

О.В. Бойправ

**АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИЕ
ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ
ДЛЯ СВЧ-УСТРОЙСТВ**

Минск, 2025

УДК 62-758.38

Бойправ, О. В. Алюминийсодержащие частотно-селективные электромагнитные экраны для СВЧ-устройств / О. В. Бойправ ; под ред. В. А. Богуша. – Минск: Бестпринт, 2025. – 200 с., ISBN 978-985-90513-1-9.

Представлены технологии изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов с использованием алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки и алюминиевой фольги. Приведены результаты исследования характеристик поглощения и отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц экранов, изготовленных в соответствии с представленными технологиями. Приведены результаты экспериментального обоснования перспективности применения таких экранов для защиты приборов электронной техники и человека от воздействия СВЧ- и ИК-излучения, а также для решения задач обеспечения информационной безопасности.

Предназначена для инженерно-технических и научных работников электронной и радиоэлектронной промышленности, а также для студентов старших курсов, аспирантов и докторантов, обучающихся по специальностям области радиоэлектроники.

Рекомендована Советом БГУИР, протокол № 9 от 25.04.2025 г.

*Под редакцией профессора, доктора физико-математических наук
В. А. Богуша*

Рецензенты:

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Государственного научного

учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларусь»

В.А. Зеленин;

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии
учреждения образования «Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники» В.Л. Ланин

© О.В. Бойправ, 2025

© Оформление УП «Бестпринт», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ	7
1.1 Классификация и характеристики сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.....	7
1.2 Методики моделирования сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно электромагнитного излучения СВЧ-диапазона	14
1.3 Частотно-селективные электромагнитные экраны СВЧ-диапазона	28
1.3.1 Экраны, характеризующиеся пространственно-периодической структурой	28
1.3.2 Экраны, характеризующиеся слоистой структурой	57
1.4 Материалы для изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона	76
ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ.....	80
2.1 Исследование характеристик поглощения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона образцов электромагнитных экранов	80
2.2 Исследование взаимодействия электромагнитного излучения ИК-диапазона с образцами электромагнитных экранов	84
2.3 Методика оценки коэффициента звукоизоляции, характерного для образцов электромагнитных экранов	86
2.4 Методика экспериментального обоснования возможности использования электромагнитных экранов для защиты речевой информации от утечки по прямому акустическому и параметрическому каналам	89
ГЛАВА 3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ФОЛЬГИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ	93
3.1 Характеристики пленки с закрепленными на ее поверхности объемными элементами в виде классических спиралей Архимеда	93
3.2 Характеристики пленки с закрепленными на ее поверхности объемными петлевидными элементами.....	98
3.3 Характеристики пленки с закрепленными на ее поверхности объемными элементами в виде лент Мебиуса.....	103
3.4 Характеристики пленки с механически обработанной поверхностью.....	107
3.5 Физико-математические модели для обоснования закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с электромагнитными экранами на основе алюминийсодержащих материалов.....	114
ГЛАВА 4 ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ФОЛЬГИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ И АЛЮМИНИЕВОЙ ФОЛЬГИ.....	121
4.1 Экраны на основе объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги	121

4.2 Экраны на основе объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки	124
4.3 Экраны на основе объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки	127
4.4 Экраны на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью	131
4.5 Комбинированные экраны на основе модифицированного порошкообразного активированного древесного угля и алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки.....	144
4.6 Оборудование и оснастка для изготовления экранов.....	158
ГЛАВА 5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ФОЛЬГИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ.....	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	172
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	176

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одно из направлений исследований в области разработки электромагнитных экранов СВЧ-диапазона связано с обеспечением такой структуры для поверхности или объема последних, при которой они характеризуются частотно-селективными свойствами относительно электромагнитного излучения (ЭМИ) указанного диапазона частот. Проявление таких свойств выражается в том, что рассматриваемые экраны на определенных частотах или в определенных диапазонах частот обеспечивают резонансное увеличение энергии ЭМИ, отражаемого от их поверхности или поглощаемого ими. При этом экраны, обеспечивающие резонансное увеличение энергии ЭМИ, отражаемого от их поверхности, называют частотно-селективными отражателями ЭМИ [1, 2], а экраны, обеспечивающие резонансное увеличение энергии ЭМИ, поглощаемого ими, – частотно-селективными поглотителями ЭМИ [3, 4].

Частотно-селективные отражатели ЭМИ используются в настоящее время в измерительных [5, 6], антенных и навигационных системах [7] в целях создания калибровочных образцов для СВЧ измерительных приборов, исключения влияния передаваемых сигналов на принимаемые, снижения степени воздействия элементов антенных решеток друг на друга, подавления многолучевости антенн и т. п. Частотно-селективные поглотители ЭМИ используются в настоящее время в целях защиты приборов электронной техники от воздействия помех, значения частоты которых известны точно [8–13].

По результатам проведения релевантного поиска в реферативных базах данных рецензируемой научной литературы Scopus и Web of Science, а также в библиографической базе данных научных публикаций РИНЦ было установлено, что частотно-селективные поглотители ЭМИ в настоящее время чаще являются объектами научных исследований и разработок, чем частотно-селективные отражатели ЭМИ (объектами более 70,0 % опубликованных в период с 2021 по 2025 гг. научных работ, найденных в указанных базах и посвященных электромагнитным экранам, характеризующимся частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ СВЧ-диапазона (далее по тексту – частотно-селективные электромагнитные экраны СВЧ-диапазона), были частотно-селективные поглотители ЭМИ). Это может быть обусловлено тем, что отражатели являются потенциальной причиной пассивных электромагнитных помех для систем или приборов, в комплексе с которыми используются. По результатам обозначенного поиска также было установлено, что научные исследования, проведенные в период с 2021 по 2025 гг. [10, 14–20] в рамках направления, связанного с разработкой частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазоне, базировались на определении закономерностей изменения значений резонансных частот и коэффициента отражения или поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне таких экранов в зависимости от следующих параметров, характеризующих макроструктуру их поверхности или объема:

- форма и размер элементов, образующих макроструктуру поверхности или объема экранов;
- расстояние между элементами, образующими макроструктуру поверхности или объема экранов;
- толщина слоев, входящих в структуру экранов.

В работе [21] определено, что на закономерности изменения значений резонансных частот и коэффициента отражения или поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне частотно-селективных электромагнитных экранов могут оказывать влияние не только перечисленные параметры, но и физико-химические свойства материалов, на основе которых изготавливаются такие экраны. В указанной работе также отмечено, что путем изменения физико-химических свойств (в частности, микроструктуры и состава) материалов, на основе которых изготавливаются частотно-селективные электромагнитные экраны, можно обеспечить управляемое изменение значений резонансных частот и коэффициента отражения или поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне таких экранов. Однако к настоящему времени в открытой печати не представлены результаты исследований, связанных с установлением закономерностей изменения указанных значений в зависимости от обозначенных свойств.

В представляющей работе приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на поиск новых элементов для частотно-селективных электромагнитных экранов, а также на установление закономерностей изменения характеристик поглощения и отражения ЭМИ в СВЧ-диапазоне таких экранов в зависимости от параметров, характеризующихся микроструктуру поверхности указанных элементов. С учетом результатов обозначенных исследований можно обеспечить создание новых или усовершенствование существующих технологий изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона для:

- расширения эффективной полосы поглощения (ЭПП) ЭМИ, характерной для таких экранов;
- обеспечения для таких экранов дополнительных свойств, за счет которых они могут стать многофункциональными (с их использованием можно одновременно решать несколько технических задач (проблем)).

ГЛАВА 1

СОВРЕМЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

1.1 Классификация и характеристики сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно электромагнитного излучения СВЧ-диапазона

Среды, характеризующиеся частотно-селективными свойствами относительно электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, – это гетерогенные системы с пространственно-периодической и / или слоистой структурой, образованной совокупностью отверстий и / или совокупностью плоских и / или объемных компонентов (фаз), между которыми есть граница раздела [22].

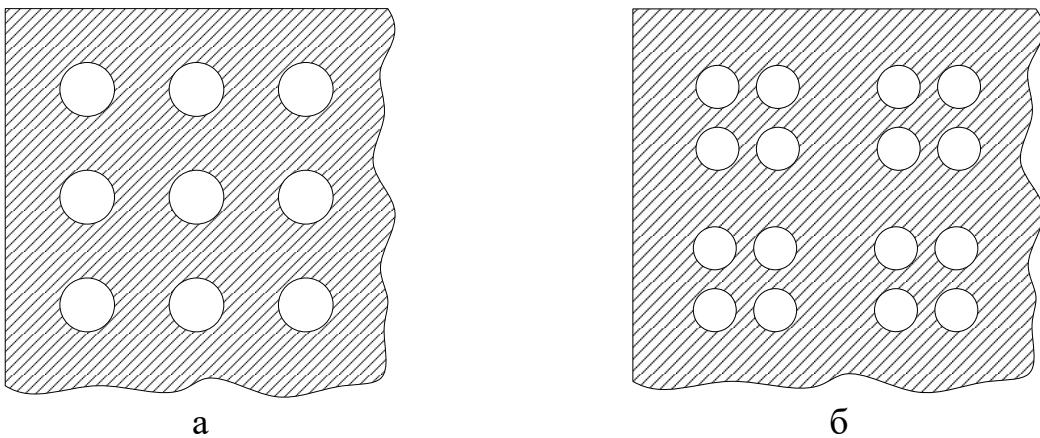
Среды могут проявлять частотно-селективные свойства относительно ЭМИ определенной полосы частот (узкой или широкой) или определенного набора узких полос частот СВЧ-диапазона. Такие свойства обусловлены резонансными явлениями, возникающими в результате взаимодействия ЭМИ с такими средами. Такие явления состоят в резонансном увеличении энергии ЭМИ, поглощаемого средами, или резонансном увеличении энергии ЭМИ, отражаемого средами. В связи с этим полосы частот, которыми характеризуется ЭМИ, относительного которого среды проявляют частотно-селективные свойства, называют резонансными полосами частот. Следует отметить, что полосы резонансного увеличения энергии ЭМИ, поглощаемого средами, называют эффективными полосами поглощения (ЭПП) [23].

Среды, характеризующиеся частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ определенной узкой полосы частот, являются одно- или двухслойными. В литературных источниках их обозначают с помощью термина «узкополосные среды» [24]. В [25, с. 61] определено, что характерное для узкополосных сред предельно минимальное значение ширины резонансной полосы частот составляет 26,0 % от значения точки минимума в этой полосе (т. е. от значения резонансной частоты среды).

Однослойные узкополосные среды характеризуются пространственно-периодической структурой и представляют собой одно из нижеследующего:

1) матрица со сформированными и размещенными в ней с одинаковым шагом сквозными отверстиями (рисунок 1.1, а) или группами сквозных отверстий (рисунок 1.1, б), характеризующихся одинаковыми размером и формой [26] (в ряде публикаций такие отверстия называют апертурами (см., например, [27, 28, 29, 30]);

2) совокупность матрицы и закрепленных с одинаковым шагом в ней или на ее поверхности плоских или объемных элементов, характеризующихся одинаковыми размером и формой (в ряде публикаций совокупность матрицы и одного из указанных элементов либо групп таких элементов названа ячейками (см. например, б, 31)).

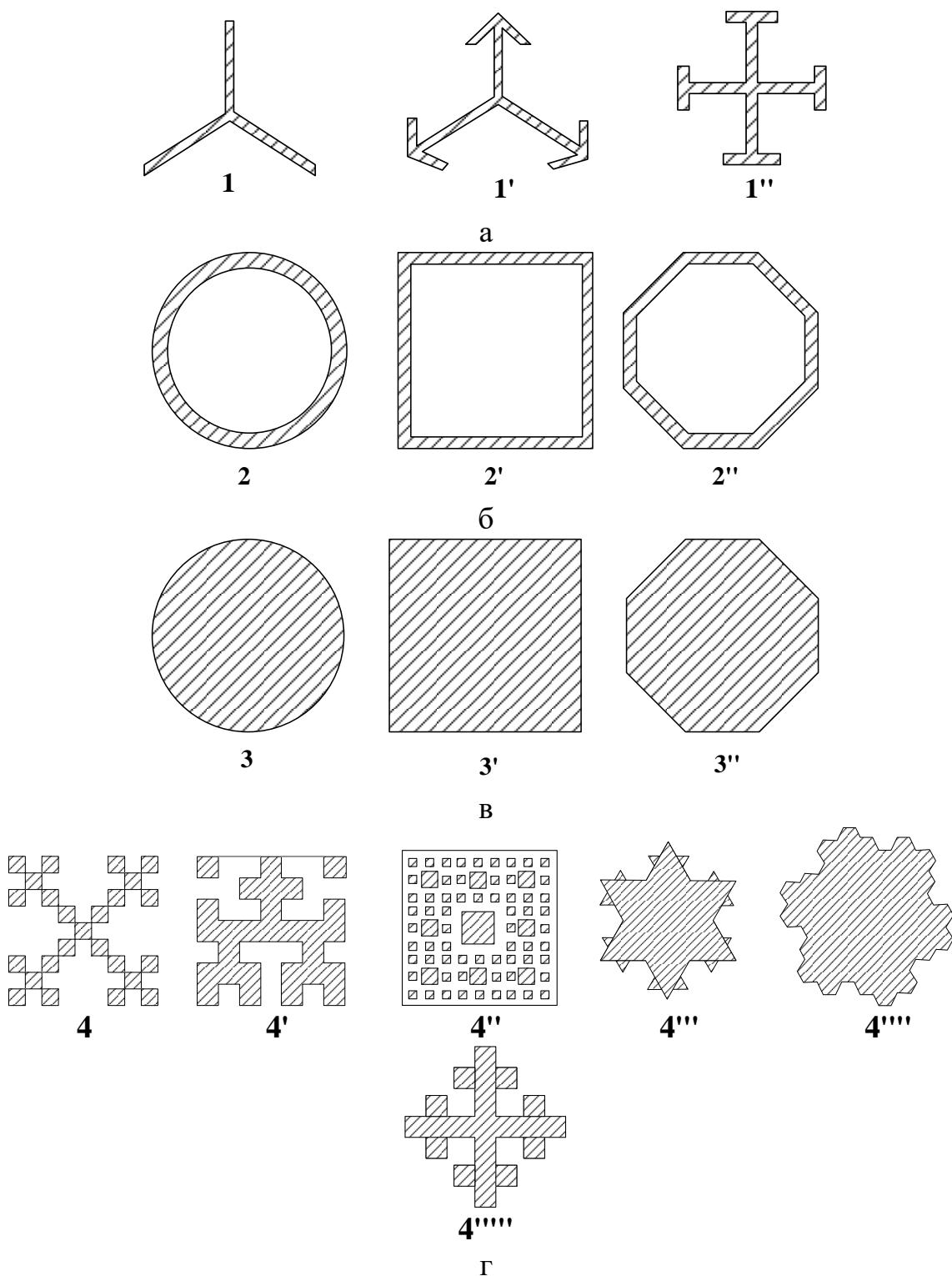


а – среда со сквозными отверстиями, размещенными с одинаковым шагом;
 б – среда с группами сквозных отверстий, размещенными с одинаковым шагом
 Рисунок 1.1 – Схематическое изображение фрагментов поверхностей сред, представляющих собой матрицы со сформированными в них отверстиями круглой формы

Матрица сред, в структуру которых входят сквозные отверстия, изготавливается из электропроводящего или магнитодиэлектрического материала, а сред, в структуру которых входят плоские или объемные элементы, – как правило, из диэлектрического материала. Сквозные отверстия, входящие в структуру первых из указанных сред, как правило, характеризуются круглой, прямоугольной или шестиугольной. Элементы вторых из указанных сред, как правило, изготавливаются из электропроводящего материала. Эти элементы образуют макроструктуру поверхности или объема таких сред. В зависимости от формы, эти элементы условно делятся на следующие группы [32]:

- элементы с центральным соединением их составляющих (рисунок 1.2, а);
- петлевидные элементы (рисунок 1.2, б);
- пластинчатые элементы (рисунок 1.2, в);
- фрактальные элементы (рисунок 1.2, г).

Двухслойные узкополосные среды, как следует из их названия, являются слоистыми и представляют собой совокупность слоя на основе диэлектрического или магнитодиэлектрического материала и слоя на основе электропроводящего материала. Слой на основе диэлектрического или магнитодиэлектрического материала является наружным относительно фронта распространения ЭМИ, взаимодействующего с этими средами, а слой на основе электропроводящего материала – внутренним.



