагнитного излучения (ЭМИ) в широком диапазоне частот. Однако часто электромагнитные экраны на основе проводящих материалов характеризуются высокими значениями коэффициента отражения ЭМИ. Это приводит к тому, что они становятся причиной формирования пассивных электромагнитных помех, которые могут негативно влиять на процесс функционирования защищаемого посредством этих экранов радиоэлектронного оборудования.

Снижение значений коэффициента отражения ЭМИ экранов на основе проводящих материалов может быть обеспечено путем их реализации в виде многослойных конструкций, а также в результате добавления в них компонентов, характеризующихся диэлектрическими свойствами (высокими значениями действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости), что обеспечивает лучшее согласование волновых сопротивлений воздуха и этих экранов [1].

В настоящей работе представлены методика получения и результаты исследования характеристик отражения и передачи ЭМИ многослойных гибких электромагнитных экранов на основе проводящих материалов, а также результаты экспериментального выбора диэлектрических компонентов для таких экранов для дополнительного снижения значений их коэффициента отражения ЭМИ.

Методика получения и характеристики отражения и передачи ЭМИ гибких многослойных электромагнитных экранов на основе проводящих материалов

Авторами апробирована и предложена методика получения гибких многослойных электромагнитных экранов на основе проводящих материалов (порошкообразного древесного угля, фольги), включающая в себя следующие этапы.

Этап 1. Откраивание от полотен поролона и гибкой полимерной сетки по два фрагмента, геометрические размеры и форма которых сопоставимы с геометрическими размерами и формой экранируемых объектов.

Этап 2. Откраивание от рулона полиэтилентерефталатной термопленки двух фрагментов, геометрические размеры которых превышают на 5...10 см геометрические размеры фрагментов полотен поролона и гибкой полимерной сетки, а форма сопоставима с формой фрагментов полотен поролона и гибкой полимерной сетки.

Этап 3. Раскрой фольгированного материала на фрагменты, представляющие собой прямоугольники, ширина которых не превышает 5 мм.

Этап 4. Пропитывание водным раствором CaCl_2 порошкообразного древесного угля.

Этап 5. Размещение фрагмента полотна поролона на фрагменте полиэтилентерефталатной термопленки.

Этап 6. Размещение фрагмента полотна гибкой полимерной сетки на фрагменте полотна поролона.

Этап 7. Нанесение порошкообразного активированного угля, пропитанного водным раствором CaCl_2 , на фрагмент полотна гибкой полимерной сетки, размещенной на фрагменте полотна поролона.

Этап 8. Размещение фрагментов полотен на основе фольгированного материала на слое смеси порошкообразных активированного угля, пропитанного водным раствором CaCl_2 .

Этап 9. Размещение фрагмента полотна гибкой полимерной сетки на слое из фрагментов на основе фольгированного материала.

Этап 10. Размещение фрагмента полиэтилентерефталатной термопленки на фрагменте полотна гибкой полимерной сетки.

Этап 11. Соединение по краям с использованием метода запаивания наружного и внутреннего слоев полученного гибкого электромагнитного экрана в виде фрагментов полиэтилентерефталатной термопленки.

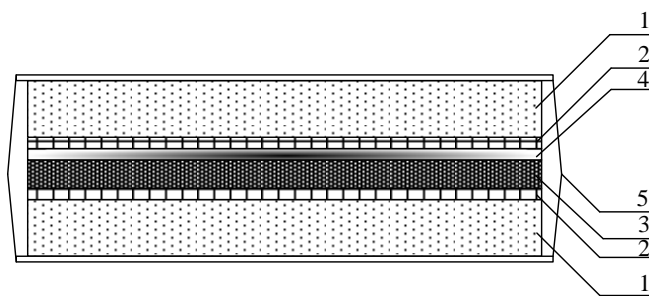
Выбор порошкообразного древесного угля в качестве одного из основных компонентов многослойного электромагнитного экрана, получаемого в соответствии с предложенной методикой, связан тем, что по сравнению с другими проводящими порошкообразными материалами он характеризуется следующими преимуществами:

– невысокая насыпная плотность, обуславливающая возможность получения на его основе электромагнитных экранов сравнительно низкой массы;

– высокая пористость, обуславливающая его хорошую смачиваемость, способность удерживать влагу и, как следствие, возможность получения на его основе эффективных влагосодержащих электромагнитных экранов со стабильными характеристиками отражения и передачи ЭМИ.

