

УДК 621.318

Усовершенствованная технология изготовления частотно–селективных электромагнитных экранов СВЧ–диапазона, содержащих спиралевидные элементы

© 2023 г. О. В. Бойправ¹✉, Н. В. Богуш¹

¹ *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, д. 6., Минск, 220013, Республика Беларусь*

✉ Автор для переписки: smu@bsuir.by

Аннотация. Рассмотрена усовершенствованная технология изготовления частотно–селективных электромагнитных экранов. Усовершенствование этой технологии было обеспечено за счет включения в объем изготавливаемых экранов элементов в виде классических спиралей Архимеда, сформированных из фольгированных материалов, для обеспечения частотно–селективных свойств таких экранов и фиксирования указанных элементов в объеме изготавливаемых экранов путем термопрессования. Эти особенности обуславливают основное преимущество усовершенствованной технологии по сравнению с ее аналогами, а именно: более низкие временные затраты, требуемые для ее реализации. Усовершенствование технологии было реализовано по следующим двум направлениям: 1) установление параметров спиралевидных элементов, которым соответствуют максимальные значения потерь энергии взаимодействующего с ними электромагнитного излучения в СВЧ–диапазоне; 2) определение порядка расположения в объеме экранов спиралевидных элементов, которому соответствуют наименьшие значения коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения в СВЧ–диапазоне этих экранов. Усовершенствование технологии, реализованное по первому направлению, базировалось на результатах анализа научных работ, посвященных математическому моделированию и исследованию характеристик передачи электромагнитного излучения в СВЧ–диапазоне плоских спиральных антенн. Усовершенствование, реализованное по второму направлению, базировалось на полученных экспериментальных данных. Были изготовлены экспериментальные образцы экранов, в объем которых включены ориентированные определенным образом спиралевидные элементы, а затем проведен сравнительный анализ характеристик передачи и отражения электромагнитного излучения в СВЧ–диапазоне таких экранов. Экраны, изготовленные в соответствии с предложенной усовершенствованной технологией, представляются перспективными для использования в целях защиты приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех.

Ключевые слова: алюминиевая фольга, усовершенствованная технология, частотно–селективный электромагнитный экран

Для цитирования: Бойправ О.В., Богуш Н.В. Усовершенствованная технология изготовления частотно–селективных электромагнитных экранов СВЧ–диапазона, содержащих спиралевидные элементы. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(1): 46–55. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-46-55>

Improved technology for manufacturing frequency–selective electromagnetic shields of the microwave range containing spiral elements

O. V. Boiprav¹✉, N. V. Bogush¹

¹ *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Brovki Str., Minsk 220013, Republic of Belarus*

✉ *Corresponding author: smu@bsuir.by*

Abstract. The results of substantiation of the improved technology for manufacturing of the frequency–selective electromagnetic shields are presented. The improvement of this technology was ensured by the following: 1) the inclusion of elements in the form of classical Archimedes spirals, formed from foil materials, into the volume of manufactured shields to ensure the frequency–selective properties of such shields; 2) fixing the specified elements in the volume of manufactured shields by thermal pressing. The indicated features determine the main advantage of the improved technology in comparison with its analogues — lower time costs required for its implementation. The substantiation of the improved technology was implemented in the following areas: 1) setting the parameters of Spiral elements, which correspond to the maximum values of energy losses of the electromagnetic radiation interacting with them in the microwave range; 2) determination of the order of arrangement of spiral elements in the volume of the screens, which corresponds to the lowest values of electromagnetic radiation transmission and reflection coefficients in the microwave range of these shields. The substantiation implemented in the first of the indicated directions was based on the results of the analysis of the content of scientific works devoted to mathematical modeling and the study of the electromagnetic radiation of the transmission characteristics of flat spiral antennas in the microwave range. The substantiation implemented in the second of the indicated directions was based on the manufacture of experimental samples of the shields, the volume of which includes spiral elements oriented in a certain way, and further obtaining and comparative analysis of electromagnetic radiation transmission and reflection characteristics in the microwave range of these shields. Shields manufactured in accordance with substantiated improved technology seem to be promising for use in order to protect electronic devices from the effects of electromagnetic interference.

Keywords: aluminum foil, improved technology, frequency selective electromagnetic shield

For citation: Boiprav O.V., Bogush N.V. Improved technology for manufacturing frequency–selective electromagnetic shields of the microwave range containing spiral elements. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(1): 46–55. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-46-55>

Введение

Основными направлениями применения частотно–селективных электромагнитных экранов СВЧ–диапазона в настоящее время являются следующие:

– разработка радиоизмерительных приборов (на основе частотно–селективных электромагнитных экранов создаются калибровочные образцы [1, 2]);

– защита приборов электронной техники от воздействия помех, значения частоты которых известны точно [3–8].

Частотно–селективные электромагнитные экраны СВЧ–диапазона изготавливаются одним из следующих способов.

1. Вырезание или выдавливание в подложках, изготовленных из электропроводящих материалов, отверстий (щелей) таким образом, чтобы последние были размещены с одинаковым шагом и характеризовались одинаковыми формой и размерами [9, 10].

2. Упорядоченное размещение и закрепление в объеме диэлектрических матриц элементов, полученных на основе электропроводных материалов и характеризующихся определенными (в большинстве случаев, одинаковыми) формой и размерами [11–13]. Получение таких элементов реализуется, как правило, с помощью методов фрезерования, лазерной резки, водоструйной резки [14].

3. 3D–печать с помощью металлосодержащих композиционных материалов элементов, которые

характеризуются определенными (в основном, одинаковыми) формой и размерами, на поверхности подложек, являющихся диэлектриками [15, 16].