а – элементы с центральным соединением их составляющих;
 б – петлевидные элементы; в – пластиначатые элементы; г – фрактальные элементы
 Рисунок 1.2 – Схематическое изображение элементов, которые могут входить
 в структуру однослойных узкополосных сред: 1 – плоский трипод; 1' – якорь;
 1'' – Иерусалимский крест; 2 – круглая петля; 2' – квадратная петля;
 2'' – гексагональная петля; 3 – круглая пластина; 3' – квадратная пластина;
 3'' – гексагональная пластина; 4 – кривая Минковского; 4' – кривая Гильберта;
 4'' – квадрат Серпинского; 4''' – кривая Коха; 4'''' – кривая Госпера;
 4''''' – фрактальный крест

Резонансные явления, возникающие в результате взаимодействия ЭМИ с однослойными узкополосными средами, как правило, связаны с увеличением энергии ЭМИ, отражаемого ими [33]. Такие явления обусловлены совокупностью следующих физических процессов [34]:

1) электромагнитные волны, взаимодействующие со средами, частично отражаются как от поверхности матрицы таких сред, так и от краев сформированных в ней сквозных отверстий или от поверхности закрепленных в ней или внутри нее элементов;

2) электромагнитные волны, отражающиеся от поверхности матрицы, интерферируют с электромагнитными волнами, отражающимися от краев сформированных в ней сквозных отверстий или от поверхности закрепленных на ней или внутри нее элементов;

3) фаза электромагнитных волн, отражающихся от поверхности матрицы, а также фаза электромагнитных волн, отражающихся от краев сформированных в ней сквозных отверстий или от поверхности закрепленных на ней или внутри нее элементов, зависит от частоты этих волн, как следствие, резонансное явление соответствует той частоте СВЧ-диапазона, при которой фаза характеризующихся ею электромагнитных волн, отражающихся от поверхности матрицы, близка по модулю и по значению относительно фазы электромагнитных волн, отражающихся от краев сформированных в ней сквозных отверстий или от поверхности закрепленных на ней или внутри нее элементов.

Резонансные явления, возникающие в результате взаимодействия ЭМИ с двухслойными узкополосными средами, как правило, связаны с увеличением энергии ЭМИ, поглощаемого ими. В связи с этим в отличие от физических процессов, обуславливающих резонансные явления, возникающие в результате взаимодействия ЭМИ с однослойными узкополосными средами, физические процессы, обуславливающие резонансные явления, возникающие в результате взаимодействия ЭМИ с двухслойными узкополосными средами, основаны на интерференции электромагнитных волн, отражающихся от наружного (т. е. диэлектрического или магнитодиэлектрического) слоя таких сред, и электромагнитных волн, отражающихся от границы раздела наружного и внутреннего (т. е. электропроводящего) слоя таких сред. При этом фаза электромагнитных волн, отражающихся от наружного слоя сред, близка по модулю, но противоположна по значению относительно фазы электромагнитных волн, отражающихся от границы раздела наружного и внутреннего слоев. Кроме того, явление поглощения энергии ЭМИ сопровождается переходом части этой энергии в тепловую [35, с. 34].

В структуру сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ определенного набора полос частот (многополосные среды [36]) или широкой полосы частот (широкополосные среды [37]) СВЧ-диапазона входят, как правило, один или более двух слоев. В [25, с. 61] определено, что характерное для многополосных сред максимальное отношение значения ширины полосы пропускания (т. е. полосы частот ЭМИ, относительного которого среды являются радиопрозрачными) к значению ширины их резонансной полосы частот

составляет $\frac{8}{9}$. Следует отметить, что широкополосные среды – это

разновидность многополосных сред. Это следует из того, что полосы частот ЭМИ, относительно которого широкополосные среды характеризуются частотно-селективными свойствами, перекрывают друг друга в отличие от полос частот ЭМИ, относительно которого частотно-селективными свойствами характеризуются многополосные среды [37].

Преимущество многополосных и широкополосных сред по сравнению с узкополосными средами состоит в том, что они могут использоваться для защиты приборов электронной техники от воздействия ЭМИ, источником которого являются несколько разнотипных устройств (например, оборудование базовых станций мобильной связи, оборудование беспроводных информационных сетей, абонентские устройства для беспроводной связи и т. п.) [38].

Однослойные среды рассматриваемых разновидностей, так же, как и однослойные узкополосные среды, характеризуются пространственно-периодической структурой и представляют собой одно из нижеследующего:

1) матрица со сформированными и размещенными в ней с одинаковым шагом сквозными отверстиями или группами сквозных отверстий, характеризующихся, как правило, круглой, квадратной, прямоугольной или шестиугольной формой и разными размерами в отличие от отверстий, входящих в структуру узкополосных сред;

2) совокупность матрицы и закрепленных с одинаковым шагом в ней или на ее поверхности плоских или объемных элементов, формирующих макроструктуру этих сред и характеризующихся разными размерами и/или формой в отличие от элементов, формирующих макроструктуру однослойных узкополосных сред [39].

Резонансные явления, возникающие в результате взаимодействия электромагнитного излучения с однослойными многополосными и широкополосными средами, обусловлены теми же самыми физическими процессами, что и резонансные явления, возникающие в результате взаимодействия электромагнитного излучения с однослойными узкополосными средами. Отличие состоит лишь в параметрах этих процессов, в частности, в том, что электромагнитные волны, отражающиеся от границ отверстий, сформированных в матрице сред рассматриваемой разновидности, или от закрепленных в матрице таких сред элементов, характеризуются разными фазами.

В многослойных многополосных и широкополосных средах слои располагаются таким образом, чтобы значение волнового сопротивления каждого следующего слоя, входящего в структуру рассматриваемых сред, выше, чем значение волнового сопротивления предыдущего слоя. В связи с отмеченной особенностью в некоторых литературных источниках эти среды называют градиентными [40, 41]. Слои таких сред представляют собой одно или несколько из нижеследующего:

1) матрица со сформированными и размещенными в ней с одинаковым

шагом сквозными отверстиями (рисунок 1.1, а) или группами сквозных отверстий (рисунок 1.1, б), характеризующихся одинаковым размером и, как правило, круглой, квадратной, прямоугольной или шестиугольной формой [26];

2) совокупность матрицы и закрепленных с одинаковым шагом в ней или на ее поверхности плоских или объемных элементов, характеризующихся одинаковыми размером и формой

3) матрица в объеме которой распределены частицы дисперсных материалов.

Резонансные явления, возникающие в результате взаимодействия электромагнитного излучения с многослойными многополосными и широкополосными средами, обусловлены совокупностью следующих физических процессов:

1) часть электромагнитных волн, падающих на поверхности сред, отражается от этих поверхностей;

2) часть электромагнитных волн, падающих на поверхности сред и не отражающихся от последних, проходит внутрь них и отражается от границ раздела между слоями, входящими в структуру сред;

3) электромагнитные волны, падающие на поверхности сред, интерферируют с электромагнитными волнами, отражающимися от этих поверхностей, а также с электромагнитными волнами, отражающимися от границ раздела между слоями, входящими в структуру сред;

4) фаза электромагнитных волн, отражающихся от поверхностей сред, а также электромагнитных волн, отражающихся от границ раздела между слоями, входящими в структуру сред, зависит от частоты этих волн, как следствие, резонансное явление соответствует тем частотам СВЧ-диапазона, при которых фазы характеризующихся ими электромагнитных волн, падающих на поверхности сред, близки по модулю, но противоположны по значению относительно фаз электромагнитных волн, отражающихся от этих поверхностей или относительно фаз электромагнитных волн, отражающихся от границ раздела между слоями, входящими в структуру сред.

На основе вышеизложенного установлены следующие признаки, которые целесообразно использовать для классификации сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ СВЧ-диапазона:

- структура среды;
- тип элементов, входящих в структуру среды;
- количество слоев, входящих в структуру среды;
- характеристика резонансной полосы частот;
- резонансное явление, наблюдаемое в результате взаимодействия ЭМИ со средой.

На рисунке 1.3 представлена схема, отражающая результаты классификации сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ СВЧ-диапазона, в соответствии с установленными признаками. На этой схеме также отражены связи между средами, относящимися к различным классам.

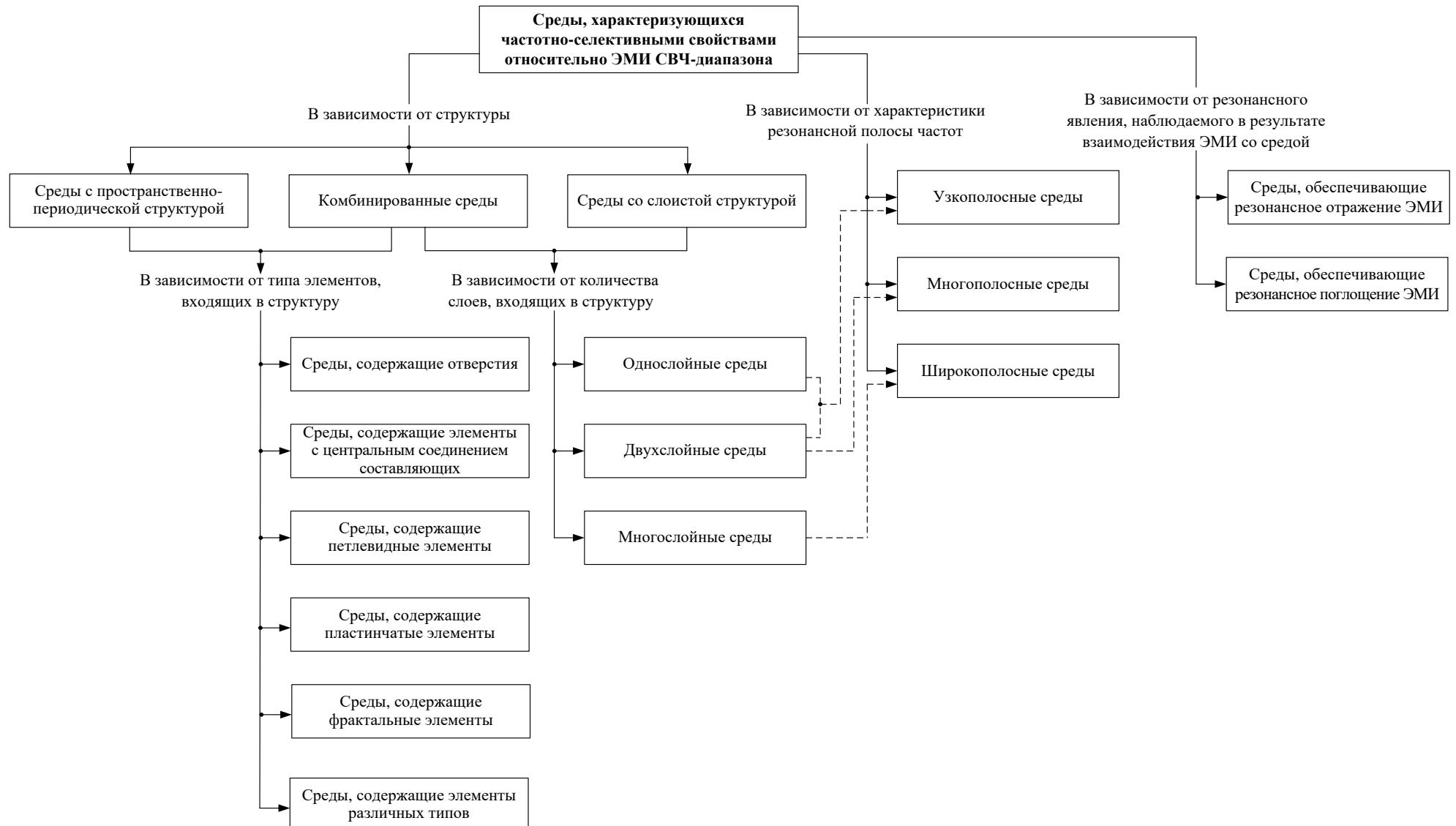


Рисунок 1.3 – Классификация сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ СВЧ-диапазона, в соответствии с установленными признаками

1.2 Методики моделирования сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно электромагнитного излучения СВЧ-диапазона

Значение точки минимума в полосе частот ЭМИ, относительно которого среды характеризуются частотно-селективными свойствами (т. е значение резонансной частоты среды), а также ширина этой полосы зависят от:

- геометрических параметров компонентов сред (т. е. параметров элементов, входящих в структуру сред, и параметров матриц сред), в частности от величины ширины элементов, входящих в структуру сред, к периодичности расположения этих элементов на поверхности или в объеме матрицы [25, с. 61];
- электродинамических параметров компонентов сред.

Если в структуру рассматриваемых сред входят отверстия, то значения резонансной частоты таких сред зависят от значений следующих параметров компонентов последних [42]:

- 1) длина (L_h) и ширина (W_h) отверстий;
- 2) шаг размещения отверстий (S_h);
- 3) толщина матрицы (T_{mh}), в которой сформированы отверстия;
- 4) количество отверстий на единицу площади;

5) удельная электропроводность или относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости матрицы, в которой сформированы отверстия (σ_{mh} или ϵ_{mh} и μ_{mh} соответственно).

На рисунке 1.4 представлено схематическое изображение фрагмента среды, в структуру которой входят отверстия, с указанием условного обозначения первых трех вышеперечисленных параметров.

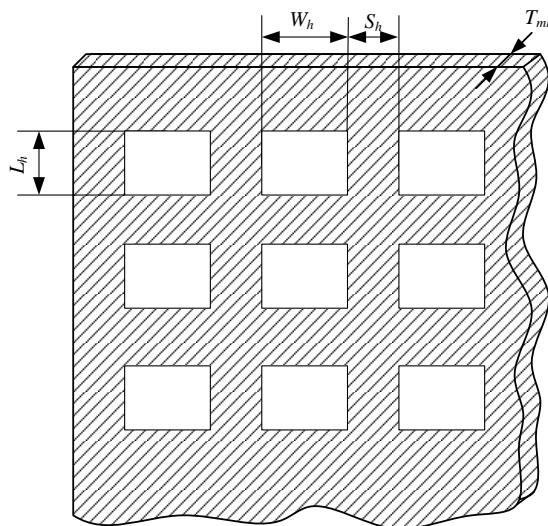


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение фрагмента среды, в структуру которой входят отверстия, с указанием условного обозначения их параметров

Если в структуру рассматриваемых сред входят плоские или объемные элементы, то значения резонансной частоты таких сред зависят от значений

следующих параметров элементов последних [22]:

- 1) ширина элементов (W);
- 2) длина (L_c) и ширина (W_c) составляющих элементов;
- 3) шаг, с которым закреплены элементы на поверхности или в объеме матрицы среды (S);
- 4) периодичность расположения элементов на поверхности или в объеме матрицы среды (P);
- 5) толщина матрицы (T_m), в которой закреплены элементы;
- 6) относительная диэлектрическая проницаемость материала матрицы (ϵ_m), на поверхности или в объеме которой закреплены элементы.

На рисунке 1.5 представлено схематическое изображение фрагмента среды, в структуру которой входят плоские элементы, с указанием условных обозначений первых пяти вышеперечисленных параметров.

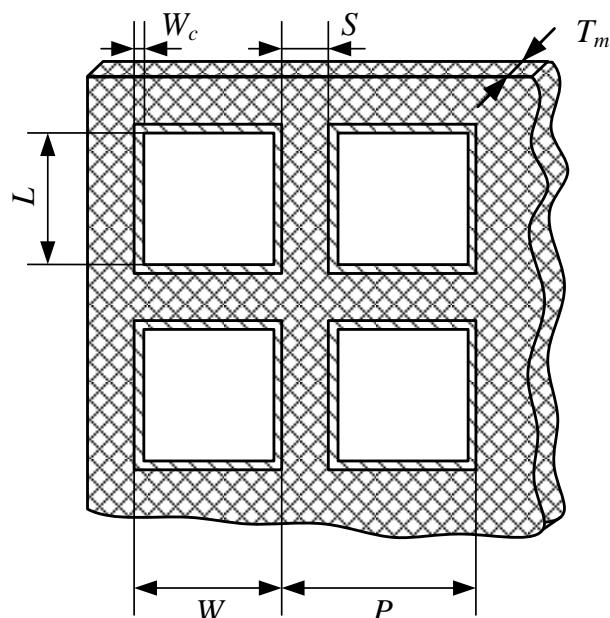


Рисунок 1.5 – Схематическое изображение фрагмента среды, характеризующейся частотно-селективными свойствами, с обозначением ее основных параметров, от которых зависят значения ее резонансной частоты

Если структура рассматриваемых сред представляет собой совокупность слоев, то значения резонансной частоты таких сред зависят от значений следующих параметров последних:

- 1) толщина каждого из слоев;
- 2) количество слоев;
- 3) удельная электропроводность или относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала каждого из слоев.

