

УДК 621.315.56

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ФЕРРИТОВ И ЭЛЕКТРОКОРУНДА

О. В. Бойправ, Д. И. Пеньялоса Овальес, М. В. Тумилович

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

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2019 г.

Аннотация. В рамках работы выполнено исследование частотных зависимостей коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7...17 ГГц экранов на основе железо-бариевого, железо-стронциевого и железо-титанового ферритов. Проанализировано влияние добавления диэлектрического компонента (порошкообразного электрокорунда) в состав таких экранов на значения их коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот.

Ключевые слова: коэффициент отражения, коэффициент передачи, феррит, электрокорунд, электромагнитный экран.

Abstract. The frequency dependences of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients in the frequency range 0.7...17 GHz of shields based on iron-barium, iron-strontium and iron-titanium ferrites were studied. The influence of the addition of powdered electrocorundum to the composition of such shields on the values of their electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients in the specified frequency range is analyzed.

Keywords: reflection coefficient, transmission coefficient, ferrite, electrocorundum, electromagnetic shield.

Введение

Настоящая работа явилась продолжением исследований, результаты которых приведены в работе [1]. Ее цель заключалась в определении закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) диапазона частот 0,7...17 ГГц с экранами, изготовленными с использованием порошкообразных ферритов в соответствии с представленной в [1] методикой, в зависимости от состава последних. Для достижения поставленной цели в данной работе были решены следующие задачи:

- 1) изготовлены образцы электромагнитных экранов с использованием порошкообразных ферритов и диэлектрических материалов;
- 2) измерены значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц изготовленных образцов;
- 3) выполнен сравнительный анализ характеристик отражения и передачи ЭМИ изготовленных образцов.

Методика проведения эксперимента

Для изготовления объектов исследования (образцов электромагнитных экранов) были использованы следующие разновидности порошкообразных ферритов: железо-бариевый, железо-стронциевый, железо-титановый. Выбор указанных материалов обусловлен их широким применением в целях создания устройств для ослабления энергии электромагнитных волн. Диэлектрическим материалом, использованным при изготовлении образцов электромагнитных экранов, был выбран порошкообразный электрокорунд. Перспективность его применения для получения электромагнитных экранов экспериментально обоснована в работе [2] и связана с его высокой пористостью, обуславливающей возможность модификации состава, и сравнительно низкой плотностью.

В соответствии с представленной в [1] методикой были изготовлены шесть партий образцов электромагнитных экранов на основе указанных материалов. Образцы партии 1 получены на основе порошкообразного железо-бариевого феррита, образцы партии 2 – на основе смеси железо-бариевого

феррита и порошкообразного электрокорунда, образцы партии 3 – на основе железо-стронциевого феррита, образцы партии 4 – на основе смеси железо-стронциевого феррита и порошкообразного электрокорунда, образцы партии 5 – на основе железо-титанового феррита, образцы партии 6 – на основе смеси железо-титанового феррита и порошкообразного электрокорунда.

Измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ изготовленных образцов электромагнитных экранов выполнялись с использованием панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0,01–18 в соответствии с методикой, представленной в разделе 2.3 работы [3].

Результаты исследований и их обсуждение

Частотные зависимости коэффициентов отражения ЭМИ изготовленных образцов электромагнитных экранов представлены на рисунках 1–6. Следует отметить, что измерения значений коэффициента отражения ЭМИ образцов выполнялись в двух режимах: в режиме согласованной нагрузки (образец размещался между передающей антенной и согласованной нагрузкой) и в режиме короткого замыкания (образец закреплялся на металлической подложке, т. е. фактически располагался между передающей антенной и металлической подложкой).