Экраны, изготовленные в соответствии с первой из указанных технологий, принято называть экранами щелевого типа, а экраны, изготовленные в соответствии со второй и третьей из указанных технологий — экранами проволочного типа [17].

Экраны проволочного типа в настоящее время изготавливаются и применяются чаще, чем экраны щелевого типа, что подтверждается большим объемом опубликованных за последние пять лет научных работ, посвященных разработке технологий изготовления и исследованию свойств таких экранов, по сравнению с объемом опубликованных научных работ, в которых рассматриваются электромагнитные экраны щелевого типа. Скорее всего, большие объемы производства и более частое применение экранов проволочного типа по сравнению с экранами щелевого типа обусловлены тем, что себестоимость первых ниже себестоимости вторых. Однако следует отметить, что для экранов проволочного типа временные затраты для реализации технологий их изготовления, как правило, больше, чем для экранов щелевого типа, что обусловлено наличием в рамках первых из названных технологий этапа, связанного с обеспечением формовки и (или) затвердевания диэлектрических матриц.

Элементы, на основе которых в настоящее время чаще всего изготавливаются частотно-селективные электромагнитные экраны проволочного типа, характеризуются одной из следующих форм: линия, треугольник, круг, квадрат, прямоугольник, крест [18—23]. В работе [24] определено, что для изготовления таких экранов представляется перспективным использование элементов, являющихся аналогами спиральных антенн. В работе [25] представлены результаты разработки и исследования частотно-селективных электромагнитных экранов проволочного типа, содержащих элементы в форме спирали Ферма, являющейся разновидностью спирали Архимеда.

Исследование, результаты которого представлены ниже, было направлено на усовершенствование технологий изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов проволочного типа в целом и на развитие исследований, результаты которых представлены в работах [24, 25], в частности.

Цель работы — усовершенствование по сравнению с аналогами технологии изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, содержащих элементы в виде классической спирали Архимеда. Усовершенствование этой технологии предполагалось обеспечить за счет снижения временных затрат, требуемых для ее реализации.

Для достижения цели исследования необходимо было решить следующие задачи:

- выбрать параметры спиралевидных элементов для частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона;
- выбрать вспомогательные материалы и оборудование, необходимые для реализации усовершенствованной технологии;
- выполнить документирование усовершенствованной технологии изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, содержащих спиралевидные элементы;
- изготовить в лабораторных условиях в соответствии с задокументированной технологией экспериментальные образцы частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, содержащих спиралевидные элементы и отличающихся друг от друга расположением последних;
- получить для экспериментальных образцов характеристики передачи и отражения электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне и провести их сравнительный анализ.

Экспериментальная часть

При решении первой из задач в ходе достижения цели исследования использовали результаты анализа параметров антенны в виде спирали Архимеда, представленные в работе [26]. В соответствии с этими результатами, в такой антенне наибольшие потери энергии электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне наблюдаются при выполнении совокупности следующих условий [26]:

- длина наименьшего витка пропорционально сопоставима с длиной электромагнитной волны (минимальным значением длины электромагнитной волны) на рабочей частоте (в рабочем диапазоне частот) антенны;
- количество витков — 2;
- значения толщины проводника W , на основе которого изготовлена антенна, и расстояния между ее витками S (рис. 1) связаны следующим соотношением:

$$\frac{W}{W+S} = 0,167.$$

Для решения второй из задач было предложено в качестве диэлектрической матрицы (т. е. вспомогательного материала) для изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов проволочного типа использовать синтетический нетканый материал. При этом фиксирование элементов, полученных на основе электропроводных материалов и характеризующихся одинаковыми формой и размерами, реализовывали с использованием термопресса при температуре, не превышающей температуру плавления синтетического

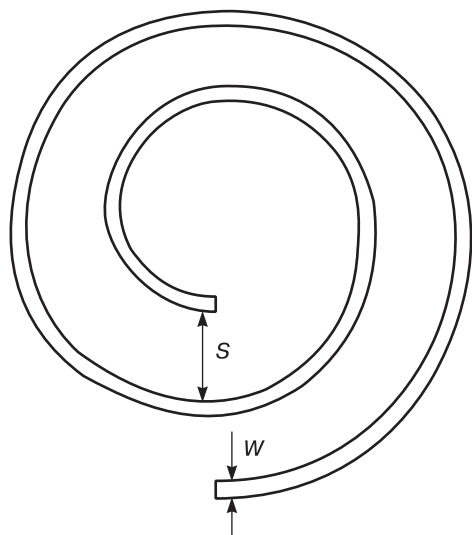


Рис. 1. Схематическое изображение спиралевидного элемента: S — расстояние между витками; W — толщина проводника

Fig. 1. Schematic representation of a spiral element: S is the distance between the turns; W is the conductor thickness

нетканого материала (~ 250 °С), а также температуру плавления материала, на основе которого изготовлены указанные элементы.

По результатам решения третьей из задач была задокументирована усовершенствованная технология изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, содержащих спиралевидные элементы. Эта технология включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Вырезание из рулона радиопрозрачного синтетического нетканого волокнистого материала одинаковых фрагментов с учетом следующих условий:

- форма и размеры фрагментов должны совпадать с формой и размерами изготавливаемых электромагнитных экранов;
- количество фрагментов должно превышать в 2 раза количество изготавливаемых электромагнитных экранов.

Этап 2. Изготовление на основе электропроводных материалов спиралевидных элементов с учетом условий, установленных при решении первой из задач.