В связи с вышеизложенной особенностью на практике процессу формирования рассматриваемых сред предшествует процесс их моделирования. Зачастую второй из указанных процессов является неотъемлемой частью первого, так как благодаря его реализации можно сократить временные и материальные затраты на обеспечение для среды требуемого значения

резонансной частоты. Это обусловлено тем, что процесс моделирования направлен на установление расчетным путем закономерностей изменения значений резонансной частоты (длины электромагнитной волны на резонансной частоте) формируемых сред от значений параметров элементов или слоев, входящих в структуру этих сред. Совокупности формул, применяемых для такого моделирования, представляют собой описания моделей взаимодействия ЭМИ со средами, так как на основе этих формул вычисляются величины параметров, характеризующих отклик сред на воздействующее на их излучение. Этими параметрами являются эффективность экранирования ЭМИ, коэффициенты передачи и отражения ЭМИ сред.

Номенклатура формул, применяемых для моделирования рассматриваемых сред, а также порядок и сложность реализации расчетов по этим формулам зависят от типа сред. Порядок расчетов, реализуемых в настоящее время при моделировании пространственно-периодических сред, зависит от типа элементов, которые будут входить в их структуру.

Если в структуру пространственно-периодической среды будут входить сквозные отверстия, то в ходе моделирования такой среды расчеты реализуются в следующем порядке.

1. Расчет обеспечиваемого моделируемой средой ослабления ЭМИ (A) по формуле:

$$A = 20 \cdot \lg e^{\left(\frac{\pi}{W_h}\right) \cdot L_h}, \text{ дБ.} \quad (1.1)$$

2. Расчет потерь энергии взаимодействующего с моделируемой средой ЭМИ, обусловленных явлением отражения этого излучения от границы раздела «первичная среда распространения ЭМИ – моделируемая среда» (R), с использованием выражения:

$$R = 4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot f^2 \cdot W_h \cdot dist, \text{ дБ,} \quad (1.2)$$

где f – частота ЭМИ;

$dist$ – расстояние от источника ЭМИ до границы раздела «первичная среда распространения ЭМИ – моделируемая среда».

3. Расчет потерь энергии взаимодействующего с моделируемой средой ЭМИ, обусловленных явлением многократного переотражения этого излучения от внутренних поверхностей моделируемой среды с использованием выражения:

$$B = 20 \cdot \lg \left| 1 - \frac{(4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot f^2 \cdot dist - 1)^2}{(4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot f^2 \cdot dist + 1)^2} e^{-2\gamma T_{mh}} \right|, \quad (1.3)$$

где γ – постоянная распространения электромагнитной волны в моделируемой среде, вычисляемая в соответствии с формулой (1.4).

$$\gamma = \begin{cases} \sqrt{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \sigma_{mh}}, & \text{если матрица из электропроводящего материала;} \\ 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_{mh} \cdot \mu_{mh}}, & \text{если матрица из магнитодиэлектрического материала.} \end{cases} \quad (1.4)$$

4. Расчет поправочного коэффициента для учета влияния сквозных отверстий (C_1) на эффективность экранирования ЭМИ, по формуле:

$$C_1 = -10 \cdot \lg(a \cdot n), \text{дБ,} \quad (1.5)$$

где a – площадь отверстия среды;

n – количество отверстий, входящих во фрагмент среды, с которым взаимодействует ЭМИ.

5. Расчет поправочного коэффициента для учета влияния проникновения низкочастотного ЭМИ вглубь матрицы среды (C_2), с использованием выражения:

$$C_2 = -20 \cdot \lg \left[1 + \frac{35}{\left(\pi \cdot f \cdot S_h^2 \cdot \sigma_{mh} \cdot \mu_{mh} \right)^{1,15}} \right], \text{дБ,} \quad (1.6)$$

6. Расчет поправочного коэффициента для учета влияния близко расположенных отверстий на значение эффективности экранирования ЭМИ (C_3), с использованием выражения:

$$C_3 = 20 \cdot \lg \left[\frac{1}{\tanh \left(\frac{A}{8,686} \right)} \right], \text{дБ.} \quad (1.7)$$

7. Расчет эффективности экранирования ЭМИ (SE), характерной для среды, как функции от частоты по формуле:

$$SE(f) = A + B + R + C_1 + C_2 + C_3, \text{дБ} \quad (1.8)$$

8. Нахождение значение точки максимума функции (1.8) путем реализации следующих действий:

- 1) взятие первой производной от функции (1.8);
- 2) приравнивание к нулю взятой производной;
- 3) решение уравнения, полученного в результате приравнивания к нулю взятой производной.

Найденное значение будет соответствовать значению резонансной

частоты (f_r) среды.

Следует отметить, что приведенные формулы получены с учетом того, что сквозные отверстия в рассматриваемых средах являются аналогами волноводов. Также следует отметить, что в ходе моделирования таких сред необходимо не только выполнять расчеты в соответствии с представленным порядком, но и учитывать следующие условия и особенности:

1) расстояние между отверстиями, входящими в структуру сред, должно быть не более половины длины волны на резонансной частоте, характерной для этой среды (при таком расстоянии степень зависимости значения эффективности экранирования ЭМИ среды от угла падения ЭМИ минимальна) [43];

2) среды, в структуру которых входят сквозные отверстия прямоугольной формы, характеризуются более широкой резонансной полосой частот, чем среды, в структуру которых входят сквозные отверстия круглой или шестиугольной форм [42].

Порядок расчетов, реализуемых в настоящее время при моделировании пространственно-периодических сред, представляющих собой совокупность матрицы и закрепленных на ее поверхности или в ее объеме плоских или объемных элементов, зависит от типа и формы этих элементов.

Если элементы, на основе которых планируется формировать структуру пространственно-периодических сред, являются плоскими элементами с центральным соединением их составляющих (см. рисунок 1.2, а), то в ходе моделирования таких сред реализуются расчеты на основе следующих формул [7, 22]:

$$L = \frac{\lambda_r}{4}, \text{ м,} \quad (1.9)$$

где λ_r – длина электромагнитной волны на резонансной частоте ($\lambda_r = \frac{c}{f_r}$, где c – скорость света в вакууме);

$$W = \frac{\lambda_r}{3}, \text{ м.} \quad (1.10)$$

Если элементы, на основе которых планируется формировать структуру пространственно-периодических сред, являются петлевидными (см. рисунок 1.2, б), пластинчатыми (см. рисунок 1.2, в) и / или фрактальными (см. рисунок 1.2, г), то расчеты в ходе моделирования таких сред выполняются с учетом того, что для каждой из них может быть построена эквивалентная электрическая схема, включающая в себя катушки индуктивности и конденсаторы. Катушки индуктивности в такой схеме соответствуют составляющим элементам, на основе которых планируется формировать структуру пространственно-периодических сред, а конденсаторы – зазорам между этими элементами. При этом значения индуктивности

указанных катушек прямо пропорциональны значению соотношения $\frac{L_c}{W_c}$, а значения емкости указанных конденсаторов прямо пропорциональны значению соотношения $\frac{W_c}{S}$ [23]. Следует отметить, что сложность эквивалентных электрических схем пространственно-периодических сред зависит от сложности формы элементов, на основе которых планируется формировать эти среды.

Аналогичная особенность характерна для сложности расчетов, выполняемых в ходе моделирования пространственно-периодических сред: она определяется сложностью формы элементов, на основе которых планируется формировать эти среды.

Эквивалентные электрические схемы фрагментов пространственно-периодических сред, в структуру которых входят элементы, контуры границ которых образуют квадрат, представлены на рисунке 1.3 [25, с. 66].

Как видно из рисунка 1.3, в, в случае, если элементы, входящие в структуру пространственно-периодической среды, характеризуются сложной формой (например, являются фрактальными элементами), то в ходе построения эквивалентных электрических схем таких сред указанные элементы должны быть условно разделены на простые составляющие, т. е. составляющие, которым соответствует одна емкость, или одна индуктивность, или совокупность одной емкости и одной индуктивности [7].

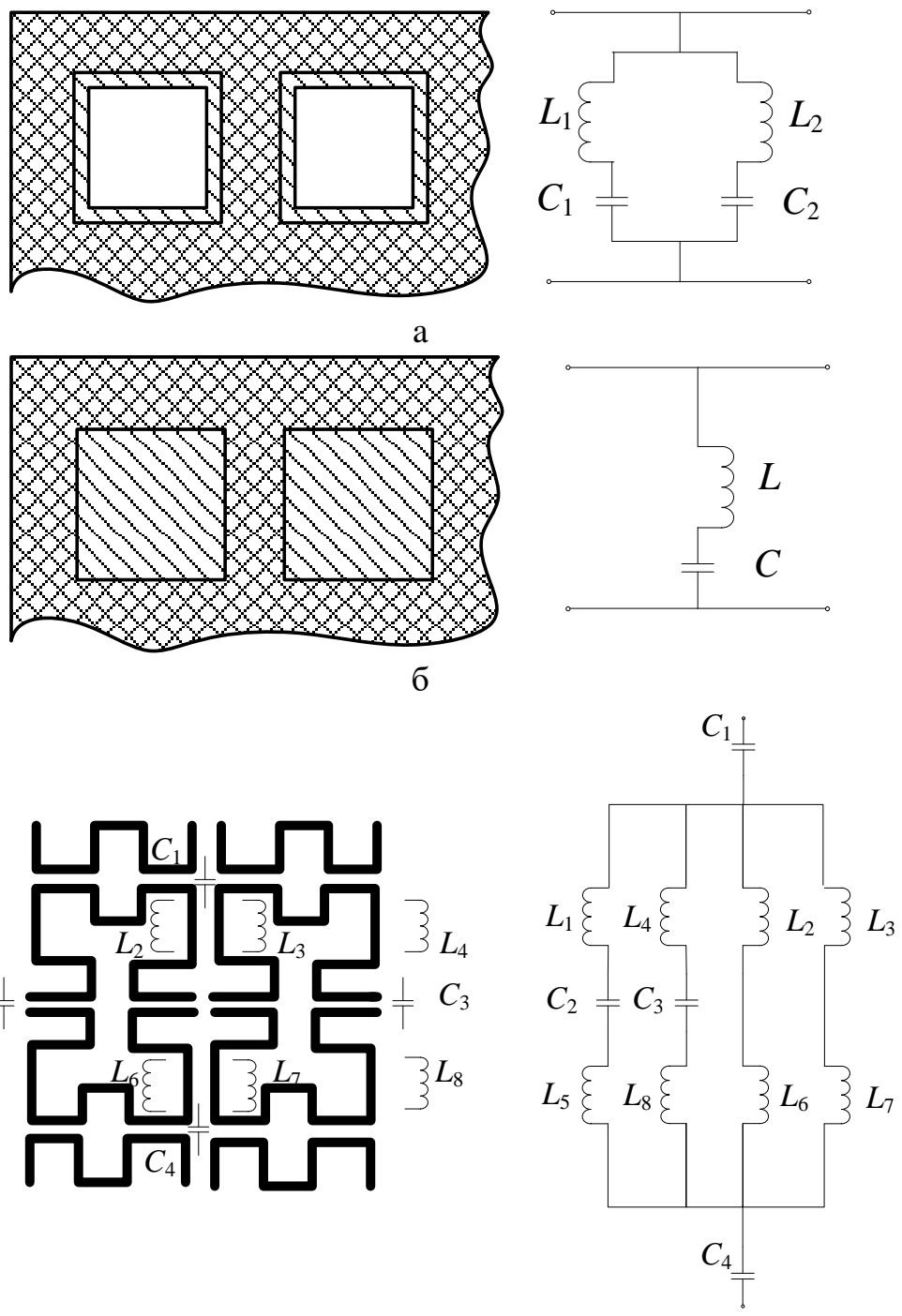
Методики расчетов, используемые в настоящее время при моделировании пространственно-периодических сред, в структуру которых входят петлевидные, пластинчатые элементы, а также элементы, характеризующиеся сложной формой, могут быть условно разделены на четыре вида в зависимости от номенклатуры начальных условий или допущений, которыми необходимо задаваться перед реализацией этих методик. Основные характеристики этих методик представлены в таблице 1.1.

При использовании представленных в таблице 1.1 методик необходимо учитывать следующие начальные условия наряду с теми условиями, которые приведены в указанной таблице [6]:

$$S \leq 0,4 \cdot \lambda_r; \quad (1.11)$$

$$W_c \approx 0,05 \cdot \lambda_r. \quad (1.12)$$

Условия, описанные с помощью выражений (1.11) и (1.12), необходимо учитывать для того, чтобы минимизировать степень зависимости значения резонансной частоты от угла падения и степени поляризации ЭМИ.



а – среда, в структуру которой входят петлевидные элементы; б – среда, в структуру которой входят пластинчатые элементы; в – среда, в структуру которой входят фрактальные элементы в виде кривой Гильберта

Рисунок 1.3 – Схематические изображения фрагментов поверхностей (слева) и эквивалентные электрические схемы (справа) пространственно-периодических сред, в структуру которых входят элементы квадратной формы

Таблица 1.1 – Основные характеристики методик, используемых при моделировании пространственно-периодических сред, в структуру которых входят петлевидные, пластинчатые или фрактальные элементы

Условное наименование методики	Характеристики методики
Методика вида 1 [7]	1. Начальное допущение: $T_m \rightarrow 0$. 2. Методика может быть использована при моделировании пространственно-периодических сред, в структуру которых входят петлевидные элементы
Методика вида 2 [25, с. 64–67]	1. Начальное допущение: $T_m \rightarrow 0$. 2. Начальные условия: $W \ll P \cap S \ll P \cap P \ll \lambda_r$. 3. Методика может быть использована при моделировании пространственно-периодических сред, в структуру которых входят пластинчатые элементы.
Методика вида 3 [6]	1. Начальное условие должно быть основано на результатах сравнения значений T_m и W_c . 2. Методика может быть использована при моделировании пространственно-периодических сред, в структуру которых входят петлевидные элементы.
Методика вида 4 [23]	1. Элементы, входящие в структуру пространственно-периодической среды должны быть условно разделены на простые составляющие, каждая из которых представляет собой совокупность одной емкости и одной индуктивности 2. Методика может быть использована при моделировании пространственно-периодических сред, в структуру которых входят элементы, характеризующиеся сложной формой

Методика вида 1 реализуется в следующем порядке [7].

1. Расчет индуктивного (X_L) и емкостного (X_C) сопротивлений элемента моделируемой среды в соответствии с нижеследующими формулами.

$$X_L = \frac{F_0 \cdot W \cdot \cos \theta}{\lambda}, \quad (1.13)$$

$$X_C = \frac{16 \cdot F_0 \cdot W}{\lambda \cdot \epsilon_r \cdot \cos \theta}, \quad (1.14)$$

$$F_0 = G + \log \left(\frac{1}{\beta} \right), \quad (1.15)$$

где λ – длина волны ЭМИ;

$$\beta = \sin\left(\frac{\pi \cdot W_c \cdot S}{2 \cdot P}\right);$$

G – коэффициент коррекции первого порядка, рассчитываемый на основе формул (1.16) – (1.18).

$$A_m = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{P \cdot \sin \theta}{\lambda_p} + 1\right)^2 - \frac{P^2}{\lambda^2}}} - 1, \quad (1.16)$$

$$A_p = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{P \cdot \sin \theta}{\lambda_p} - 1\right)^2 - \frac{P^2}{\lambda^2}}} - 1, \quad (1.17)$$

$$G = \frac{(\beta^2 - 1)^2 \left(\left(\frac{\beta^2}{4} - 1 \right) \cdot (A_m + A_p) - 4 \cdot A_m \cdot A_p \cdot \beta^6 \right)}{2 \cdot \left(2 \cdot A_m \cdot A_p \cdot \beta^6 - \frac{\beta^2}{4} + \beta^2 \cdot (A_m + A_p) \cdot \left(-\frac{\beta^2}{8} + \frac{\beta^2}{2} + 1 \right) + 1 \right)}, \quad (1.18)$$

где A_m и A_p – коэффициенты первого порядка.

2. Расчет нормализованной проводимости (Y) моделируемой среды по формуле:

$$Y = \frac{1}{j \cdot X_L - j \cdot X_C}. \quad (1.19)$$

3. Расчет функции зависимости коэффициента передачи ЭМИ (S_{21}) моделируемой среды от длины электромагнитных волн, взаимодействующих с этой средой, по формуле:

$$S_{21}(\lambda) = -\frac{2}{\sqrt{|Y^2 + 4|}}. \quad (1.20)$$

4. Нахождение значение точки минимума функции (1.20) путем реализации следующих действий:

- 1) взятие первой производной от функции (1.20);
- 2) приравнивание к нулю взятой производной;
- 3) решение уравнения, полученного в результате приравнивания к нулю взятой производной.