а также значительной пористостью, что обуславливает его хорошую смачиваемость, а также способность удерживать влагу. Использование фрагментов фольгированного материала для формирования одного из слоев электромагнитного экрана позволяет повысить эффективность последнего.

Схематическое изображение и фото электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой, представлены на рисунке 1.



a



б

Рисунок 1. Схематическое изображение внешнего вида сбоку (*a*) и фото сверху (*б*) гибкого электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой

На части *a* рисунка 1 использованные цифровые обозначения соответствуют следующим материалам и компонентам слоев экрана: 1 – полотно на основе поролона; 2 – полотно на основе гибкой полимерной сетки; 3 – порошкообразный древесный уголь, пропитанный водным раствором CaCl_2 ; 4 – фрагменты на основе фольгированного материала; 5 – фрагменты полиэтилентерефталатной термопленки, соединенные по краям методом запаивания.

В соответствии с алгоритмом, изложенным в разделе 2.3 работы [2], выполнены измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой. На рисунке 2 представлены частотные зависимости коэффициента отражения

ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц, полученные на основе результатов таких измерений.

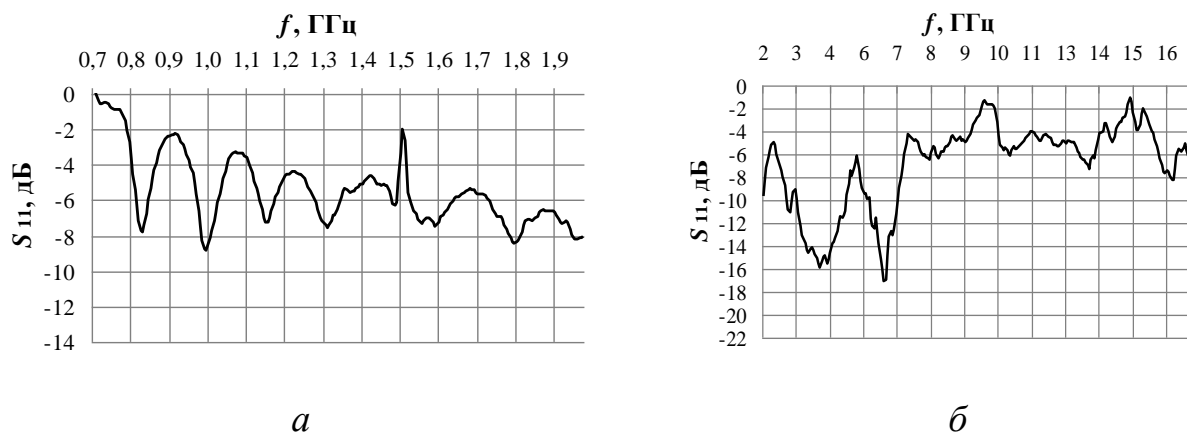


Рисунок 2. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) гибкого электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой

Из рисунка 2 следует, что частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц представляет собой совокупность резонансных кривых. Причем в диапазоне частот 0,7...1,35 ГГц эти кривые являются симметричными относительно своих центральных частот и независимо от величины последней характеризуются одинаковой шириной, а в диапазоне 1,35...17 ГГц – несимметричными, и характеризуются разной шириной в зависимости от величины их центральной частоты. Если резонансные кривые анализируемой графической зависимости рассматривать как совокупность убывающего и возрастающего отрезков, то значения их центральных частот в диапазоне 0,7...2 ГГц можно представить в виде следующего соотношения: $0,85 + 0,15 \cdot n, n \in [0..9], n \in Z$. Центральные частоты резонансных кривых, образующих в совокупности частотную зависимость коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемого электромагнитного экрана в диапазоне 2...17 ГГц, принимают следующие значения: 4,0 ГГц, 6,5 ГГц, 8,0 ГГц, 10,0 ГГц, 13,5 ГГц, 16,0 ГГц. Наименьшее значение коэффициента ЭМИ в диапазоне частот 0,7...2 ГГц составляет –8 дБ и соответствует частоте 1,0 ГГц, а в диапазоне частот 2...17 ГГц – –15 дБ и соответствует частотам 4,0 и 6,5 ГГц.