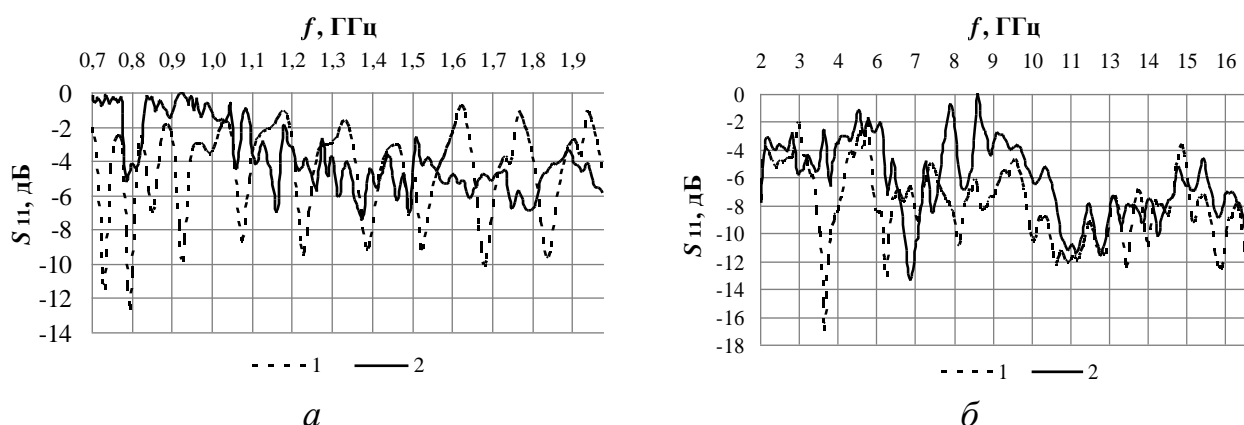


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) образцов партии 1 (кривые 1) и партии 2 (кривые 2)

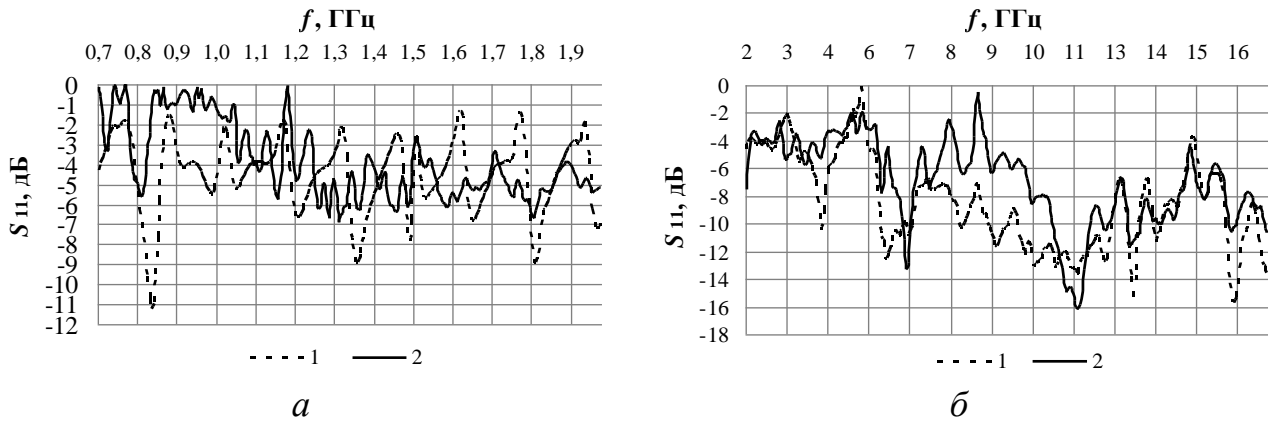


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (*a*) и 2...17 ГГц (*б*) образцов партии 3 (кривые 1) и партии 4 (кривые 2)