Найденное значение точки минимума будет соответствовать значению длины электромагнитной волны на резонансной частоте моделируемой среды.

Методика вида 2 основана на реализации следующих действий [25, с. 64–67].

1. Расчет индуктивного и емкостного сопротивлений элемента моделируемой среды в соответствии с нижеследующими формулами.

$$X_L = \frac{W}{P} \cdot F(P, 2 \cdot W_c, \lambda, Q), \quad (1.21)$$

$$X_C = 4 \cdot \varepsilon_{eff} \cdot \frac{W}{P} \cdot F(P, S, \lambda, Q), \quad (1.22)$$

где ε_{eff} – значение эффективной диэлектрической проницаемости материала матрицы моделируемой среды, рассчитываемое в рамках методики рассматриваемого вида согласно формуле $\frac{\varepsilon_r + 1}{2}$;
 $F(P, 2W_c, \lambda, Q)$ и $F(P, S, \lambda, Q)$ – значения, вычисляемые на основе нижеследующих формул и условий.

Для ТМ-волны:

$$F(P, x, \lambda, \theta) = \frac{P}{\lambda \cdot \cos \theta} \cdot \left[\ln \frac{1}{\beta'} + G(P, x, \lambda, \theta) \right], \quad (1.23)$$

$$G(P, x, \lambda, \theta) = \frac{0,5 \cdot (1 - \beta'^2) \left[\left(1 - \frac{\beta'^2}{4} \right) \cdot (A_+ + A_-) + 4 \cdot \beta'^2 \cdot A_+ \cdot A_- \right]}{\left(1 - \frac{\beta'^2}{4} \right) + \beta'^2 \cdot \left(1 + \frac{\beta'^2}{2} - \frac{\beta'^4}{2} \right) \cdot (A_+ + A_-) + \beta'^6 \cdot A_+ \cdot A_-}, \quad (1.24)$$

$$\begin{cases} \beta' = \sin \left(\frac{\pi \cdot x \cdot S}{2 \cdot P} \right), \\ x = 2 \cdot W_c, \text{ если расчет выполняется по формуле (1.21),} \\ x = S, \text{ если расчет выполняется по формуле (1.22),} \end{cases} \quad (1.25)$$

$$A_+ = A_- = \left[1 - \left(\frac{P \cdot \sin \theta}{\lambda} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - 1. \quad (1.26)$$

Для ТЕ-волны:

$$F(P, x, \lambda, \theta) = \frac{P \cdot \cos \theta}{\lambda} \cdot \left[\ln \frac{1}{\beta} + G(P, x, \lambda, \theta) \right], \quad (1.27)$$

где $G(P, x, \lambda, \theta)$ вычисляется по формуле (1.24) с учетом условия (1.25).

$$A_{\pm} = \left[\left(\frac{P \cdot \sin \theta}{\lambda} \pm 1 \right)^2 - \left(\frac{P}{\lambda} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} - 1. \quad (1.28)$$

2. Расчет нормализованной проводимости моделируемой среды в соответствии с формулой (1.19).

3. Расчет функции зависимости коэффициента передачи ЭМИ моделируемой среды от длины электромагнитных волн, взаимодействующих с этой средой, в соответствии со формулой (1.20).

4. Нахождение значения точки минимума рассчитанной в соответствии с формулой (1.20) функции путем реализации следующих действий:

- 1) взятие первой производной от рассчитанной функции;
- 2) приравнивание к нулю взятой производной;
- 3) решение уравнения, полученного в результате приравнивания к нулю взятой производной.

Найденное значение будет соответствовать значению длины электромагнитной волны на резонансной частоте моделируемой среды.

Методика вида 3 основана на реализации следующих действий [6].

1. Сравнение толщины матрицы (T_m) и ширины составляющих элементов (W_c) моделируемой среды.

2. Выполнение расчета значения корректирующего коэффициента E_e на основе одной из следующих формул:

$$E_e = \frac{\varepsilon_m + 1}{2} + \frac{\varepsilon_m - 1}{2} \left(1 + \frac{12}{W_c \sqrt{T_m}} \right) + 0,04 \left(1 - \frac{W_c^2}{T_m} \right), \text{ если } T_m > W_c; \quad (1.29)$$

$$E_e = \frac{\varepsilon_m + 1}{2} + \frac{\varepsilon_m - 1}{2} \left(1 + \frac{12}{W_c \sqrt{T_m}} \right), \text{ если } T_m \leq W_c. \quad (1.30)$$

3. Выполнение расчета W по формуле:

$$W = \frac{\lambda_r}{\sqrt[4]{\epsilon_e}}, \text{ м.} \quad (1.31)$$

Методика вида 4 основана на реализации следующих действий [23].

1. Вычисление входного импеданса среды (Z_{in}) на основе следующей формулы:

$$Z_{in} = \frac{Z_e}{Z_p}, \quad (1.32)$$

где Z_e – комплексное сопротивление одного из элементов моделируемой среды; Z_p – вычисляемое на основе нижеследующей формулы комплексное сопротивление одной из простых составляющих, на которые должны быть условно разделены элементы, входящие в структуру моделируемой среды:

$$Z_p = j \cdot \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_c}{c_m} \right), \quad (1.33)$$

где c_m – скорость света в матрице моделируемой среды;

f – частота ЭМИ.

2. Вычисление коэффициента отражения ЭМИ (S_{11}) моделируемой среды на основе следующей формулы:

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}, \quad (1.34)$$

где $Z_0 = 120 \cdot \pi$ Ом – волновое сопротивление вакуума.

3. Определение значения частот ЭМИ, при которых выполняется следующее условие:

$$S_{11} \leq -10,0 \text{ дБ} \quad (1.35)$$

В работе [23] указано, что условие (1.35) выполнимо, если:

$$|Z_{in}| \in [195; 725]. \quad (1.36)$$

В ходе моделирования сред, характеризующихся слоистой структурой, реализуются следующие действия [44, с. 20, 21; 45, с. 69, 70].

1. Вычисление значений волнового сопротивления каждого из слоев моделируемой среды на основе следующей формулы:

$$Z_l = \sqrt{\frac{\mu_l^*}{\epsilon_l^*}}; l \in [1; n]; l \in Z, \quad (1.37)$$

где l – порядковый номер слоя;

n – количество слоев моделируемой среды;

μ_l^* и ϵ_l^* – соответственно комплексные магнитная и диэлектрическая проницаемости материала l -го слоя моделируемой среды.

2. Вычисление значений постоянной распространения электромагнитной волны в каждом из слоев моделируемой среды на основе следующей формулы:

$$\gamma_l = \begin{cases} \sqrt{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \sigma_l}, & \text{для слоя из электропроводящего материала;} \\ 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_l^* \cdot \mu_l^*}, & \text{для слоя из магнитодиэлектрического материала;} \end{cases} \quad (1.38)$$

где σ_l – значение удельной электропроводности материала l -го слоя моделируемой среды.

3. Вычисление значения входного импеданса нижнего (относительно фронта распространения ЭМИ) слоя моделируемой среды (Z_{in_1}) по следующей формуле:

$$Z_{in_1} = \frac{Z_0 - j \cdot Z_1 \cdot \operatorname{tg}(\gamma_1 \cdot d_1)}{Z_1 - j \cdot Z_0 \cdot \operatorname{tg}(\gamma_1 \cdot d_1)} \cdot Z_1, \quad (1.39)$$

где Z_1 – волновое сопротивление нижнего (относительно фронта распространения ЭМИ) слоя моделируемой среды;

γ_1 – постоянная распространения электромагнитной волны в нижнем (относительно фронта распространения ЭМИ) слоя моделируемой среды;

d_1 – толщина нижнего (относительно фронта распространения ЭМИ) слоя моделируемой среды.

4. Поочередное вычисление значений входного импеданса каждого из слоев моделируемой среды, расположенных между ее нижним и верхним (относительно фронта распространения ЭМИ) слоями, по следующей формуле:

$$Z_{in_l} = \frac{Z_{in_{l-1}} - j \cdot Z_l \cdot \operatorname{tg}(\gamma_l \cdot d_l)}{Z_l - j \cdot Z_{in_{l-1}} \cdot \operatorname{tg}(\gamma_l \cdot d_l)} \cdot Z_l; l \in [2; n-1], l \in Z, \quad (1.40)$$

d_l – толщина l -го слоя моделируемой среды.

5. Вычисление значения входного импеданса верхнего (относительно фронта распространения ЭМИ) слоя по выражению:

$$Z_{in_n} = \frac{Z_{in_{n-1}} - j \cdot Z_n \cdot \operatorname{tg}(\gamma_n \cdot d_n)}{Z_n - j \cdot Z_{in_{n-1}} \cdot \operatorname{tg}(\gamma_n \cdot d_n)} \cdot Z_n, \quad (1.41)$$

где Z_{in_n} – волновое сопротивление верхнего (относительно фронта распространения ЭМИ) слоя моделируемой среды;

γ_n – постоянная распространения электромагнитной волны в верхнем (относительно фронта распространения ЭМИ) слоя моделируемой среды;

d_n – толщина верхнего (относительно фронта распространения ЭМИ) слоя моделируемой среды.

4. Вычисление коэффициента отражения ЭМИ моделируемой среды на основе формулы (1.26) при условии подстановки в эту формулу вместо Z_{in} результата выполненного согласно формуле (1.33) расчета входного импеданса первого (относительно фронта распространения ЭМИ) слоя моделируемой среды (Z_{in_1}).

5. Установление значений резонансной частоты моделируемой среды на основе вычисленного коэффициента отражения ЭМИ и при учете условия (1.27).

Таким образом, в ходе моделирования сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ СВЧ-диапазона, необходимо учитывать то, что эти среды представляют собой совокупность элементов. Этими элементами являются:

1) для однослойных сред – сквозные отверстия, являющиеся аналогами волноводов, либо плоские или объемные элементы (ячейки), для которых могут быть построены эквивалентные электрические схемы, включающие в себя катушки индуктивности и конденсаторы и которые описываются с помощью значений сопротивлений этих катушек и конденсаторов;

2) для многослойных сред – слои, описываемые с помощью одной из следующих совокупностей значений:

– значение толщины слоев, а также значения сопротивлений катушек индуктивности и конденсаторов, входящих в состав эквивалентных электрических схем, которые могут быть построены для элементов (ячеек) каждого из слоев (если в структуру слоев входят плоские или объемные элементы);

– значение толщины слоев, а также значения комплексной магнитной и диэлектрической проницаемостей или удельной электропроводности материалов, на основе которых они изготовлены (если слои изготовлены на основе дисперсных материалов).

На основе представленных в разделе сведений можно заключить, что с помощью современных методик моделирования сред, характеризующихся частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ СВЧ-диапазона, можно установить закономерности изменения значений резонансной частоты (длины электромагнитной волны на резонансной частоте) таких сред, а также

величин параметров, характеризующих «отклик» этих сред на воздействующее на них ЭМИ (т. е. значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ), в зависимости от:

- геометрических параметров, характеризующих структуру сред;
- электродинамических параметров (удельной электропроводности, относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей) матриц сред (если в структуру сред входят отверстия или плоские либо объемные элементы);
- электродинамических параметров (удельной электропроводности, относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей) материалов слоев сред (если структура сред представляет собой совокупность слоев).

Это обуславливает большой объем научных работ, в которых отражены результаты установления вышеуказанных закономерностей в зависимости от перечисленных параметров. Однако, в современных научных работах не представлены широко закономерности изменения значений резонансной частоты (длины электромагнитной волны на резонансной частоте), а также коэффициентов отражения и передачи ЭМИ рассматриваемых сред в зависимости от параметров материалов, на основе которых изготовлены входящие в структуру этих сред элементы. Это обусловлено тем, что в моделях, с помощью которых описывается взаимодействие ЭМИ со средами, характеризующимися частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ СВЧ-диапазона, не учтены указанные параметры (за исключением моделей, с помощью которых описывается взаимодействие ЭМИ со слоистыми средами). В связи с этим, установление обозначенных закономерностей является новой научной задачей. Благодаря решению этой задачи можно обеспечить как совершенствование моделей, с помощью которых описывается взаимодействие ЭМИ со средами, характеризующимися частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ СВЧ-диапазона, так и совершенствование существующих технологий изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона.

1.3 Частотно-селективные электромагнитные экраны СВЧ-диапазона

1.3.1 Экраны, характеризующиеся пространственно-периодической структурой

Частотно-селективные электромагнитные экраны СВЧ-диапазона представляют собой среды конечных размеров, характеризующиеся частотно-селективными свойствами относительно ЭМИ указанного диапазона частот. Такие экраны классифицируются так же, как и указанные среды (рисунок 1.3).

Современные технологии изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, характеризующихся пространственно-периодической структурой, могут быть условно разделены на пять групп

в зависимости от заложенных в их основу методов преобразования или получения элементов для указанных экранов (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Характеристики технологий изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, характеризующихся пространственно-периодической структурой

Условное наименование технологий	Методы, заложенные в основу технологий
Технологии группы 1	Формование отверстий в листовых материалах
Технологии группы 2	Упорядоченное размещение и закрепление в объеме диэлектрических матриц плоских или объемных элементов, полученных на основе магнитодиэлектрических или электропроводных материалов
Технологии группы 3	Упорядоченное нанесение или закрепление на поверхностях диэлектрических подложек плоских или объемных элементов, полученных на основе электропроводящих материалов
Технологии группы 4	3D-печать
Технологии группы 5	Машинная вязка или вышивка

Экраны, изготовленные в соответствии с технологией группы 1, принято называть экранами щелевого типа или перфорированными экранами, а экраны, изготовленные в соответствии технологиями групп 2–5 – экранами проволочного типа [46, 47]. Для изготовления экранов щелевого типа используются листовые материалы на основе стали, меди, алюминия [42, 48]. Отверстия в этих материалах, формируются с использованием одного из нижеследующих способов [49, 50]:

- сверление с помощью ручных или полуавтоматических сверел (при условии, если отверстия должны быть расположены с неодинаковым шагом);
- пробивка с помощью автоматического станочного оборудования;
- штамповка-вырубка с помощью пресса высокого давления;
- лазерное выжигание с помощью станков с числовым программным управлением.

Частотно-селективные экраны щелевого типа используются для обеспечения защиты приборов электронной техники от электромагнитного излучения при условии, если область пространства, в которой расположены эти приборы, должна быть вентилируемой [26, 51].

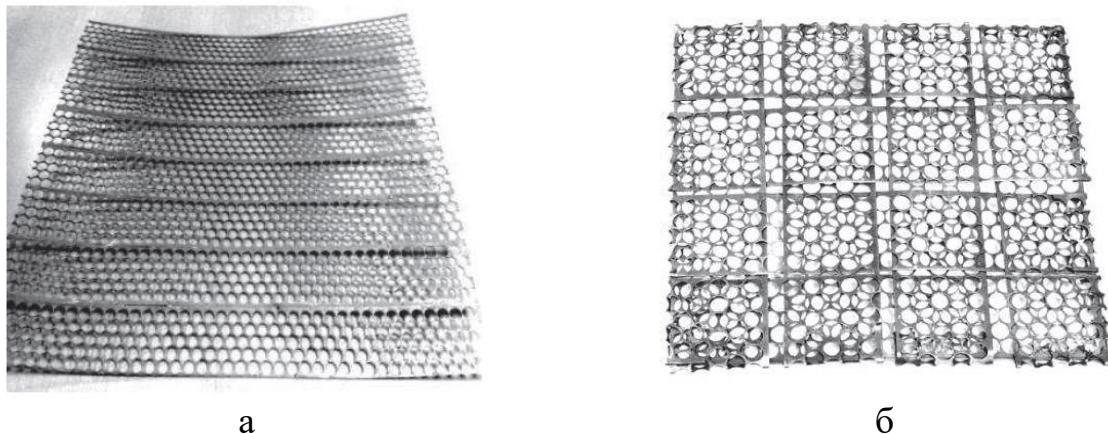
Основными недостатками частотно-селективных электромагнитных экранов щелевого типа являются следующие:

- высокая стоимость;
- низкая механическая прочность и низкая коррозионная стойкость, обусловленные малой толщиной рассматриваемых экранов (0,1–0,3 см);

– обеспечение резонансного поглощения энергии электромагнитного излучения в узкой полосе частот (такое явление обусловлено многократным переотражением излучения от внутренних поверхностей экрана, характеризуемым количественно с помощью коэффициента, рассчитываемого по формуле (1.3), а также рассеянием излучения на неоднородностях, размер которых сопоставим с длиной волны излучения [52]);

– необходимость решения задачи оптимизации в ходе проектирования рассматриваемых экранов, связанной с установлением размера отверстий, шага из размещения, а также максимально возможного их количества, при которых значение эффективности экранирования или коэффициента поглощения электромагнитного излучения, характерное для рассматриваемых экранов, является максимальным [53].