Величина коэффициента отражения ЭМИ любого электромагнитного экрана зависит от амплитуды и фазы первичных (падающих на поверхность экрана) и вторичных (отраженных от поверхности экрана или от его внутренних стенок) электромагнитных волн. Амплитуда и фаза первичных электромагнитных волн зависит от свойств их источника, а также от свойств излучающей антенны (либо элементов источника, являющихся ее аналогом). Амплитуда и фаза вторичных электромагнитных волн зависит от электромагнитных параметров (величин электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемости), а также от особенностей конфигурации экрана (одно- или многослойная, с наличием или отсутствием на поверхности неоднородностей, размер которых сопоставим с длиной взаимодействующих с таким экраном волн). Наличие резонансных кривых, которые могут быть условно выделены на частотной зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц для рассматриваемого электромагнитного экрана, обусловлено интерференцией первичных электромагнитных волн и волн, отраженных от его поверхности, а в диапазоне 2...17 ГГц – интерференцией первичных электромагнитных волн и волн, как отраженных от его поверхности, так и многократно переотраженных от внутренних стенок.

Отражение или многократное переотражение электромагнитных волн диапазона частот 0,7...2 ГГц от внутренних стенок экрана не вносит вклад в интерференционную картину, т. к. для этих волн его слой на основе фрагментов фольгированного материала является отражателем, ввиду того, что их длина значительно превышает размер щелей между указанными фрагментами.

Следует констатировать, что значения коэффициента отражения ЭМИ у электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой, на 2...10 дБ ниже, чем у многослойных экранов на основе текстильных, углеродосодержащих композиционных и фольгированных материалов, полученных и подробно исследованных в рамках работы [3].

На рисунке 3 представлены частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц гибкого электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой.

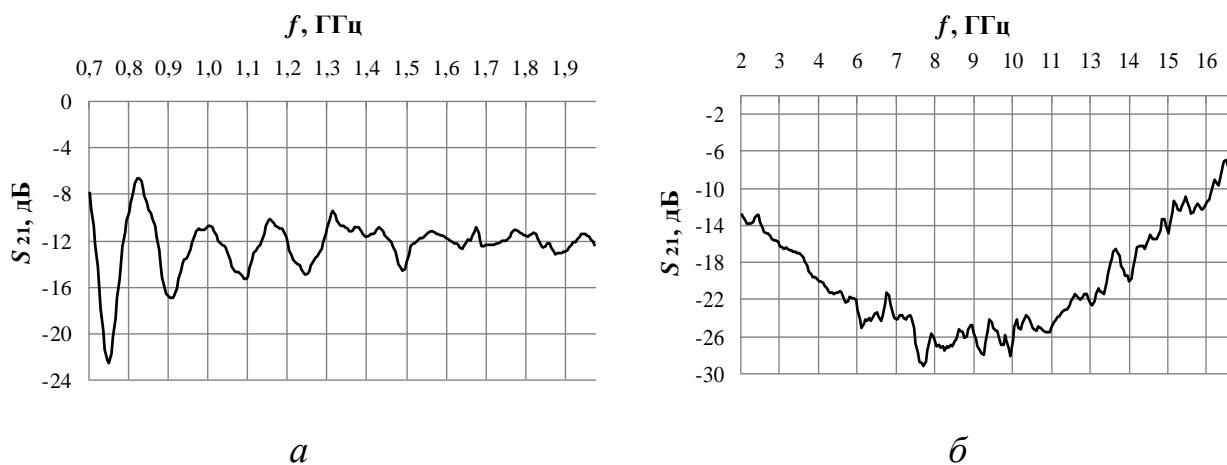


Рисунок 3. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) гибкого электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой

Частотная зависимость коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц рассматриваемого экрана представляет собой совокупность резонансных кривых, симметричных относительно центральных частот в диапазоне 0,7...1,35 ГГц и несимметричных в диапазоне 1,35...2 ГГц. Если резонансные кривые анализируемой графической зависимости рассматривать как совокупность убывающего и возрастающего отрезков, то значения их центральных частот в диапазоне 0,7...2 ГГц можно представить в виде следующего соотношения: $0,75 + 0,15 \cdot n$, $n \in [0..9]$, $n \in Z$.

В диапазоне частот 2...17 ГГц данная зависимость характеризуется наличием осцилляций, которые обусловлены малым шагом изменения частоты при проведении измерений в этом диапазоне. Если выполнить аппроксимацию осцилляций, то характер частотной зависимости коэффициента передачи ЭМИ рассматриваемого экрана будет убывающим в диапазоне 2...7,5 ГГц и возрастающим в диапазоне 7,5...17 ГГц. Наименьшее значение коэффициента передачи ЭМИ рассматриваемого экрана составляет -28 дБ и соответствует частоте 7,5 ГГц. Это может быть обусловлено тем, что жидкость (водный раствор CaCl_2), которой пропитан порошкообразный древесный уголь

в рассматриваемом экране, в наибольшей степени поглощает энергию ЭМИ на указанной частоте (т. е. указанная частота для такой жидкости является резонансной) [4].