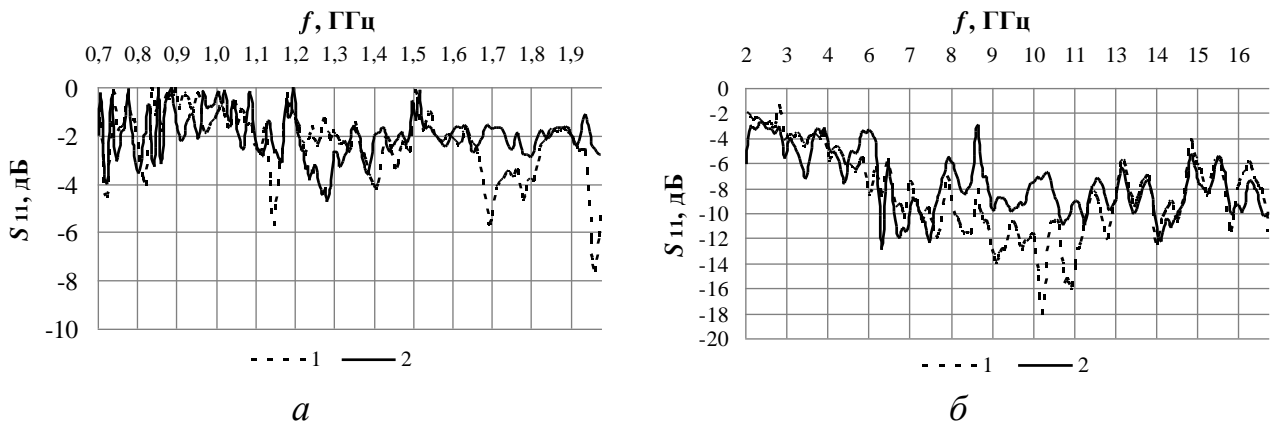


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (*a*) и 2...17 ГГц (*б*) образцов партии 5 (кривые 1) и партии 6 (кривые 2)

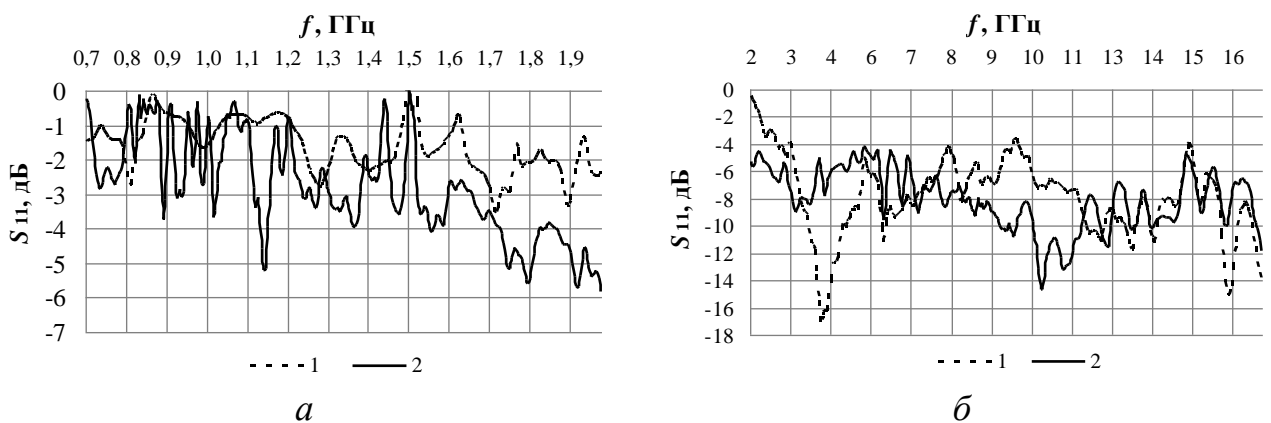


Рисунок 4. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (*a*) и 2...17 ГГц (*б*) закрепленных на металлических подложках образцов партии 1 (кривые 1) и партии 2 (кривые 2)