В целях снижения стоимости частотно-селективных электромагнитных экранов щелевого типа в работе [54] предложено для их изготовления использовать стальные перфорированные ленты, являющиеся отходами штамповки мелкоразмерных деталей. Технология изготовления таких экранов основана на сваривании или переплетении указанных лент. Внешний вид этих экранов представлен на рисунке 1.6 (размер представленных на рисунке экранов – $0,5 \times 0,5$ м).



а – экран, изготовленный путем сваривания стальных перфорированных лент; б – экран, изготовленный путем переплетения стальных перфорированных лент

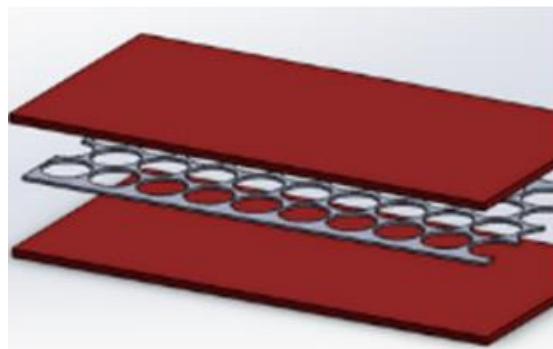
Рисунок 1.6 – Внешний вид частотно-селективных электромагнитных экранов щелевого типа, изготовленных в соответствии с технологией [54]

Для увеличения механической прочности и коррозионной стойкости электромагнитных экранов щелевого типа, в частности экранов на основе стальных перфорированных лент, являющихся отходами штамповки мелкоразмерных деталей, в работе [55] предложено закреплять такие ленты в полимерных матрицах путем реализации следующих действий:

– размещение стальной переформированной ленты или соединенных друг с другом стальных перфорированных лент между двумя полипропиленовыми листами, толщина которых превышает в 2,0 раза толщину этих лент (рисунок 1.7);

– выполнение горячего прессования полученной конструкции (рисунок 1.8).

В указанной работе отмечена перспективность применения усовершенствованных обозначенным образом электромагнитных экранов в строительстве.



1 – полипропиленовые листы; 2 – стальная перфорированная лента

Рисунок 1.7 – Схематическое изображение стальной перфорированной ленты, расположенной между полипропиленовыми листами



Рисунок 1.8 – Фотография фрагмента поверхности электромагнитного экрана, полученного в результате горячего прессования стальной перфорированной ленты и полипропиленовых листов

Технология, направленная на увеличение механической прочности и коррозионной стойкости электромагнитных экранов щелевого типа и аналогичная по своей сути технологии, представленной в работе [55], приведена в работе [56]. Авторами этой работы экспериментально доказано, что путем закрепления электромагнитных экранов щелевого типа, размер отверстий которых 0,25–1,5 мм, в полимерной матрице с использованием метода горячего прессования можно обеспечить, наряду с увеличением механической прочности и коррозионной стойкости этих экранов, еще и увеличение с 0,1 до 0,6 значения их коэффициента поглощения электромагнитного излучения. Внешний вид одного из рассматриваемых экранов представлен на рисунке 1.9.

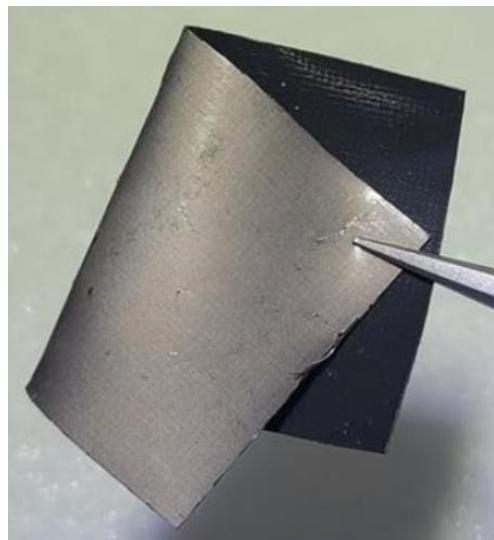


Рисунок 1.9 – Внешний вид электромагнитного экрана щелевого типа, закрепленного в полимерной матрице [56]

Как видно из рисунка 1.9, электромагнитные экраны, представленные в работе [56], в отличие от электромагнитных экранов, представленных в работе [55], являются более гибкими за счет того, что толщина слоя полимерной матрицы, в которой закреплены первые из указанных экранов, меньше толщины слоя полимерной матрицы, в которой закреплены вторые из указанных экранов. Однако следует заметить, что электромагнитные экраны щелевого типа, закрепленные в полимерных матрицах, непригодны для использования в целях обеспечения защиты приборов электронной техники от электромагнитного излучения при условии, если область пространства, в которой расположены эти приборы, должна быть вентилируемой, т. к. в таких экранах отсутствуют сквозные отверстия.

Технология, направленная на получение перфорированных электромагнитных экранов, характеризующихся по сравнению с аналогами повышенной механической прочностью и альтернативная представленным в работах [55, 56] технологиям, приведена в [57]. Она основана на выполнении 3D-печати с использованием электропроводящей термопластичной смолы. На рисунке 1.10 представлен внешний вид фрагмента перфорированного электромагнитного экрана, полученного в соответствии с технологией, приведенной в [57].



Рисунок 1.10 – Внешний вид фрагмента перфорированного электромагнитного экрана, полученного в соответствии с технологией, приведенной в [57]

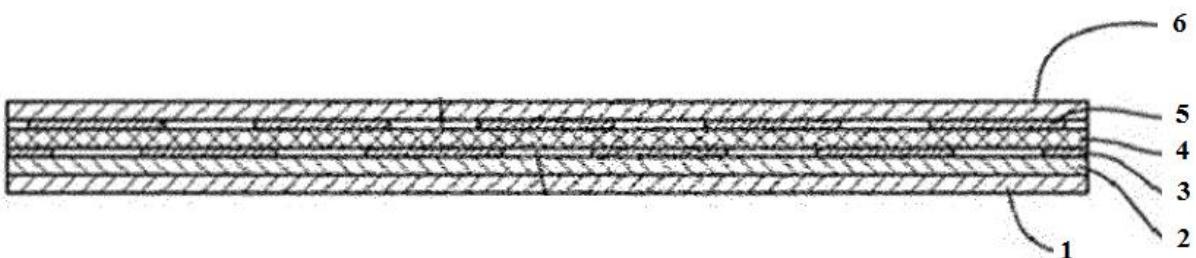
Для расширения резонансной полосы частот, а также для увеличения количества резонансных частот электромагнитных экранов щелевого в настоящее время используется подход, основанный на обеспечении многослойной структуры для таких экранов. В работе [58] представлены результаты проектирования, создания и исследования многослойных электромагнитных экранов щелевого типа. Исследование, результаты которого представлены в указанной работе, было направлено на установление зависимости эффективности экранирования многослойных электромагнитных экранов щелевого типа от:

- алгоритма оптимизации, использованного на этапе проектирования экранов (алгоритм оптимизации роя частиц, генетический алгоритм);
- материалов, на основе которых изготовлен каждый из слоев экранов (медь, сталь, олово, пермалloy).

Многослойные электромагнитные экраны щелевого типа, характеризующиеся высокой механической прочностью, представлены в работе [59]. Эти экраны включают в себя слой на основе характеризующегося диэлектрическими свойствами гелькоута, три слоя в виде характеризующегося диэлектрическими свойствами композиционного материала на основе армирующих волокон, закрепленных в термопрессованной смоле, два слоя в виде электромагнитных экранов щелевого типа. Последние из указанных слоев расположены таким образом, чтобы отверстия, входящие в структуру одного из них, были смещены относительно отверстий, входящих в структуру другого из них.

В отличие от представленных в работах [55, 56] технологий, направленных на получение перфорированных электромагнитных экранов, характеризующихся по сравнению с аналогами повышенной механической прочностью, в технологии, с использованием которой формируются электромагнитные экраны, представленные в работе [59], не предусмотрено выполнение термопрессования слоев, так как соединение последних обеспечивается за счет того, что гелькоут и смола характеризуются хорошими адгезионными свойствами.

Схематическое изображение электромагнитного экрана, представленного в работе [59], приведено на рисунке 1.10.



1 – слой гелькоута; 2, 4, 6 – композиционный материал на основе армирующих волокон, закрепленных в термопрессованной смоле;

3, 5 – электромагнитный экран щелевого типа

Рисунок 1.10 – Схематическое изображение многослойного электромагнитного экрана [59]

Как видно из рисунка 1.10, между слоями в виде электромагнитных экранов щелевого типа в многослойном электромагнитном экране, представленном в работе [59], расположен слой в виде характеризующегося диэлектрическими свойствами композиционного материала на основе армирующих волокон, закрепленных в термореактивной смоле. В работе [25] отмечено, что при использовании такого подхода при изготовлении многослойных электромагнитных экранов щелевого типа можно обеспечить более широкие резонансные полосы частот, характерные для таких экранов, по сравнению с полосами частот, характерными для экранов, слои которых плотно прилегают друг к другу. Однако в этой же работе отмечено, что значения коэффициентов отражения, передачи и поглощения электромагнитного излучения многослойных электромагнитных экранов щелевого типа, изготовленных с использованием рассматриваемого подхода, в большей степени зависят от угла падения на поверхность этих экранов излучения, чем аналогичные значения, характерные для многослойных электромагнитных экранов щелевого типа, слои которых плотно прилегают друг к другу. Указанный недостаток не характерен для электромагнитных экранов проволочного типа (т. е. экранов, изготовленных в соответствии с технологиями групп 2–5). Кроме того, обеспечение многослойной структуры для электромагнитных экранов проволочного типа не является единственным решением, с помощью которого можно расширить их резонансную полосу частот, а также увеличить характерное для них количество резонансных частот (чего нельзя констатировать в отношении электромагнитных экранов щелевого типа). Как следует из представленных в разделе 1.1 результатов анализа характеристик сред, для расширения резонансной полосы частот, а также для увеличения количества резонансных частот электромагнитных экранов проволочного типа можно включить в структуру таких экранов элементы, характеризующиеся различными формами и / или размерами. Обозначенные преимущественные особенности электромагнитных экранов проволочного типа обуславливают то, что эти экраны в настоящее время применяются чаще, чем электромагнитные экраны щелевого типа. Факт более частотного применения электромагнитных экранов проволочного типа по сравнению с электромагнитными экранами щелевого типа также подтверждается большим объемом опубликованных за последние пять лет научных работ, посвященных разработке технологий изготовления и исследованию свойств первых из указанных экранов, по сравнению с объемом опубликованных научных работ, объектом которых являются вторые из указанных экранов.

Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 2, представлены в работе [60]. Эти экраны представляют собой диэлектрические матрицы, в которых закреплены кольцевидные элементы толщиной $\sim 0,1$ см с внешним и внутренними диаметрами $\sim 0,8$ см и $\sim 0,4$ см соответственно, сформированные из материала, характеризующегося высоким значением удельной электропроводности. Эти кольца, по сути, являются аналогом замкнутых проводников. Автором указанной работы предложены два подхода к изготовлению таких экранов:

1) закреплять в диэлектрической матрице кольцевидные элементы, сформированные из материала, характеризующегося высоким значением удельной электропроводности, таким образом, чтобы они по завершении процесса закрепления располагались одно за другим вдоль условной оси OY и одно над другим вдоль условной оси OY (рисунок 1.11, а, б);

2) закреплять в диэлектрической матрице кольцевидные элементы, сформированные из материала, характеризующегося высоким значением удельной электропроводности, таким образом, чтобы они по завершении процесса закрепления образовывали так называемую объемную матричную структуру, в состав которой входят четыре слоя на основе указанных элементов, каждый из которых образован в соответствии с первым из подходов (рисунок 1.11, в).

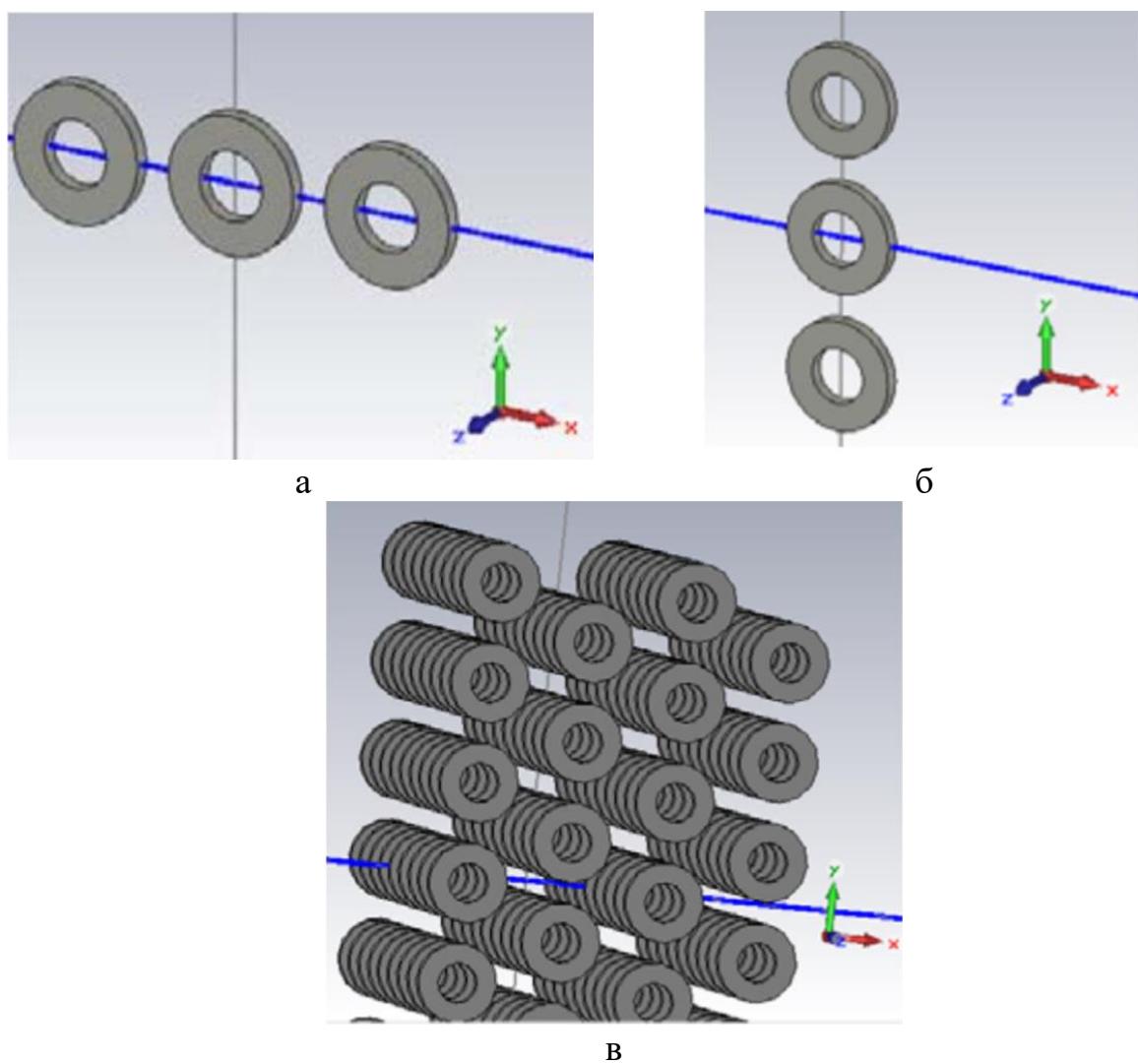


Рисунок 1.11 – Схемы расположения в диэлектрической матрице колец, сформированных из материала, характеризующегося высоким значением удельной электропроводности, при использовании первого (а, б) и второго (в) подходов [60] к изготовлению электромагнитных экранов на их основе

Автором работы [60] доказано, что электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с представленными в этой работе подходами,

являются либо широкополосными с шириной рабочей полосы частот $\sim 700,0$ МГц, либо широкодиапазонными с рабочим диапазоном частот $6,0\text{--}20,0$ ГГц (в зависимости от подхода, использованного при изготовлении таких экранов).