Этап 3. Расположение изготовленных спиралевидных элементов на поверхностях фрагментов синтетического нетканого материала с учетом следующих условий:

- должна использоваться половина фрагментов синтетического нетканого материала, полученных в результате реализации этапа 1;
- спиралевидные элементы должны размещаться с шагом, не превышающим длину электромагнитной волны (минимальное значение длины электромагнитной волны) на рабочей частоте (в рабочем диапазоне частот) изготавливаемых электромагнитных экранов;

Этап 4. Расположение поверх каждого из фрагментов, полученных в результате реализации этапа 3, по одному из фрагментов, полученных в результате реализации этапа 1.

Этап 5. Выдерживание полученных в результате реализации этапов 1–4 конструкций в термопрессе при условиях, определенных по результатам решения второй из задач в ходе достижения цели исследования.

По результатам решения четвертой из задач в ходе достижения цели исследования в соответствии с разработанной усовершенствованной технологией были изготовлены четыре типа (I–IV) экспериментальных образцов частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона. Экспериментальные образцы каждого из четырех типов отличались ориентацией спиралевидных элементов, включенных в их объем. Спиралевидные элементы, включенные в объем образцов I типа, относительно фронта распространения электромагнитного излучения в плоскости XOY были ориентированы так, как показано на рис. 2, а, а спиралевидные элементы, включенные в объем образцов II, III и IV типа — так, как показано на рис. 2, б–г соответственно.

Для решения задачи по экспериментальному обоснованию разработанной усовершенствованной технологии были выбраны следующие параметры спиралевидных элементов для частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона: длина наименьшего витка составляла 4,7 см,

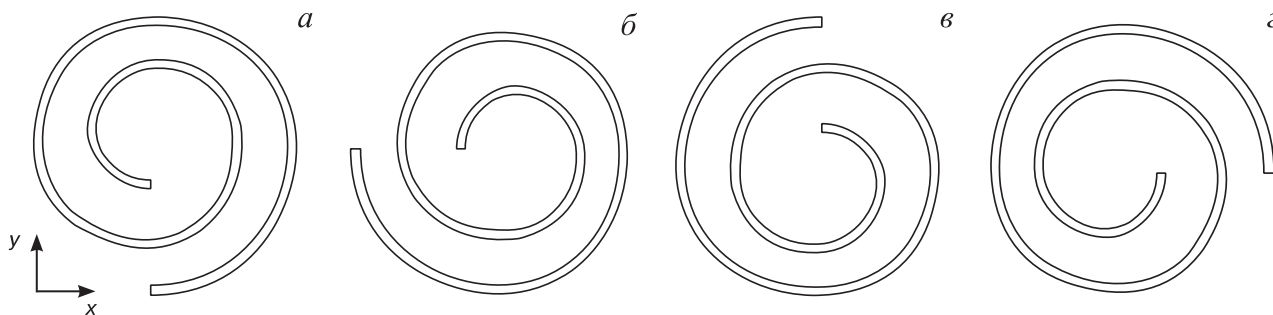


Рис. 2. Схематическое изображение одного из спиралевидных элементов, включенных в объем образцов I (а), II (б), III (в) и IV (г) типа

Fig. 2. Schematic representation of one of the helical elements included in the volume of samples of types I (a), II (б), III (в) and IV (г)

его радиус R_1 — 0,75 см, радиус спирали — 2,25 см, $W = 0,3$ см, $S = 1,5$ см. Спиралевидные элементы были сформированы в лабораторных условиях на основе фрагментов алюминиевой фольги в виде полос. Причем каждый из этих фрагментов формовался в углублениях специально разработанной пластины–трафарета, форма которых повторяла форму спирали Архимеда.

Выбор алюминиевой фольги для формирования спиралевидных элементов обусловлен ее высокой гибкостью по сравнению с другими листовыми металлосодержащими материалами, а также с металлосодержащими материалами проволоочного типа. За счет этого свойства временные затраты на формирование в лабораторных условиях с помощью пластины–трафарета спиралевидных элементов на основе алюминиевой фольги ниже, чем временные затраты на формирование аналогичных элементов на основе других указанных выше металлосодержащих материалов.

На рис. 3 представлен внешний вид одного из изготовленных элементов.

На рис. 4 представлен внешний вид фрагмента поверхности образца I типа.

Измерения значений коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения изготовленных образцов проводили с помощью установки, в состав которой входили следующие устройства: панорамный измеритель коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–18, коаксиальные волноводы, две рупорные антенны П6–23М и короткий замыкатель. При измерении значений коэффициента передачи электромагнитного излучения образцов использовали все перечисленные устройства, за исключением короткого замыкателя, а при измерении значений коэффициента отражения электромагнитного излучения — все перечисленные выше устройства за исключением одной рупорной антенны.

Перед проведением измерений коэффициентов отражения и передачи выполнялась калибровка установки. Калибровку выполняли для того, чтобы учесть влияние затухания электромагнитного излучения в антенном тракте и коаксиальных волноводах установки на значения измеряемых с ее помощью параметров.

Для проведения калибровки установки перед измерением значений коэффициента передачи электромагнитного излучения образцов располагали друг напротив друга передающую и приемную антенны, подключенные к панорамному измерителю коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–18.