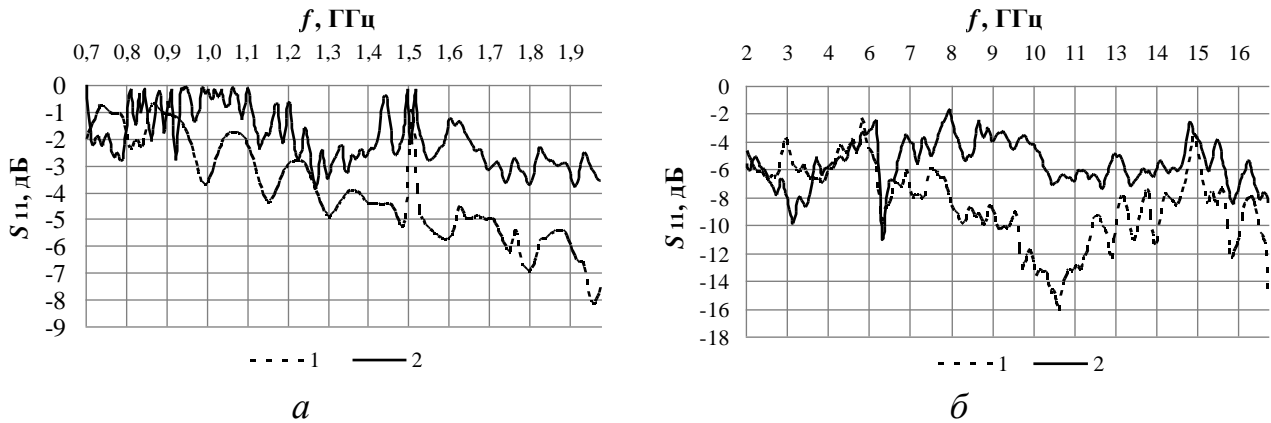


Рисунок 5. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) закрепленных на металлических подложках образцов партии 3 (кривые 1) и партии 4 (кривые 2)

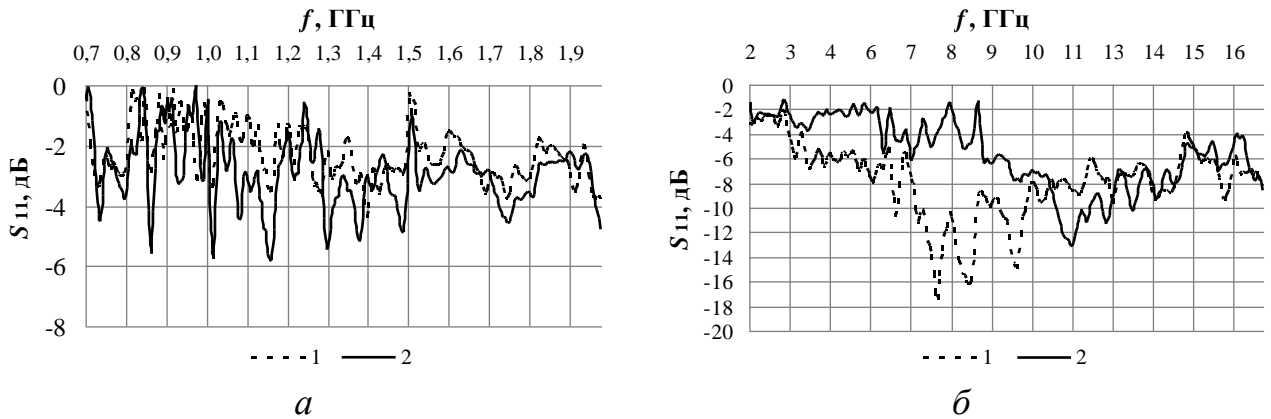


Рисунок 6. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) закрепленных на металлических подложках образцов партии 5 (кривые 1) и партии 6 (кривые 2)

Анализ рисунков 1–3 показывает, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...2 ГГц образцов партий 1 и 3 изменяются в пределах от –2 до –12 дБ, партии 5 – от –1 до –7 дБ. Значения частот, которым соответствуют минимумы характеристик отражения ЭМИ образцов партий 1, 3 и 5, могут быть представлены соответственно следующими множествами:

$$\{0,75+0,1 \cdot k, k \in [0; 3], k \in \mathbb{Z}; 0,8; 1; 1,25+0,3 \cdot m, m \in [0; 2], m \in \mathbb{Z}; 1,35+0,3 \cdot n, n \in [0; 2], n \in \mathbb{Z}\}; \quad (1)$$

$$\{0,85+0,15 \cdot k, k \in [0; 2], k \in \mathbb{Z}; 1,2+0,3 \cdot m, m \in [0; 2], m \in \mathbb{Z}; 1,35+0,3 \cdot n, n \in [0; 2], n \in \mathbb{Z}\}; \quad (2)$$

$$\{0,75; 0,8; 1,15; 1,4; 1,7; 1,8; 1,95\}. \quad (3)$$

Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2...17 ГГц образцов партий 1, 3 и 5 изменяются в пределах от –2 до –16 дБ. Для образцов партии 1 наименьшее значение рассматриваемого параметра (–16 дБ)

соответствует частоте 3,5 ГГц, для образцов партий 3 и 5 – 13,5 и 10,5 ГГц соответственно. Указанные частоты, а также частоты из множеств (1), (2) и (3) составляют совокупность собственных частот прецессии магнитных моментов ферритов, использованных для изготовления образцов [4].