Экспериментальный выбор диэлектрических компонентов для снижения значений коэффициента отражения ЭМИ гибких многослойных электромагнитных экранов на основе проводящих материалов

Выполнены исследования закономерностей изменения характеристик отражения и передачи ЭМИ разработанных в соответствии с предложенной методикой гибких многослойных электромагнитных экранов в зависимости от типа диэлектрического компонента, добавляемого в их слой на основе порошкообразного древесного угля.

В качестве диэлектрических компонентов были выбраны кварцевый песок, порошкообразный диоксид титана, порошкообразный электрокорунд. Выбор указанных компонентов обусловлен их невысокой стоимостью, а также доступностью.

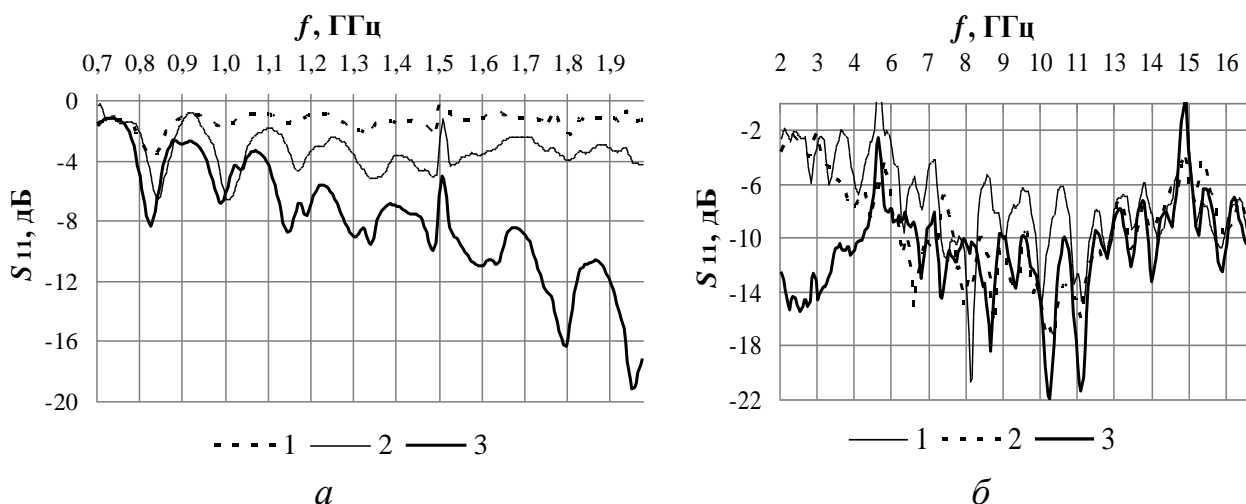


Рисунок 4. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) электромагнитных экранов, содержащих кварцевый песок (1), порошкообразный диоксид титана (2), порошкообразный электрокорунд (3)

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии

с предложенной методикой и содержащих указанные диэлектрические компоненты, представлены на рисунке 4.

Из результатов сравнения рисунков 2 и 4 следует, что добавление кварцевого песка или диоксида титана в состав слоя на основе порошкообразного древесного угля в процессе формирования электромагнитного экрана в соответствии с предложенной методикой приводит к увеличению на 1...10 дБ значений коэффициента отражения последнего в диапазоне частот 0,7...6 ГГц и к снижению на 2...6 дБ величины указанного параметра в диапазоне частот 6...17 ГГц. Добавление порошкообразного электрокорунда приводит к снижению на 1...8 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ полученного экрана в диапазоне частот 0,7...2 ГГц и на 4...15 дБ в диапазоне частот 4...17 ГГц. Величина рассматриваемого параметра в диапазоне частот 2...4 ГГц остается практически неизменной. Это позволяет сделать вывод о том, что на процесс формирования вторичных электромагнитных волн в указанном диапазоне частот в большей степени влияет толщина слоя на основе порошкообразных материалов, нежели его состав.

Характеристики отражения ЭМИ в диапазоне частот 2...17 ГГц изготовленных в соответствии с предложенной методикой электромагнитных экранов, содержащих помимо порошкообразного древесного угля один из исследованных диэлектрических компонентов, могут быть условно разделены на большее количество резонансных кривых, чем аналогичные характеристики экранов, содержащих только древесный уголь. Это связано с тем, что волновые сопротивления слоев на основе смеси порошкообразных древесного угля и одного из исследованных диэлектрических компонентов по сравнению с волновым сопротивлением слоя на основе порошкообразного древесного угля в большей степени согласованы с волновым сопротивлением воздуха.

Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с предложенной методикой и содержащих исследованные диэлектрические

компоненты, представлены на рисунке 5.

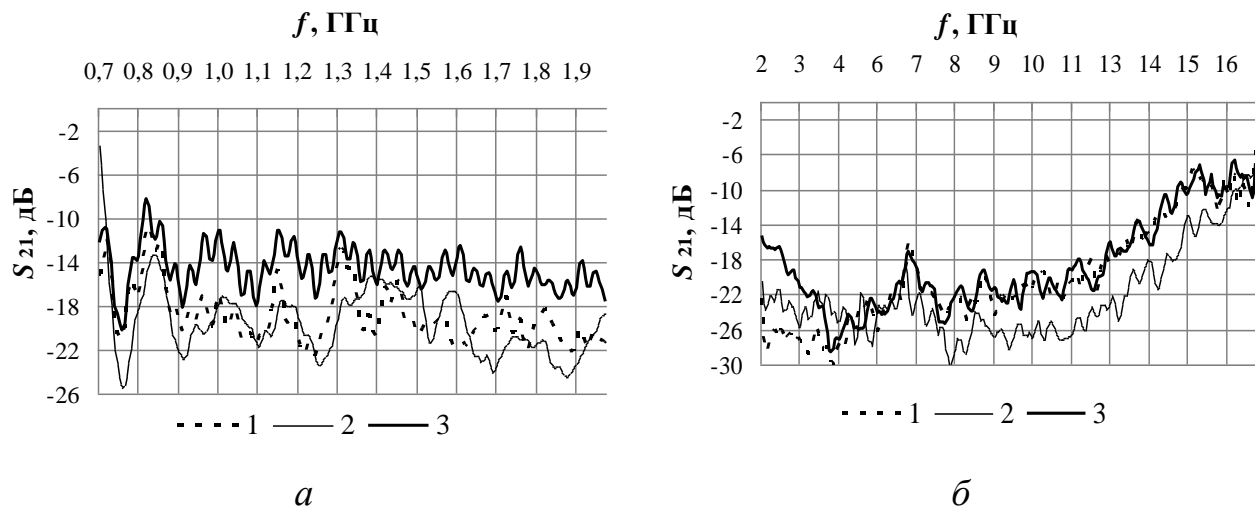


Рисунок 5. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (*а*) и 2...17 ГГц (*б*) электромагнитных экранов, содержащих кварцевый песок (1), порошкообразный диоксид титана (2), порошкообразный электрокорунд (3)

Из рисунка 5 следует, что в результате добавления исследованных диэлектрических компонентов в состав электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с предложенной методикой, обеспечивает снижение на 2...4 дБ значений его коэффициента передачи ЭМИ. Это обусловлено снижением электропроводности слоя, в который добавляются эти компоненты.

Заключение

В соответствии с предложенной методикой могут быть получены гибкие многослойные электромагнитные экраны, характеризующиеся значениями коэффициента отражения ЭМИ диапазоне 0,7...17 ГГц $-2...-16$ дБ и коэффициента передачи ЭМИ $-8...-30$ дБ. Путем добавления в состав таких экранов порошкообразного электрокорунда можно обеспечить снижение в среднем на 5 дБ значений их коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот. Исследованные электромагнитные экраны могут быть использованы для облицовки стен помещений, используемых для настройки или тестирования радиоэлектронного оборудования.

Литература

1. Поглощающие свойства композиционных материалов на основе Ni–Zn ферритов в диапазоне СВЧ / С.Г. Барай [и др.] // Сборник докладов 8-го Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка». Минск, 10–12 апреля 2013 г. С. 405–409.

2. Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов / М.Р. Неамах [и др.]. Минск: Бестпринт, 2013.– 182 с.

3. Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения трудновоспламеняемых экранов на основе углеродосодержащих материалов / О.В. Бойправ [и др.] // Доклады БГУИР. 2017. № 6 (108) . С. 63–68.

4. Структура и свойства воды, облученной СВЧ излучением / В.Ф. Мышкин [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 81 (07). С. 1–12.

Для цитирования:

О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков, Д. И. Пеньялоса Овальес, Х. А. Э. Айад. Исследование характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения гибких многослойных экранов на основе проводящих материалов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/5/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.5