Для проведения калибровки установки перед измерением значений коэффициента отражения электромагнитного излучения образцов перед передающей антенной, подключенной к панорам-



Рис. 3. Внешний вид одного из спиралевидных элементов, включенных в объем образцов I типа

Fig. 3. Appearance of one of the helical elements included in the volume of type I sample

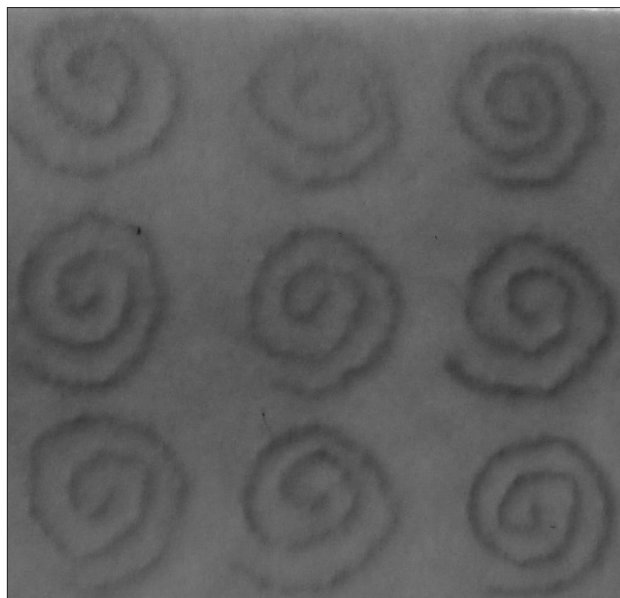


Рис. 4. Внешний вид фрагмента поверхности образца I типа

Fig. 4. Appearance of a fragment of the surface of a sample of type I

ному измерителю коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–18, устанавливали короткий замыкатель в виде плоской металлической подложки, выполненной из меди.

Измерения коэффициента отражения электромагнитного излучения изготовленных образцов проводили в режиме короткого замыкания (образец располагался между передающей антенной и плоской металлической подложкой, выполненной из меди). На основе результатов таких измерений на практике оценивается целесообразность ис-

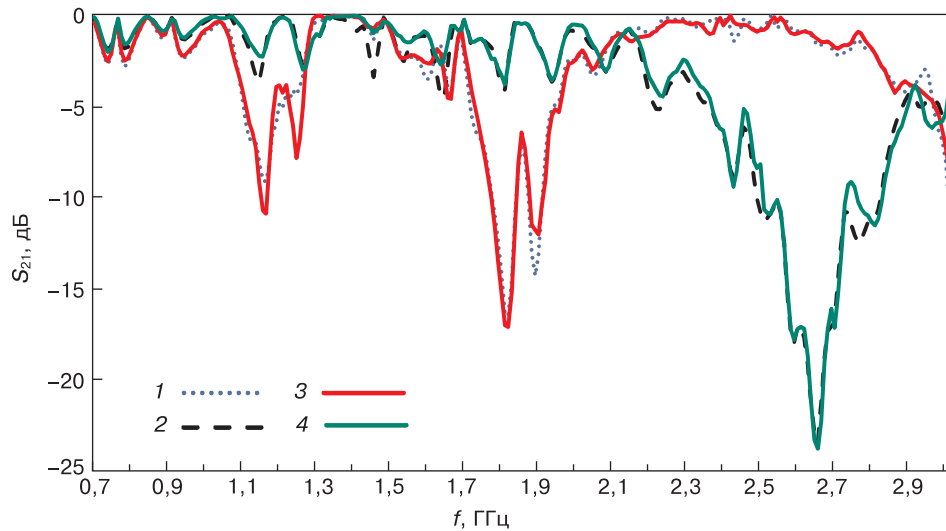


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7—3,0 ГГц образцов различного типа:
1—4 — образцы I—IV типа соответственно

Fig. 5. Frequency dependences of the transmission coefficient of electromagnetic radiation in the range of 0.7—3.0 GHz for samples of types I, II, III, and IV (curves 1, 2, 3, and 4, respectively)

пользования экранов в целях снижения уровня пассивных электромагнитных помех, возникающих ввиду отражения электромагнитного излучения приборов электронной техники от металлических объектов и, как следствие, перенаправления этого излучения в точку расположения указанных приборов. Пассивные помехи могут оказывать влияние на работоспособность приборов электронной техники практически в той же степени, что и активные помехи (т. е. помехи, источники которых расположены вблизи приборов электронной техники).

Размер каждого из изготовленных экспериментальных образцов составлял $30 \times 40 \text{ см}^2$ и был обусловлен размерами фланцев антенн, входивших в состав установки, использованной для измерения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения этих образцов.

Измерения коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения проводили в диапазоне частот 0,7—3,0 ГГц. Это обусловлено тем, что длины витков спиралевидных элементов, включенных в объем изготовленных в соответствии с разработанной технологией образцов, сопоставимы с длинами электромагнитных волн в указанном диапазоне частот.

Результаты и их обсуждение

На рис. 5 представлены частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7—3,0 ГГц изготовленных в соответствии с разработанной технологией образцов.

Из рис. 5 видно, что частотная зависимость коэффициента передачи электромагнитного из-

лучения в диапазоне 0,7—3,0 ГГц образца I типа практически совпадает с аналогичной зависимостью для образца III типа. Это связано с тем, что электромагнитные волны, взаимодействующие с образцом I типа и пересекающие его поверхность в точках y_1, y_2, y_3 (рис. 6, а) характеризуются той же фазой, что и электромагнитные волны, взаимодействующие с образцом III типа и пересекающие его поверхность в точках y_1^*, y_2^*, y_3^* (рис. 6, б).

Та же самая особенность характерна для частотных зависимостей коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7—3,0 ГГц для образцов II и IV типа. Это обусловлено тем, что электромагнитные волны, взаимодействующие с образцом II типа и пересекающие его поверхность в точках x_1, x_2, x_3 (рис. 6, в), характеризуются той же фазой, что и электромагнитные волны, взаимодействующие с образцом IV типа и пересекающие его поверхность в точках x_1^*, x_2^*, x_3^* (рис. 6, г).

Значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7—3,0 ГГц образцов I и III типа изменяются в пределах от $-0,1$ до $-17,0$ дБ, а образцов II и IV типа — от $-0,1$ до $-23,0$ дБ. Более низкие значения коэффициента передачи электромагнитного излучения образцов II и IV типа по сравнению с образцами I и III типа могут быть обусловлены тем, что амплитуда взаимодействующих с образцами II и IV типа электромагнитных волн в точках x_1, x_2, x_3 (x_1^*, x_2^*, x_3^*) ниже, чем амплитуда взаимодействующих с образцами I и III типа электромагнитных волн в точках y_1, y_2, y_3 (y_1^*, y_2^*, y_3^*). Это, в свою очередь, обусловлено различием в фазах электромагнитных волн в точках x_1, x_2, x_3 (x_1^*, x_2^*, x_3^*) и точках y_1, y_2, y_3 (y_1^*, y_2^*, y_3^*).

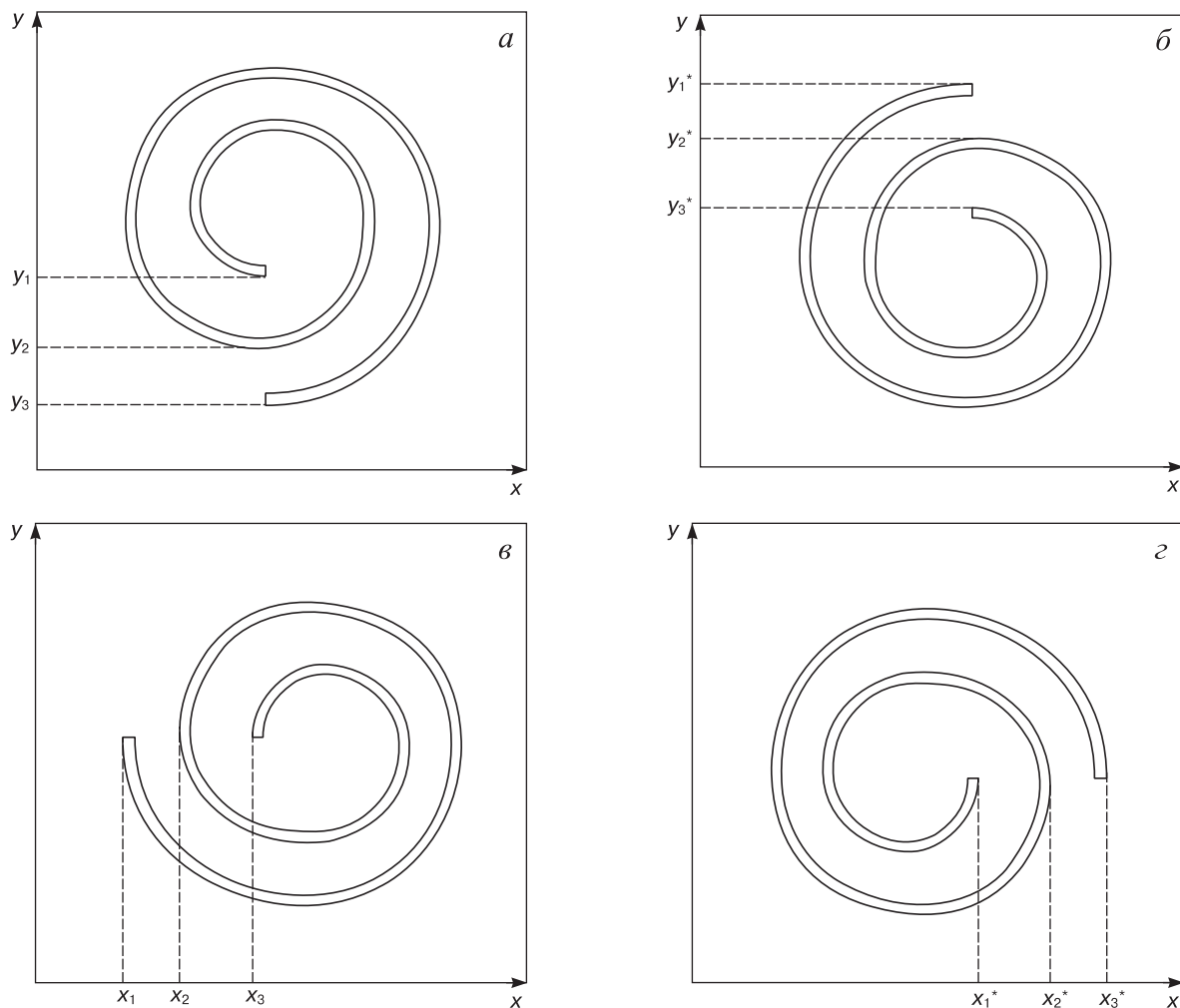


Рис. 6. Расположения и обозначения точек начала и окончания витков спиралевидных элементов, включенных в объем образцов I (а), III (б), II (в) и IV (г) типа

Fig. 6. Locations and designations of the start and end points of the turns of helical elements included in the volume of samples of types I (a), III (б), II (в) and IV (г)

Для образцов I и III типа характерны две рабочие полосы частот: 1,1—1,3 ГГц (резонансная частота — 1,15 ГГц) и 1,7—2,0 ГГц (резонансная частота — 1,8 ГГц). Это может быть обусловлено совокупностью следующих особенностей:

- длина электромагнитных волн на указанных резонансных частотах кратна значениям расстояния от центров витков спиралевидных элементов, включенных в объем образцов I и III типа до точек y_3 (y_3^*) и y_1 (y_1^*) соответственно;

- амплитуда взаимодействующих с образцами I и III типа электромагнитных волн в точках y_3 (y_3^*) и y_1 (y_1^*) является максимальной.