Образцы партий 2 и 6 характеризуются значениями коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц, изменяющимися в пределах от $-0,1$ до -12 дБ. Значения коэффициента отражения ЭМИ в рассматриваемом диапазоне частот образцов партии 4 варьируются в пределах от $-0,1$ до -16 дБ. Определено, что значения коэффициента отражения ЭМИ образцов на основе порошкообразных ферритов и электрокорунда ниже значений аналогичного параметра образцов на основе ферритов не во всем диапазоне частот, в котором проводились исследования. В частности, более низкие значения коэффициента отражения ЭМИ образцов партии 2 по сравнению с образцами партии 1 были зарегистрированы на частотах, не входящих во множество (1), а также на частоте 7 ГГц. Более низкие значения коэффициента отражения ЭМИ образцов партии 4 по сравнению с образцами партии 3 были зарегистрированы на частотах 7 ГГц и 11 ГГц. Более низкие значения коэффициента отражения ЭМИ образцов партии 6 по сравнению с образцами партии 5 были зарегистрированы на частотах, не входящих во множество (3). Данный факт является подтверждением того, что частоты из множеств (1)–(3) составляют совокупность собственных частот прецессии магнитных моментов ферритов, использованных для изготовления образцов.

Из рисунков 4–6 следует, что закрепленным на металлических подложках образцам партий 1, 3 и 5 свойственно резонансное снижение с -10 до -16 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ соответственно в следующих диапазонах частот: 3,5...4,5 ГГц (резонансная частота – 3,8 ГГц), 9,5...11,5 ГГц (резонансная частота – 10,5 ГГц), 7...8 ГГц, 8...9 ГГц, 9...10 ГГц (резонансные частоты – 7,5, 8,5, 9,5 ГГц соответственно). Данное явление связано с интерференцией электромагнитных волн, взаимодействующих с образцами, и электромагнитных волн, взаимодействующих с металлическими

подложками, на которых закреплены эти образцы. Значения коэффициента отражения ЭМИ, закрепленных на металлических подложках образцов партий 2, 4 и 6, на 1...11 дБ превышают значения коэффициента отражения ЭМИ, закрепленных на металлических подложках образцов партий 1, 3 и 5 практически на всех частотах диапазона 0,7...17 ГГц за следующими исключениями. В диапазонах частот 0,7...2 ГГц, 8...11 ГГц величина рассматриваемого параметра образцов партии 2 ниже на 2...7 дБ, чем образцов партии 1. В диапазоне частот 10,5...14 ГГц величина рассматриваемого параметра образцов партии 6 ниже на 0,5...5 дБ, чем образцов партии 5.

Частотные зависимости коэффициентов отражения ЭМИ изготовленных образцов электромагнитных экранов представлены на рисунках 7–9. Анализ полученных данных показывает, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц образцов партии 1 изменяются в пределах от –1 до –14 дБ, образцов партий 3 и 5 – соответственно от –1 до –20 дБ и от –10 до –30 дБ. Более низкие значения коэффициента передачи ЭМИ образцов на основе железо-титанового феррита обусловлены более высокими значениями относительной магнитной проницаемости этого материала по сравнению с железо-бариевым и железо-стронциевым ферритами.