Еще один подход к изготовлению в соответствии с технологиями группы 2 широкодиапазонных электромагнитных экранов на основе кольцевидных элементов, а также сами такие экраны представлены в работе [61]. Эти экраны характеризуются структурой Яуманна и изготавливаются путем закрепления в диэлектрической матрице листа на основе графена и дальнейшего включения в структуру поверхностей полученного в результате этого материала массивов в виде совокупности кольцевых элементов, сформированных из материала, характеризующегося высоким значением удельной электропроводности (рисунок 1.12).

Требуемые значения ширины резонансной полосы и резонансной частоты рассматриваемых электромагнитных экранов обеспечиваются путем выбора определенной толщины диэлектрической матрицы и определенного размера кольцевых элементов, которые подлежат включению в ее структуру. Основное преимущество таких экранов в отличие от большинства экранов, изготовленных в соответствии с технологиями группы 2, состоит в том, что значения ширины резонансной полосы и резонансной частоты практически не зависят от угла падения этого излучения.

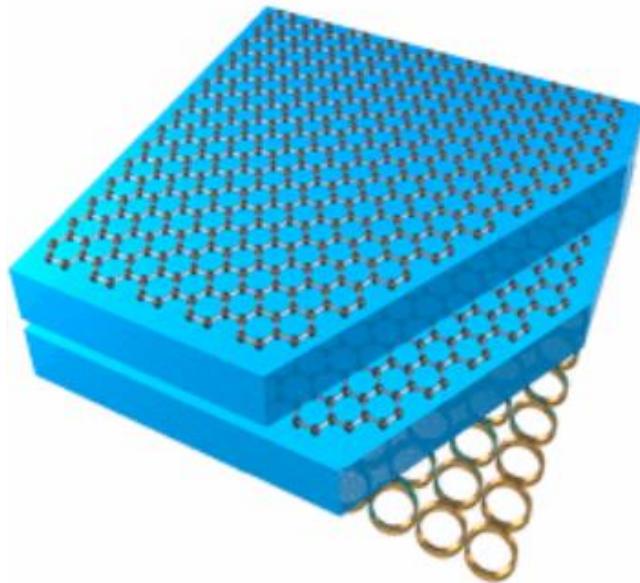


Рисунок 1.12 – Внешний вид электромагнитного экрана [61]

Представленная в работе [62] технология изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, которая также может быть отнесена к технологиям рассматриваемой группы, состоит в формировании в объеме силиконовой матрицы одинаковых элементов с использованием находящегося в жидкой фазе сплава галий – индий (рисунок 1.13). Формирование элементов в соответствии с этой технологией выполняется с учетом следующих условий:

- 1) форма элементов должна быть квадратной;
- 2) ширина каждого из элементов должна быть эквивалентна половине длине волны на резонансной частоте изготавливаемого электромагнитного экрана;
- 3) элементы должны размещаться с одинаковым шагом в объеме силиконовой матрицы.

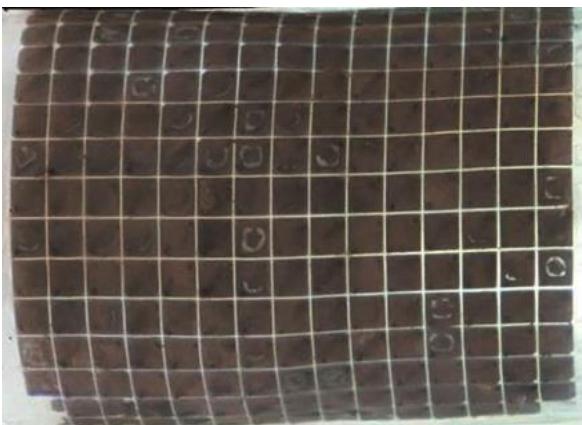


Рисунок 1.13 – Внешний вид сверху электромагнитного экрана [62]

Другие электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 2, представлены в работах [63, 64]

Основной недостаток технологий группы 2 по сравнению с технологиями группы 3 состоит в более высоких временных затратах, необходимых для их реализации. Это обусловлено тем, что в рамках технологий группы 2 по сравнению с технологиями группы 3 есть дополнительный этап, связанный с нанесением поверх плоских или объемных элементов слоя на основе диэлектрического материала и созданием условий, при которых обеспечивается затвердевание этого материала.

Технологии группы 3 состоят в закреплении или нанесении на поверхностях диэлектрических подложек плоских или объемных элементов, изготовленных из электропроводящих материалов. Значения ширины резонансной полосы и резонансной частоты экранов, изготовленных в соответствии с этими технологиями, зависят от формы и размеров элементов, закрепленных или нанесенных на поверхностях подложек этих экранов. Как было отмечено в разделе 1.1, плоские элементы, используемые для изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов, могут быть пластинчатыми или петлевидными, характеризоваться правильной или неправильной геометрической формой (рисунок 1.2).

Технологии группы 3, в рамках которых используются пластинчатые элементы, характеризующиеся правильной геометрической формой, как правило, основаны на раскрашивании металлических листов или фольгированных (металлизированных) пленочных материалов на фрагменты одинаковых размеров. Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с такими технологиями представлены, например, в работах [65, 66, 67]. Известен

также вариант технологии группы 3, состоящий в нанесении на одну из поверхностей текстильного полотна серебросодержащих пластинчатых элементов, характеризующихся квадратной формой, с использованием метода струйной печати. Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с такой технологией, представлены в работе [68] (рисунок 1.14).

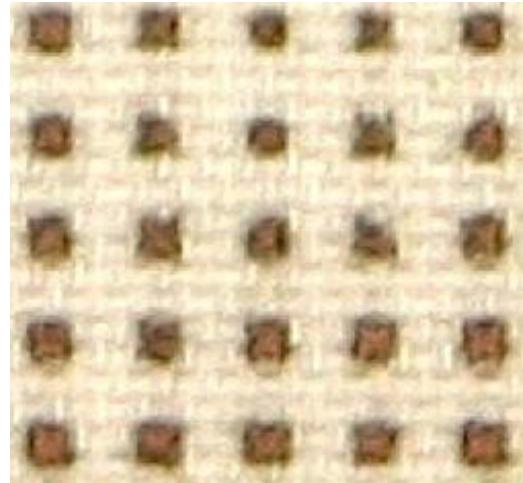
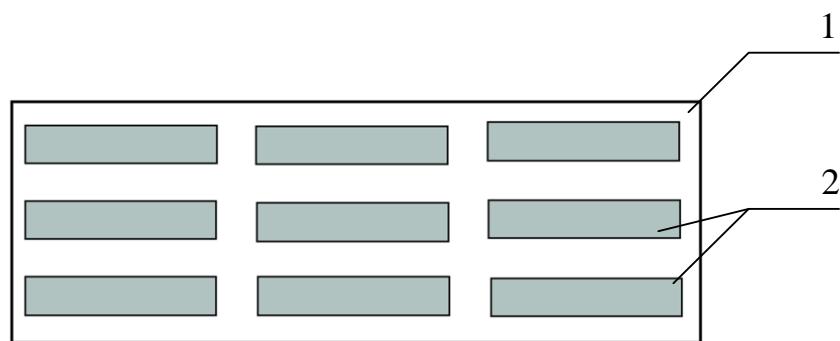


Рисунок 1.14 – Фотография фрагмента поверхности электромагнитных экранов [68]

В настоящее время известны варианты технологии группы 3, в рамках которых используются пластинчатые элементы и в соответствии с которыми могут изготавливаться частотно-селективные электромагнитные экраны, резонансная полоса которых лежит не в гигагерцовом диапазоне, как у экранов, представленных в работах [65–68], а в терагерцовом диапазоне. Эти технологии состоят в закреплении на одной из поверхностей диэлектрической подложки пластинчатых элементов в виде квадратов или прямоугольников, сформированных из графеновых полотен. Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с этими технологиями, приведены, например, в работах [69, 70] (рисунок 1.15).



1 – диэлектрическая подложка; 2 – пластинчатые элементы, сформированные из графеновых полос

Рисунок 1.15 – Схематическое изображение фрагмента поверхности электромагнитных экранов [69, 70]

Известны также электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 3 с использованием пластиначатых фрактальных элементов, т. е., по сути, элементов, характеризующихся неправильной геометрической формой. Технологии изготовления таких экранов, как правило, заключаются в нанесении на поверхности подложек указанных элементов с использованием метода трафаретной или струйной печати [71, 72, 73] (рисунок 1.16), хотя встречаются технологии изготовления таких экранов, состоящие в формировании пластиначатых фрактальных элементов из углеродных волокнистых материалов и дальнейшем нанесении на поверхности подложек этих элементов [74].

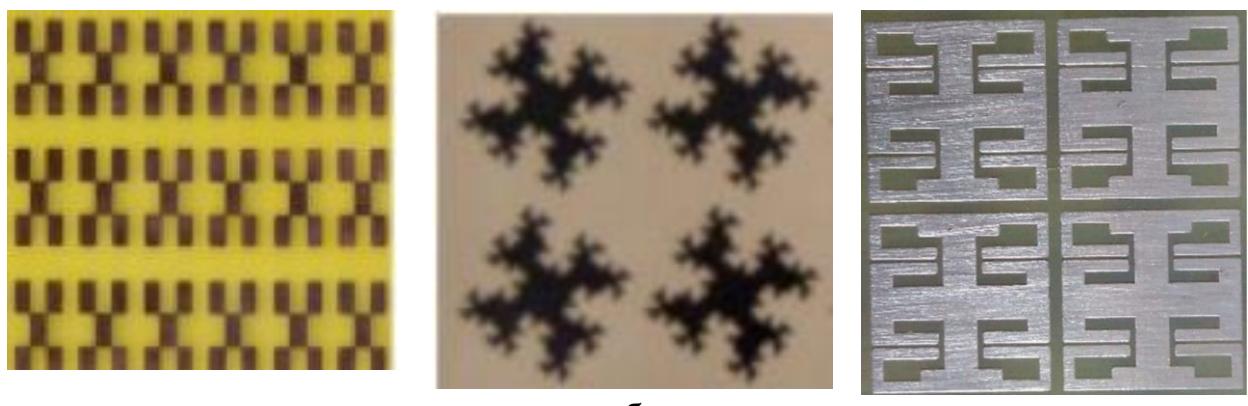


Рисунок 1.16 – Фотографии фрагментов поверхностей электромагнитных экранов, представленных в работах [71] (а), [72] (б), [73] (в)

Известны также электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологией группы 3 с использованием отличающихся формой разнотипных пластиначатых фрактальных элементов (см. например, работу [75] (рисунок 1.17)).

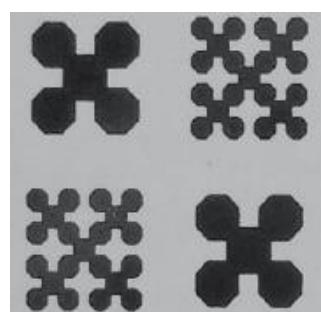


Рисунок 1.17 – Фотография фрагмента поверхности электромагнитных экранов [75]

Технологии группы 3, в рамках которых используются петлевидные элементы, как правило, основаны на выполнении следующих действий:

- 1) нарезание проволоки или тонких полос из электропроводящих материалов, в результате чего формируются составляющие для указанных элементов;
- 2) закреплении сформированных составляющих на диэлектрических подложках.

Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями групп 3, в рамках которых используются петлевидные элементы, характеризующиеся правильной геометрической формой, представлены, например, в работах [76, 77, 78] (рисунок 1.18).

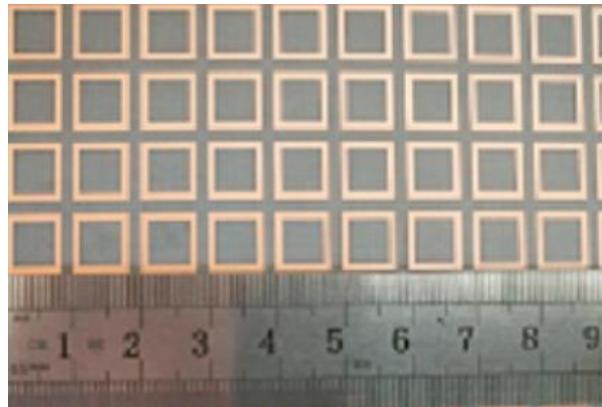


Рисунок 1.18 – Внешний вид фрагмента поверхности электромагнитных экранов [77]

Также известны вариации технологии группы 3, которые состоят в нанесении петлевидных серебросодержащих элементов, характеризующихся правильной геометрической формой, на поверхность подложек (текстильных материалов [79] (рисунок 1.19), металлизированной полиэтилентерефталатной пленки [80] (рисунок 1.20)) с помощью метода струйной печати.

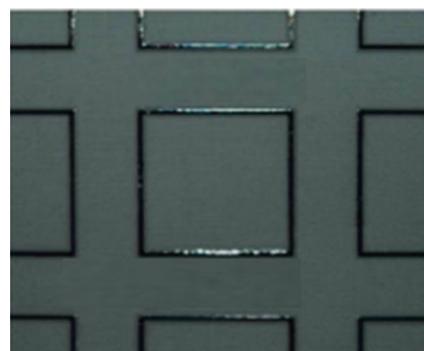


Рисунок 1.19 – Внешний вид фрагмента поверхности электромагнитных экранов [79]

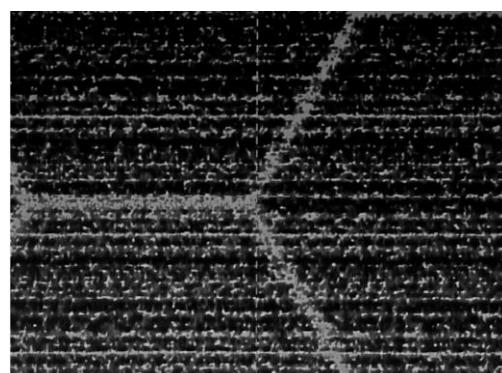


Рисунок 1.20 – Внешний вид фрагмента поверхности электромагнитных экранов [80]

Регулирование значений резонансной частоты электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями группы 3, в рамках которых используются петлевидные элементы, как правило, обеспечивается путем модификации формы этих элементов, в результате чего она становится неправильной, либо путем комбинирования этих элементов с пластинчатыми элементами. Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 3, в рамках которых используются петлевидные элементы, характеризующиеся неправильной геометрической формой, представлены, например, в работах [81, 82, 83] (рисунок 1.21). Следует отметить, что особенностью технологии изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [82], является то, что в рамках нее нанесение на подложки элементов (см. рисунок 1.21, б) реализуется с использованием метода трафаретной печати, а также то, что подложками являются листы бумаги. Особенностью технологии изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [83], является то, что используемые в рамках нее элементы (см. рисунок 1.21, в) характеризуются малыми размерами ($\sim 0,7$ см), а используемые в рамках нее подложки представляют собой политетрафторэтиленовые листы, армированные стекловолокнами, что в совокупности обуславливает свойство конформности указанных экранов.

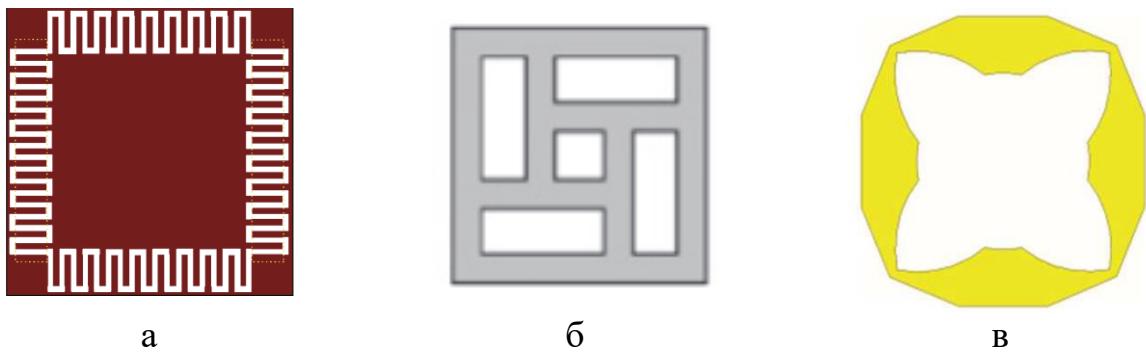


Рисунок 1.21 – Схематические изображения элементов, использованных в рамках технологии изготовления электромагнитных экранов, представленных в работах [81] (а), [82] (б), [83] (в)

Также следует отметить, что в настоящее время при изготовлении электромагнитных экранов в соответствии с технологиями группы 3 используются петлевидные фрактальные элементы. Эти элементы формируются либо путем закрепления соответствующим образом на поверхностях подложек фрагментов проволоки или полос из электропроводящих материалов с использованием клеевых составов, либо путем нанесения соответствующим образом на поверхности подложек чернил из электропроводящих материалов с использованием метода струйной или трафаретной печати. Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 3 с использованием петлевидных фрактальных элементов представлены, например, в работах [84, 85, 86] (рисунок 1.22).