Для образцов II и IV типа характерна одна рабочая полоса частот: 2,3—3,0 ГГц (резонансная частота — 2,65 ГГц). Это может быть обусловлено совокупностью следующих особенностей:

- длина электромагнитных волн на указанной резонансной частоте кратна значениям расстояния от центров витков спиралевидных элементов, включенных в объем образцов II и IV типа, до точек x_2 (x_2^*);

- амплитуда взаимодействующих с образцами II и IV типа электромагнитных волн в точках x_2 (x_2^*) является максимальной.

С учетом изложенных результатов было определено, что значения частот $f_{\text{рез}}$, которым соответствуют наименьшие значения коэффициента передачи электромагнитного излучения экранов, изготовленных, согласно предложенной технологии, могут быть определены на основе следующих соотношений:

- если включенные в объем экранов спиралевидные элементы ориентированы так, как показано на рис. 2, а и в,

$$f_{\text{рез}i} = \frac{S + R_1(i-1)}{8}, \text{ где } i = \{0, 1\},$$

- если включенные в объем экранов спиралевидные элементы ориентированы так, как показано на рис. 2, б и г,

$$f_{\text{рез}} = \frac{S + 2R_1}{8}.$$

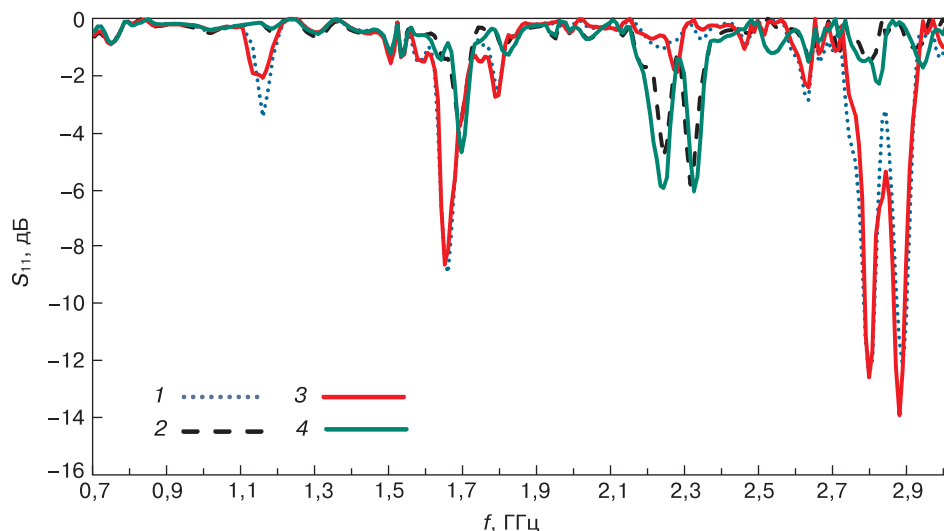


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7—3,0 ГГц образцов различного типа:
1—4 — образцы I—IV типа соответственно

Fig. 7. Frequency dependences of the reflection coefficient of electromagnetic radiation in the range of 0.7—3.0 GHz for samples of types I, II, III, and IV (curves 1, 2, 3, and 4, respectively)

Следует отметить, что значения коэффициента передачи электромагнитного излучения экранов, изготовленных, согласно предложенной технологии, сопоставимы со значениями коэффициента передачи электромагнитного излучения рассмотренных в работе [25] экранов, в объем которых включены элементы в виде спиралей Ферма. Исходя из этого, можно заключить, что изменение вида спиралевидных элементов (спирали Ферма → спирали Архимеда), включаемых в объем электромагнитных экранов, не оказывает существенного влияния на эффективность последних. При этом продолжительность процесса формирования элементов в виде классических спиралей Архимеда ниже продолжительности процесса формирования элементов в виде спиралей Ферма.

На рис. 7 представлены частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7—3,0 ГГц изготовленных в соответствии с разработанной технологией образцов.

Из рис. 7 видно, что характер частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7—3,0 ГГц изготовленных образцов аналогичен тому, что наблюдали для частотных зависимостей коэффициента передачи электромагнитного излучения. Причины таких особенностей те же, что и причины совпадения частотных зависимостей коэффициента передачи электромагнитного излучения образцов, рассмотренные выше.

Значения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7—17,0 ГГц образцов I и III типа, измеренные в режиме короткого замыкания, изменяются в пределах от -0,1 до -15,0 дБ, а образцов II и IV типа — от -0,1

до -6,0 дБ. Более низкие значения коэффициента отражения электромагнитного излучения образцов I и III типа по сравнению с образцами II и IV типа могут быть обусловлены следующей причиной. Амплитуда электромагнитных волн, отраженных от металлической подложки, используемой в ходе проведения измерений коэффициента отражения электромагнитного излучения в режиме короткого замыкания, и взаимодействующих с образцами I и III типа в точках $x_1, x_2, x_3 (x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ выше, чем амплитуда аналогичных волн, взаимодействующих с образцами II и IV типа в точках $y_1, y_2, y_3 (y_1^*, y_2^*, y_3^*)$.