Среднее значение коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...2 ГГц образцов партий 2 и 4 составляют –6 дБ, образцов партии 6 – –15 дБ. В диапазоне частот 2...17 ГГц величины рассматриваемого параметра указанных образцов соответственно –10 дБ, –8 дБ и –20 дБ. Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц (исключая частоты 0,85, 0,95 и 1,35 ГГц, входящие в совокупность собственных частот прецессии магнитных моментов железо-бариевого феррита) образцов партии 2 ниже на 1...12 дБ величины аналогичного параметра образцов партии 1. Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...6,5 ГГц, 8...13 ГГц образцов партии 4 выше на 1...12 дБ величины аналогичного параметра образцов партии 3. В диапазоне частот 6,5...8 ГГц, 13...17 ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ образцов партии 4 ниже

на 1...10 дБ, чем образцов партии 3. Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц образцов партии 5 выше на 1...15 дБ, чем образцов партии 6.

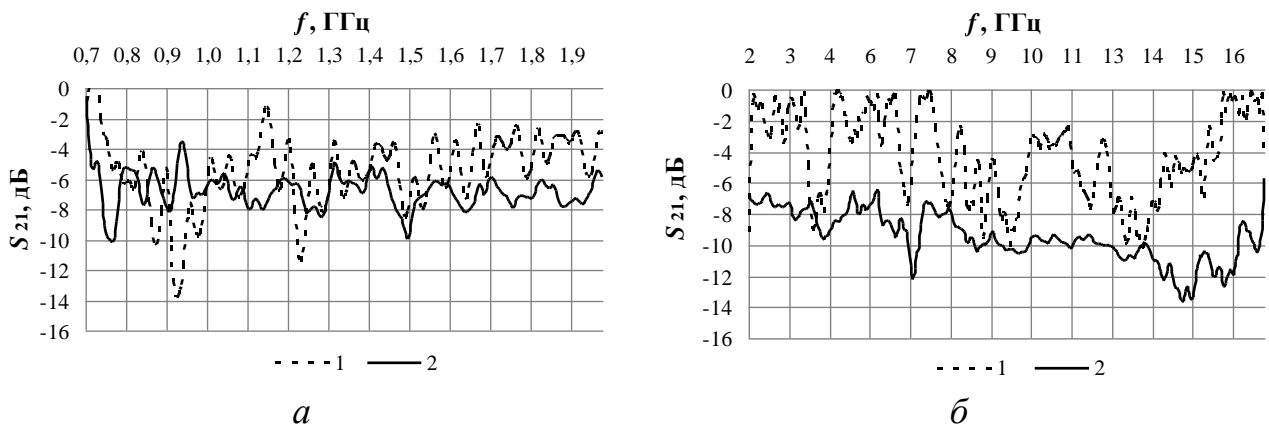


Рисунок 7. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) образцов партии 1 (кривые 1) и партии 2 (кривые 2)

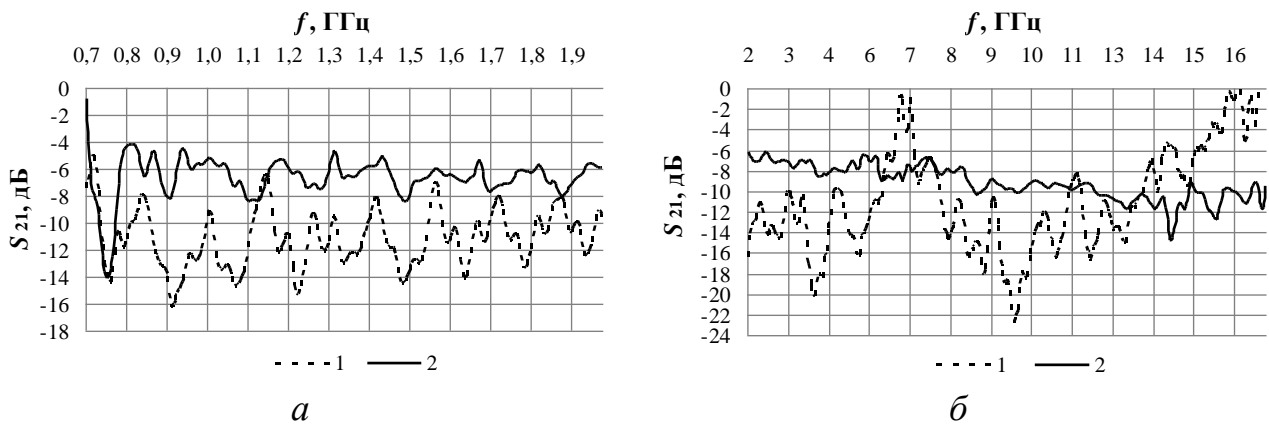


Рисунок 8. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) образцов партии 3 (кривые 1) и партии 4 (кривые 2)