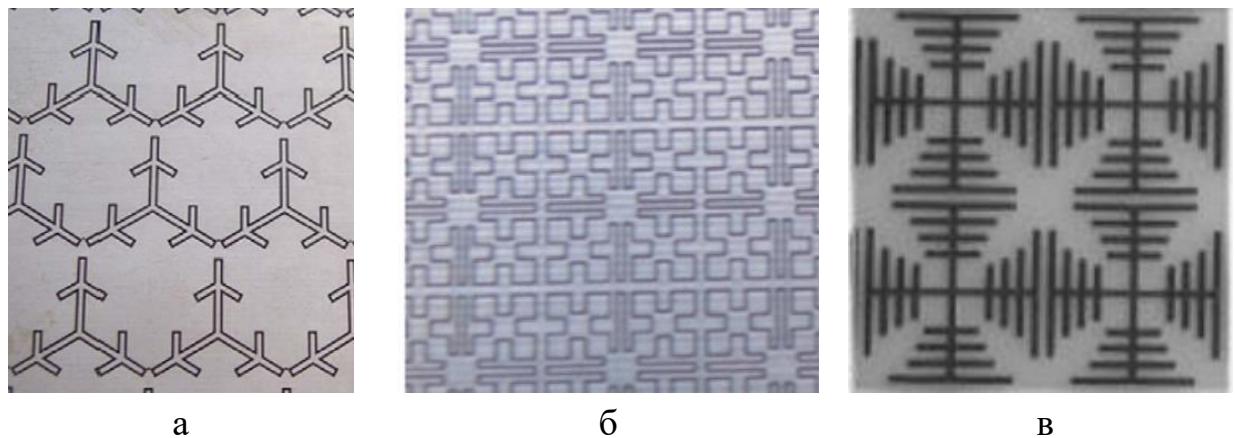


Рисунок 1.22 – Фотографии фрагментов поверхностей электромагнитных экранов, представленных в работах [84] (а), [85] (б), [86] (в)

Еще одна разновидность электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, изготовленных в соответствии с технологиями группы 3 с использованием петлевидных элементов, характеризующихся неправильной геометрической формой, предложена учеными учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины». Эти экраны представляют собой диэлектрические подложки, на поверхностях которых с использованием метода трафаретной печати нанесены планарные одновитковые спирали (рисунок 1.23) [87] или закреплены сформированные из электропроводящего материала петлевидные элементы в виде греческой буквы «омега» [88].

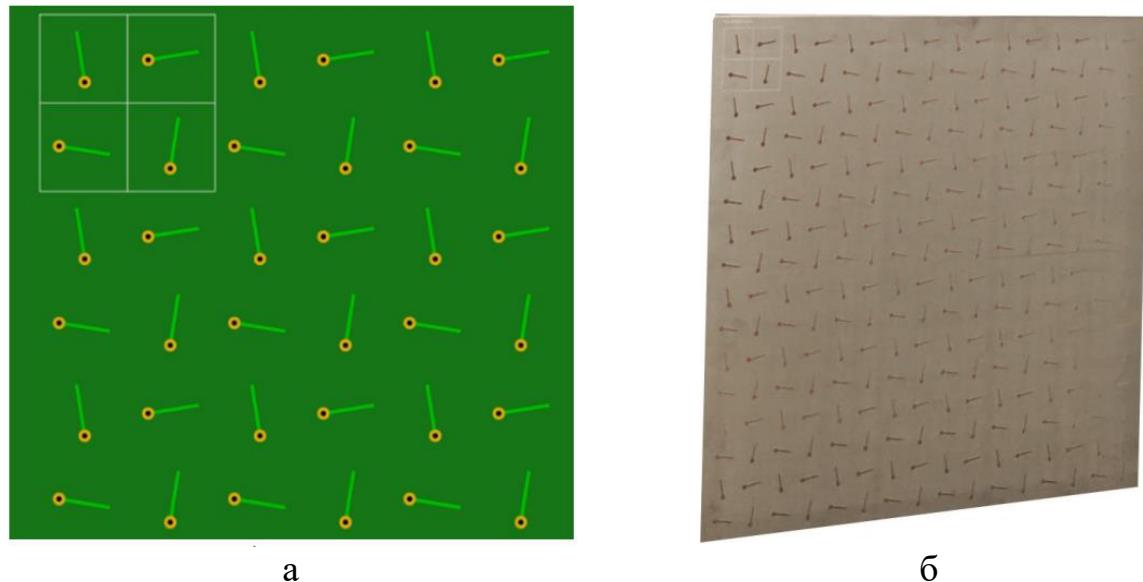


Рисунок 1.23 – Схематическое изображение (а) и внешний вид (б) электромагнитных экранов [87]

Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 3, в рамках которых используются комбинированные элементы, представлены, например, в работах [89, 90] (рисунок 1.24).

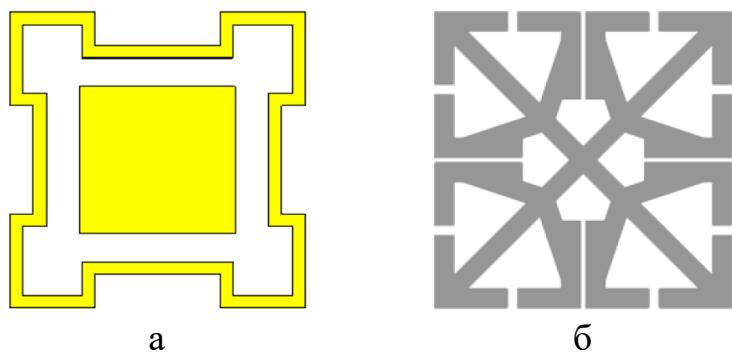


Рисунок 1.24 – Схематические изображения элементов, использованных в рамках технологии изготовления электромагнитных экранов, представленных в работах [89] (а), [90] (б)

Таким образом, основные преимущества частотно-селективных электромагнитных экранов в виде подложек, на поверхностях которых нанесены или закреплены плоские элементы, состоят в:

1) низкой степени зависимости значений ширины резонансной полосы и резонансной частоты этих экранов от угла падения на их поверхность излучения, что обеспечивается за счет соблюдения условия (1.11) при выборе шага нанесения указанных элементов;

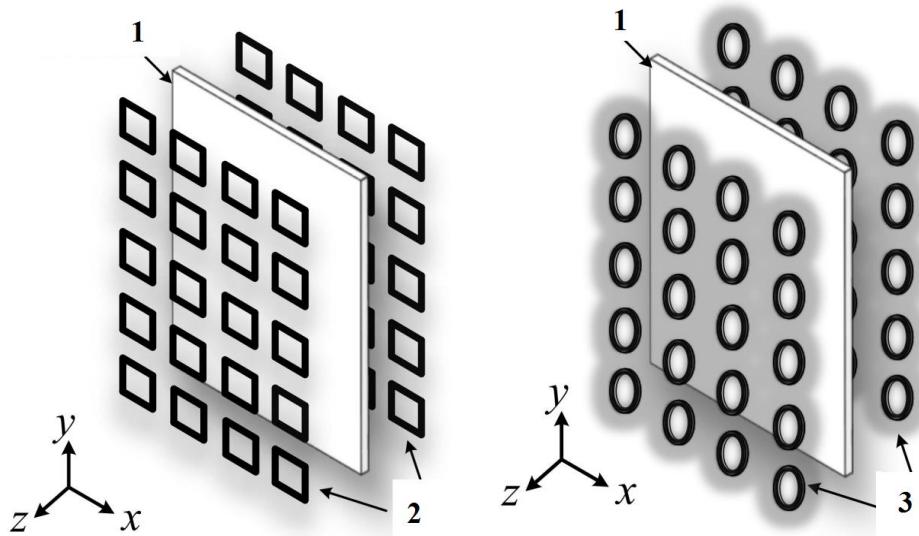
2) их гибкости и/или малой толщине, что обеспечивается за счет использования характеризующихся соответствующим свойством подложек.

Основной недостаток рассматриваемых экранов состоит в том, что они характеризуются узкой резонансной полосой. Существует два способа устранения этого недостатка [91]:

1) обеспечение многослойной структуры для рассматриваемых электромагнитных экранов, что достигается путем нанесения или закрепления на обеих поверхностях их подложек плоских элементов;

2) использование при изготовлении рассматриваемых экранов объемных элементов, вместо плоских.

В работе [92] представлены электромагнитные экраны, изготовленные с учетом первого из вышеуказанных способов. Эти экраны представляют собой диэлектрические подложки, на обеих поверхностях которых закреплены петлевидные элементы, характеризующиеся правильной геометрической формой (как правило, формой круга или квадрата) (рисунок 1.25).



1 – диэлектрическая подложка; 2 – петлевидные элементы, характеризующиеся формой квадрата; 3 – петлевидные элементы, характеризующиеся формой круга

Рисунок 1.25 – Схематическое изображение электромагнитных экранов [92]

При изготовлении электромагнитных экранов в соответствии с технологиями группы 3 с учетом рассматриваемого способа чаще всего в настоящее время используются либо петлевидные элементы, характеризующиеся неправильной геометрической формой, либо комбинированные элементы.

Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологией группы 3 с учетом рассматриваемого способа с использованием петлевидных элементов, характеризующихся неправильной геометрической формой, представлены, например, в работе [93]. Суть этой технологии состоит в нанесении с использованием метода печати на обеих поверхностях подложки в виде твердотельного полимерного листа изготовленных из меди элементов, ширина составляющих которых эквивалента произведению 0,308 и значения длины волны на резонансной частоте указанных экранов (рисунки 1.26, 1.27).

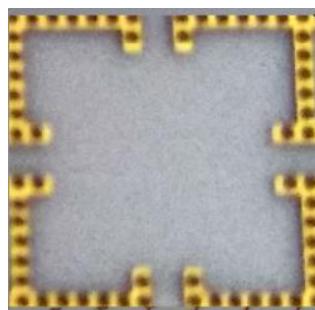


Рисунок 1.26 – Фотография одного из элементов, предназначенных для нанесения на обеих поверхностях подложек электромагнитных экранов [93]

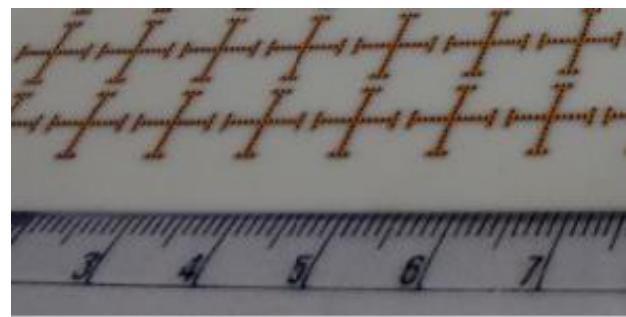


Рисунок 1.27 – Фотография фрагмента одной из поверхностей электромагнитных экранов [93]

Электромагнитные экраны, изготовленные также, как и электромагнитные экраны, представленные в работе [93], в соответствии с технологией группы 3 с использованием метода печати, приведены в работе [94]. Особенность этих электромагнитных экранов заключается в том, что форма элементов, нанесенных на лицевые поверхности их подложек, отличается от формы элементов, нанесенных на обратные поверхности их подложек, что видно из рисунка 1.28. Элементы, нанесенные на лицевые поверхности подложек электромагнитных экранов, представленных в работе [94], являются петлевидными элементами с модифицированной формой, а элементы, нанесенные на обратные поверхности подложек таких экранов, – пластинчатыми элементами с модифицированной формой.

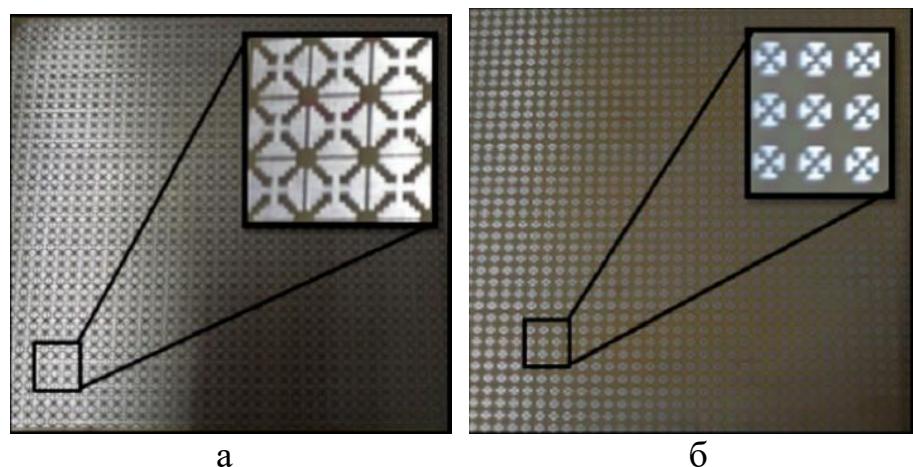


Рисунок 1.28 – Внешний вид лицевой (а) и обратной (б) поверхностей электромагнитных экранов [94]

Электромагнитные экраны, аналогичные электромагнитным экранам, представленным в работе [94], рассмотрены в работе [95]. Элементы, нанесенные на лицевые и обратные поверхности подложек этих экранов, также, как и элементы электромагнитных экранов, представленных в работе [94], являются соответственно петлевидными и пластинчатыми элементами с модифицированной формой (рисунок 1.29). Эти элементы нанесены на поверхности подложек с применением того же метода, что и элементы, с использованием которых изготовлены электромагнитные экраны, представленные в работах [93, 94].

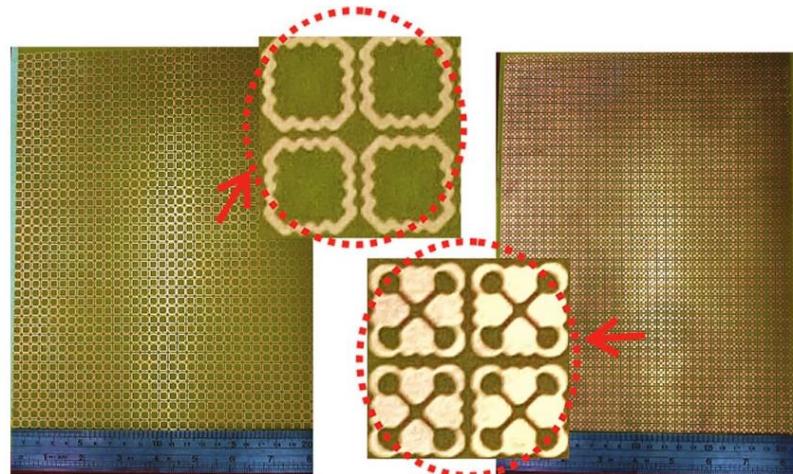


Рисунок 1.29 – Внешний вид лицевой (а) и оборотной (б) поверхностей электромагнитных экранов [95]

В работах [96, 97, 98] рассмотрены другие электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 3 и представляющие собой подложки, на обеих поверхностях которых нанесены характеризующиеся неправильной геометрической формой элементы при условии, что форма элементов, нанесенных на лицевые поверхности подложек, отличается от формы элементов, нанесенных на обратные стороны подложек (рисунки 1.30–1.32).