Рассматриваемые частотные зависимости также, как и частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения (см. рис. 5), носят резонансный характер. Точки минимума (т. е. резонансные частоты) частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения образцов I и III типа — 1,15, 1,65, 1,8, 2,65, 2,75 и 2,85 ГГц, а частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения образцов II и IV типа — 1,7, 2,25 и 2,35 ГГц. Большое количество точек минимума на рассмотренных частотных зависимостях по сравнению с частотными зависимостями коэффициента передачи электромагнитного излучения исследованных образцов обусловлено совокупностью следующих особенностей:

- при измерениях в режиме короткого замыкания отраженные электромагнитные волны формируются как в результате отражения от поверхности образца падающих электромагнитных волн, так и в результате отражения от металлической подложки электромагнитных волн, прошедших через его толщину;

– в точке расположения измерительной антенны фаза электромагнитных волн, отраженных от поверхности образца, отличается от фазы электромагнитных волн, отраженных от металлической подложки; значения этих фаз зависят от частоты электромагнитных волн.

Заключение

Путем изменения расположения спиралевидных элементов в объеме электромагнитных экранов, изготавливаемых согласно обоснованной усовершенствованной технологии, можно обеспечивать требуемые значения коэффициента передачи электромагнитного излучения, а также резонансных частот для таких экранов. Наименьшие значения коэффициента передачи электромагнитного излучения для электромагнитных экранов, изготовленных, согласно усовершенствованной технологии, могут быть обеспечены в случае, когда включенные в объем таких экранов спиралевидные элементы ориентированы так, как показано на рис. 2, а и в. Такие электромагнитные экраны представляются перспективными для использования в целях защиты приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех, значения частоты которых известны точно.

Значения коэффициента передачи электромагнитного излучения экранов, изготовленных по усовершенствованной технологии, сопоставимы со значениями коэффициента передачи электромагнитного излучения экранов, изготовленных по технологиям, являющимся ее аналогами [19—23, 25]. При этом временные затраты, необходимые для изготовления таких экранов ниже, чем в временные затраты, необходимые для изготовления экранов по технологиям–аналогам [19—23, 25].

За счет включения в структуру электромаг-

нитных экранов, изготовленных согласно усовершенствованной технологии, металлических листовых материалов (например, листов фольгированного материала) можно получать конструкции, значения коэффициента отражения электромагнитного излучения которых составляют менее $-10,0$ дБ за счет взаимодействия в противофазе электромагнитных волн, отраженных от спиралевидных элементов, включенных в объем таких конструкций, и электромагнитных волн, отраженных от поверхности металлических листовых материалов. Значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в СВЧ–диапазоне таких конструкций может достигать $-50,0$ дБ за счет обеспечения ослабления энергии электромагнитного излучения включенными в их структуру металлическими листовыми материалами. Такие конструкции представляются перспективными для использования в целях защиты приборов электронной техники от пассивных электромагнитных помех.

Следует отметить, что при серийном производстве электромагнитных экранов в соответствии с предложенной усовершенствованной технологией целесообразно формировать спиралевидные элементы, предназначенные для включения в объем таких экранов, путем фрезерования твердотельного фольгированного материала (например, текстолита) с помощью станка с числовым программным управлением.

Также следует отметить, что заложенный в основу обоснованной усовершенствованной технологии метод термопрессования фрагментов радиопрозрачного синтетического нетканого волокнистого материала может быть использован для изготовления частотно–селективных электромагнитных экранов проволочного типа на основе элементов, характеризующихся не только спиралевидной, но и любой другой формой.

Библиографический список / References

1. Semenikhina D.V., Semenikhin A.I., Yukhanov Y.V. Effect of frequency selective shield of semielliptical shape on the characteristics of antenna array. *Proc. of Inter. conf. on computer information systems and industrial applications (CISIA 2015)*. 28–29 June 2015. Bangkok, Thailand. Atlantis Press; 2015. P. 107–109. <https://doi.org/10.2991/cisia-15.2015.28>
2. Singh A., Singh C. Quad–band FSS for electromagnetic shielding. *International Journal of Computer Communication and Informatics*. 2021; 3(1): 1–14. <https://doi.org/10.34256/ijcci2111>
3. Silva M.W.B., Junqueira C.C.M., Culhaoglu A.E., Kempfner E. Frequency selective smart shield design for wireless signals. *Proc. 9th European conf. on antennas and propagation (EuCAP-2015)*. 12–17 April 2015. Lisbon, Portugal. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7228738>
4. Koohestani M., Perdriau R., Ramdani M., Carlsson J. Frequency selective surfaces for electromagnetic shielding of pocket–sized transceivers. *IEEE Transactions on Electro-*
5. Konoplev I., Posthuma De Boer D.W., Warsop C., John M. Design and characterisation of frequency selective conductive materials for electromagnetic fields control. *Scientific Reports*. 2020; 10(1): 19351. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76447-x>
6. Mayouf A.T., Sayidmarie K.H., Mohammed Ali Y.E. A Dual stopband frequency selective surface for mobile shielding applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1152(1): 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1152/1/012008>
7. Khoshniat A., Abhari R. Suppression of radiated electromagnetic emissions using absorbing frequency selective surfaces. *2017 IEEE 26th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*; 2017. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/EPEPS.2017.8329705>
8. Perotoni M.B., Andrade L.A., Junqueira C. Design, prototyping and measurement of a cascaded 6–GHz fre-

quency selective surface array. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2016; 8(2): 137—142. <https://doi.org/10.5028/jatm.v8i2.629>

9. Hussein M., Zhou J., Huang Y., Al-Juboori B. A low-profile miniaturized second-order bandpass frequency selective surface. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*. 2017; 16: 2791—2794. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2746266>