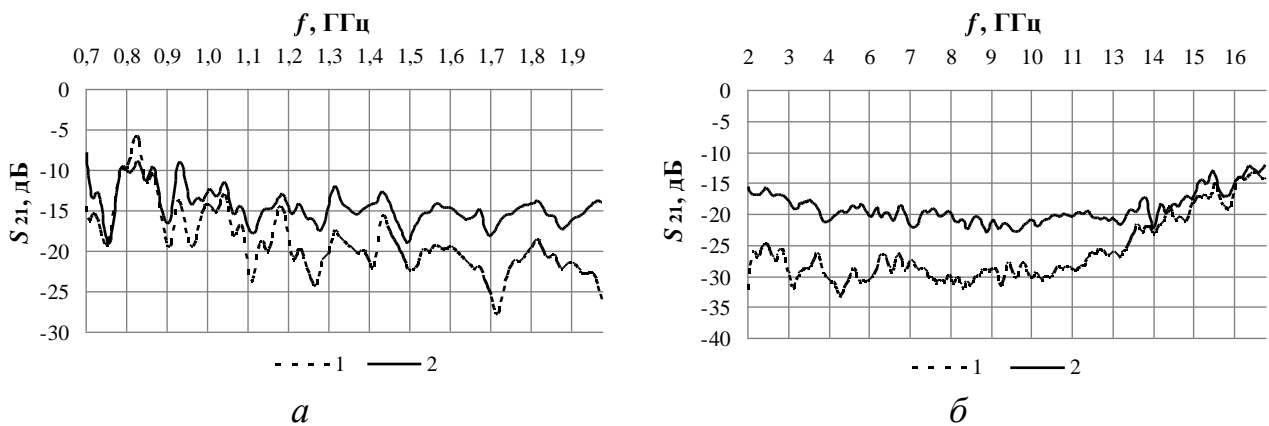


Рисунок 9. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) образцов партии 5 (кривые 1) и партии 6 (кривые 2)

Заключение

На основе проведенного сравнительного анализа результатов можно сделать вывод о том, что порошкообразный электрокорунд представляется рациональным для применения в целях повышения эффективности электромагнитных экранов на основе порошкообразных железо-бариевых ферритов. В результате добавления указанного материала в состав таких экранов можно обеспечить снижение на 2...7 дБ значений их коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах частот 0,7...2 ГГц, 8...11 ГГц, регистрируемого при условии их закрепления на металлических подложках, и снижение на 1...10 дБ значений их коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц (исключая частоты 0,85, 0,95 и 1,25 ГГц). Добавление порошкообразного электрокорунда в состав электромагнитных экранов на основе порошкообразных железо-стронциевых и железо-титановых ферритов приводит к ухудшению эффективности этих экранов.

Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с представленной в [1] методикой на основе порошкообразных железо-бариевых ферритов и электрокорунда, перспективны для использования в качестве панелей для внутренней облицовки стен помещений, экранированных посредством металлических листов. Такие экраны будут способствовать предотвращению возникновения пассивных электромагнитных помех в указанных помещениях. По сравнению с экранами, изготовленными только с применением порошкообразных ферритов, они характеризуются в 1,5 раза более низкой плотностью.

Список литературы

1. 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>.

2. Пеньялоса Овальес, Д. И. Исследование коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения порошковых материалов на основе электрокорунда. // Доклады БГУИР. 2017. № 8 (110). С. 99–102.

Немах М.Р. и др. Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов. Минск: Бестпринт, 2013. 182 с.

4. Вонсовский С. В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1033 с.

Для цитирования:

О.В. Бойправ, Д.И. Пеньялоса Овальес, М.В. Тумилович. Сравнительный анализ характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения экранов на основе порошкообразных ферритов и электрокорунда. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep19/2/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.9.2