10. De Siqueira Campos A.L.P., Maniçoba R.H.C., d'Assunção A.G. Investigation of enhancement band using double screen frequency selective surfaces with Koch fractal geometry at millimeter wave range. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. 2010; 31(12): 1503—1511. <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9735-8>

11. Liu P., Yang S., Jain A., Wang Q., Jiang H., Song J., Koschny T., Soukoulis C.M., Dong L. Tunable meta-atom using liquid metal embedded in stretchable polymer. *Journal of Applied Physics*. 2015; 118(1): 014504—014902. <https://doi.org/10.1063/1.4926417>

12. Yang S., Liu P., Yang M., Wang Q., Song J., Dong L. From flexible and stretchable meta-atom to metamaterial: A wearable microwave meta-skin with tunable frequency selective and cloaking effects. *Scientific Reports*. 2016; 6(1): 21921. <https://doi.org/10.1038/srep21921>

13. Sessions D., Cook A., Fuchi K., Gillman A., Huff G., Buskoh P. Origami-inspired frequency selective surface with fixed frequency response under folding. *Sensors*. 2019; 19(21): 4808—4828. <https://doi.org/10.3390/s19214808>

14. Perotoni M.B., Andrade L.A., Junqueira C. Design, prototyping and measurement of a Cascaded 6-GHz frequency selective surface array. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2016; 8(2): 137—142. <https://doi.org/10.5028/jatm.v8i2.629>

15. Liang B., Bai M. Subwavelength three-dimensional frequency selective surface based on surface wave tunneling. *Optics Express*. 2016; 24(13): 14697—14702. <https://doi.org/10.1364/OE.24.014697>

16. Sanz-Izquierdo B., Parker E.A. 3D Printing technique for fabrication of frequency selective structures for built environment. *Electronics Letters*. 2013; 49(18): 1117—1118. <https://doi.org/10.1049/el.2013.2256>

17. Новикова Ю.А. Обзор неуправляемых и управляемых частотно-избирательных поверхностей. Сб. докладов 1-й Всерос. науч. конф. «Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем». 14–22 апреля 2020 г., Санкт-Петербург. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 2020. С. 95—98. <https://doi.org/10.31799/978-5-8088-1449-3-2020-1-95-98>

Novikova Yu.A. Overview of unmanaged and controllable frequency-selective surfaces. *The collection of reports of the 1st All-Russ. scient. conf. "Modeling and situational quality control of complex systems"*. April 14—22, 2020, St. Petersburg. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya; 2020. P. 95—98. (In Russ.). <https://doi.org/10.31799/978-5-8088-1449-3-2020-1-95-98>

18. Anwar R.S., Mao L., Ning H. Frequency selective surfaces: A review. *Applied Sciences*. 2018; 8(9): 1689—1736. <https://doi.org/10.3390/app8091689>

19. Martinez-Lopez L., Rodriguez-Cuevas J., Martinez-Lopez J.I., Martynyuk A.E. A multilayer circular polarizer based on bisected split-ring frequency selective surfaces. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*. 2014; 13: 153—156. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2298393>

20. Campos A.L.P.; de Oliveira E.E.C.; da Fonseca Silva P.H. Design of miniaturized frequency selective surfaces using Minkowski island fractal. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*. 2010; 9(1): 43—49.

21. Yao X., Bai M., Miao J. Equivalent circuit method for analyzing frequency selective surface with ring patch in oblique angles of incidence. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*. 2011; 10: 820—823. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2164774>

22. Li W., Wang C., Zhang Y., Li Y. A miniaturized frequency selective surface based on square loop aperture element. *International Journal Antennas Propagation*. 2014; 2014: 1—6. <https://doi.org/10.1155/2014/701279>

23. Huang F.-C., Chiu C.-N., Wu T.-L., Chiou Y.-P. A circular-ring miniaturized-element metasurface with many good features for frequency selective shielding applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2015; 57(3): 365—374. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2015.2389855>

24. Panwar R., Lee J.R. Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review. *Aerospace Science and Technology*. 2017; 66: 216—234. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.03.006>

25. Liu T., Kim S.-S. High-capacitive frequency selective surfaces of folded spiral conductor arrays. *Microwave and Optical Technology Letter*. 2020; 62(1): 301—307. <https://doi.org/10.1002/mop.32006>

26. Chena T.-K., Huff G.H. Transmission line analysis of the Archimedean spiral antenna in free space. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2014; 28(10): 1175—1193. <https://doi.org/10.1080/09205071.2014.909295>

Информация об авторах / Information about the authors

Бойправ Ольга Владимировна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, д. 6., Минск, 220013, Республика Беларусь; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9987-8109>; e-mail: smu@bsuir.by

Богущ Наталья Валерьевна — научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Материалы и элементы электронной и сверхпроводниковой техники», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, д. 6., Минск, 220013, Республика Беларусь; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7832-8597>; e-mail: nbogush@bsuir.by

Olga V. Boiprav — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 6 P. Brovki Str., Minsk 220013, Republic of Belarus; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9987-8109>; e-mail: smu@bsuir.by

Natalia V. Bogush — Researcher, Scientific Researcher of Scientific and Research Laboratory “Materials and Elements of Electronic and Superconducting Technology” of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 6 P. Brovki Str., Minsk 220013, Republic of Belarus; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7832-8597>; e-mail: nbogush@bsuir.by

Поступила в редакцию 09.11.2022; поступила после доработки 28.11.2022; принята к публикации 16.02.2023
Received 9 November 2022; Revised 28 November 2022; Accepted 16 February 2023