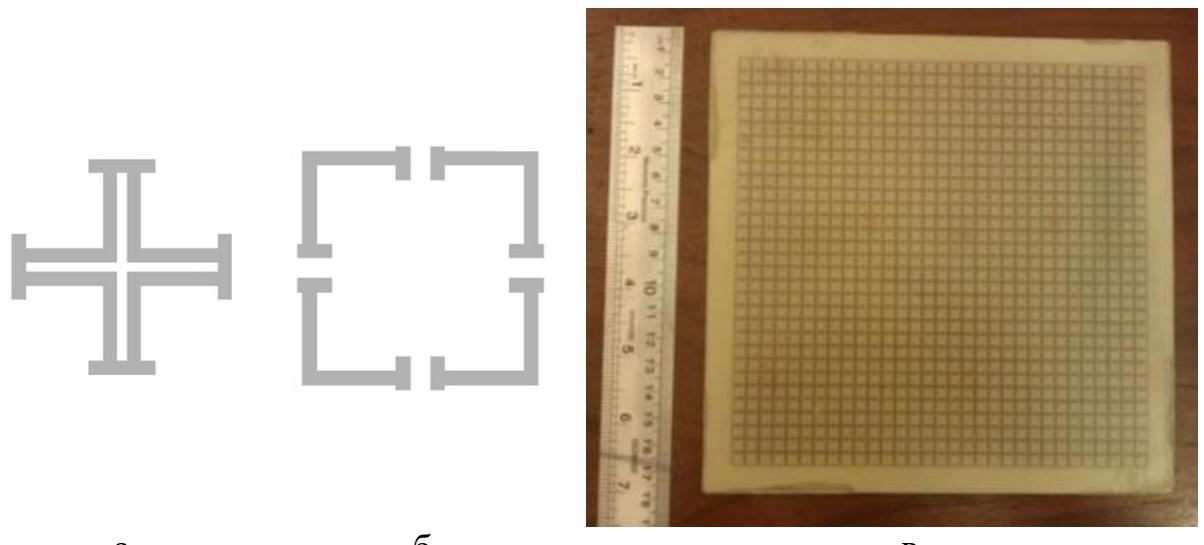
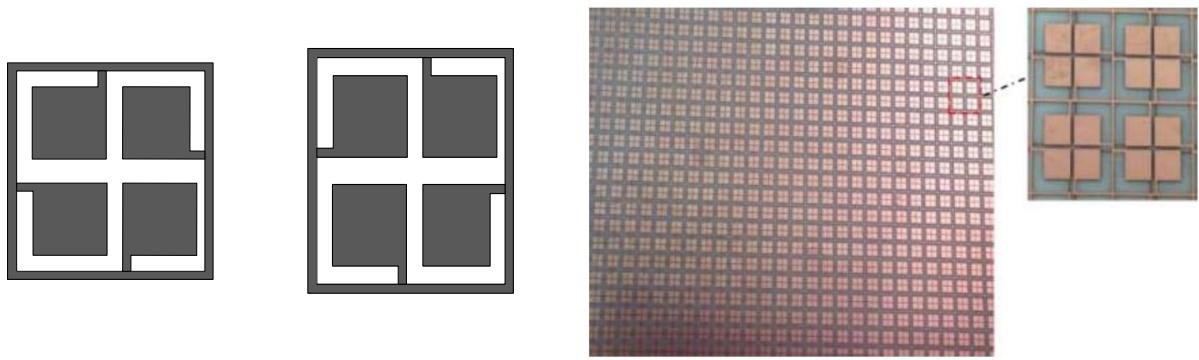


Рисунок 1.30 – Схематические изображения фрагментов, нанесенных на лицевую (а) и оборотную (б) поверхности подложек электромагнитных экранов [96] и внешний вид лицевой поверхности этих экранов (в)

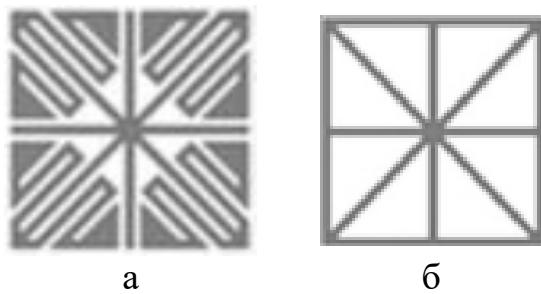


а

б

в

Рисунок 1.31 – Схематические изображения фрагментов, нанесенных на лицевую (а) и оборотную (б) поверхности подложек электромагнитных экранов [97]
и внешний вид лицевой поверхности этих экранов (в)

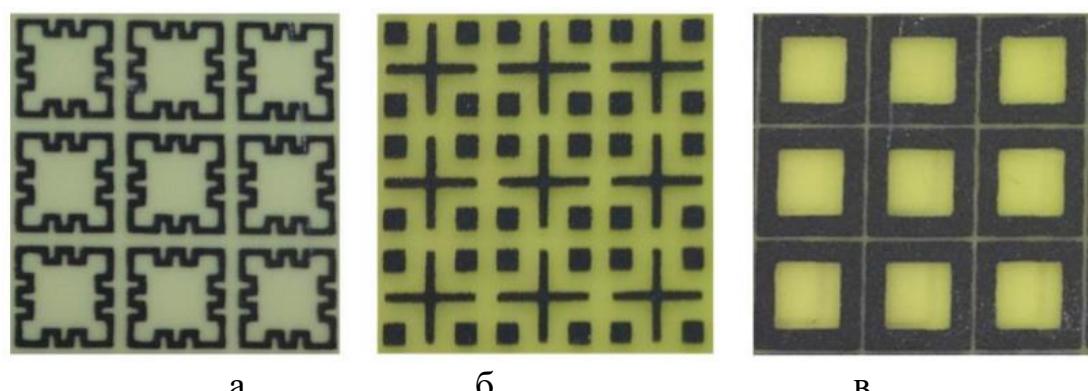


а

б

Рисунок 1.32 – Схематические изображения фрагментов, нанесенных на лицевую (а) и оборотную (б) поверхности подложек электромагнитных экранов [98]

Известны также многослойные электромагнитные экраны, каждый слой из которых представляет собой электромагнитный экран, изготовленный в соответствии с технологией группы 3. Такие экраны представлены, например, в работе [99] (рисунок 1.33). На поверхность подложек каждого из слоев указанных экранов элементы нанесены с использованием метода струйной печати с применением электропроводящих чернил.



а

б

в

Рисунок 1.33 – Внешний вид фрагментов первого (наружного) (а), второго (б) и третьего (в) слоев электромагнитных экранов [99]

Электромагнитные экраны в виде подложки, на поверхности которой закреплены объемные элементы, обеспечивают наряду с поглощением или отражением ЭМИ еще и его рассеяние. Такие экраны принято называть 3D-экранами (в свою очередь, электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 3 на основе плоских элементов, принято называть 2D-экранами). Такие экраны представлены в работах [100, 101, 102].

Электромагнитные экраны, представленные в работе [100], изготовлены путем фиксирования пружинообразных элементов на поверхности пенополистироловой пластины (рисунок 1.34).



Рисунок 1.34 – Внешний вид сбоку электромагнитных экранов [100]

Электромагнитные экраны, представленные в работе [101], изготовлены путем фиксирования гибких лент из фольгированного материала на поверхностях гибких подложек и дальнейшего механического растяжения по ширине полученных при этом конструкций таким образом, чтобы из указанных зафиксированных лент сформировались аркообразные элементы (рисунок 1.35).

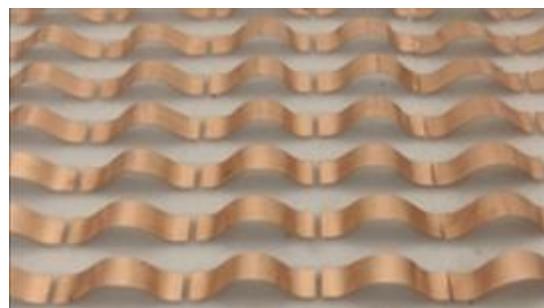


Рисунок 1.35 – Внешний вид фрагмента поверхности электромагнитных экранов [101]

Электромагнитные экраны, представленные в работе [102], изготовлены тем же путем, что электромагнитные экраны, представленные в работе [101]. Однако в рамках процесса изготовления первых из указанных экранов в отличие от процесса изготовления вторых из них механическое растяжение конструкций в виде гибких лент из фольгированного материала, зафиксированных на поверхностях гибких подложек, выполняется как по ширине, так и по длине (рисунок 1.36).

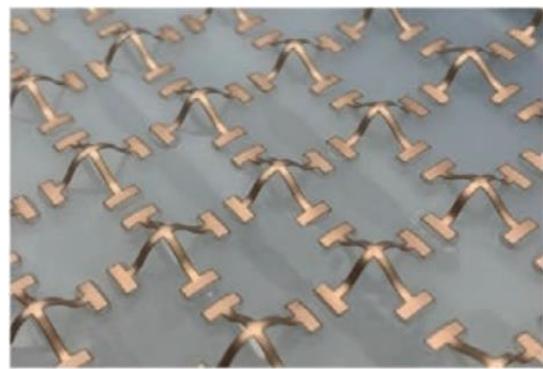


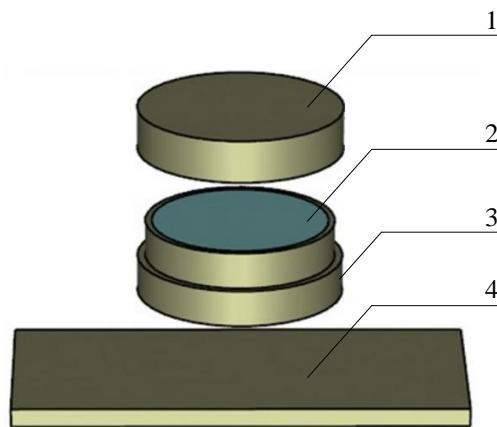
Рисунок 1.36 – Внешний вид фрагмента поверхности электромагнитных экранов [102]

Известна также технология изготовления 3D-экранов, в соответствии с которой сначала формируется из гибкого полимерного материала подложка, по поверхности которой распределены с одинаковым шагом полые объемные элементы, после чего реализуется заполнение этих элементов водой (рисунок 1.37) [103].



Рисунок 1.37 – Схематическое изображение модели электромагнитного экрана [103]

Вариацией технологии изготовления 3D-экранов, представленных в работе [103], является технология, в соответствии с которой одинаковые цилиндрические емкости с крышками заполняются водным раствором после чего закрепляются с одинаковым шагом на подложке. Экраны, изготовленные в соответствии с этой технологией, представлены в работе [104] (рисунок 1.38).



1 – крышка цилиндрической емкости; 2 – водный раствор;
3 – емкость; 4 – подложка

Рисунок 1.38 – Схематическое изображение модели декомпозированного фрагмента электромагнитного экрана [104]

В настоящее время также известны технологии изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов в виде подложек, характеризующихся геометрически неоднородной (по сути, объемной) поверхностью, на которой закреплены плоские элементы. Эти технологии являются альтернативой технологиям, представленным в работах [100–104]. За счет неоднородной поверхности подложек указанных экранов их, так же, как и экраны, на поверхности которых закреплены объемные элементы, называют 3D-экранами.

Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с одной из таких технологий, представлены в работе [105]. Подложки таких экранов характеризуются формой, подобной форме лотков для яиц. На поверхность каждой из наружных стенок этих подложек нанесены элементы крестообразной формы (рисунок 1.39).

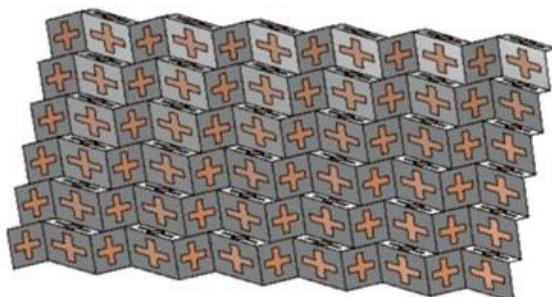


Рисунок 1.39 – Схематическое изображение частотно-селективного электромагнитного экрана [105]

Авторами работы [105] отмечено, что представленные в ней частотно-селективные электромагнитные экраны являются широкополосными, как и электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями, аналогичными технологиям, представленным в работах [100–104].

В работе [106] представлены электромагнитные экраны, технология изготовления которых состоит в закреплении на геометрических неоднородностях поверхности подложки из диэлектрического материала элементов с использованием метода водопереносной печати (рисунок 1.40).

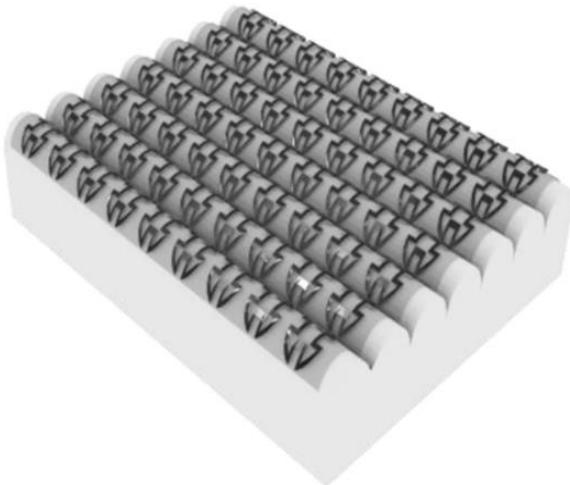


Рисунок 1.40 – Внешний вид одного из электромагнитных экранов [106]

К настоящему времени разработаны также технологии изготовления 3D частотно-селективных электромагнитных экранов, в рамках которых используются методы 3D-печати (технологии группы 4) и машинной вязки или вышивки (технологии группы 5).

Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 4, представлены, например, в работах [107–110].

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [107], состоит в выполнении 3D-печати объемных дипольных (рисунок 1.41, а) или петлевидных (рисунок 1.41, б) элементов с использованием смеси гипсового вяжущего и винилового полимера, металлизации поверхностей этих элементов (рисунок 1.42) и последующем закреплении последних на подложках (рисунок 1.43).

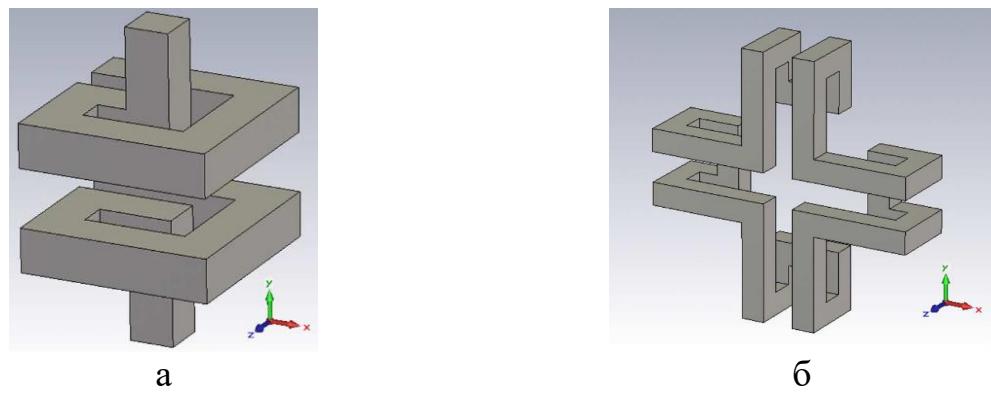


Рисунок 1.41 – Схематическое изображение объемных дипольного (а) и петлевидного (б) элементов для электромагнитных экранов [107]



Рисунок 1.42 – Внешний вид поперечного среза части объемного элемента для электромагнитных экранов [107]

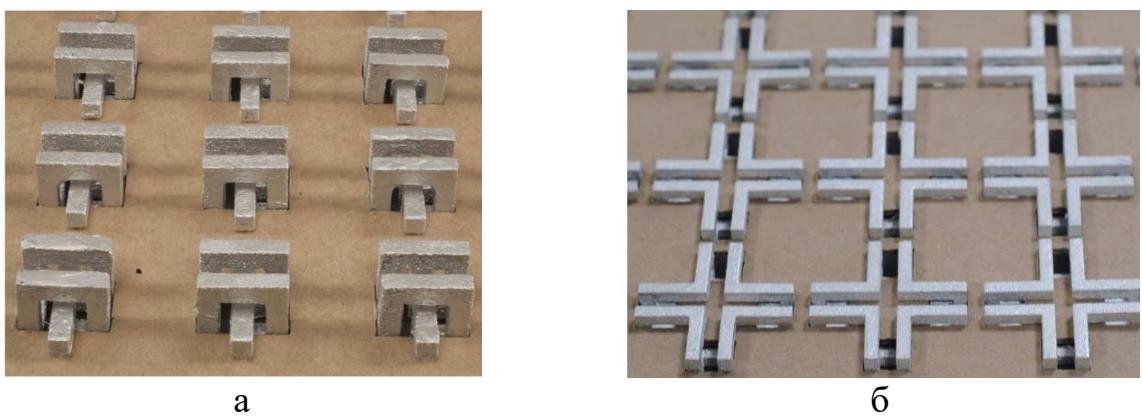


Рисунок 1.43 – Внешний вид фрагментов электромагнитных экранов на основе объемных дипольных (а) и петлевидных (б) элементов [107]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [108], состоит в выполнении 3D-печати полимерной формы с объемными углублениями (рисунок 1.44) и дальнейшем заполнении этой формы смесью воска и волокон карбонизированного хлопка (рисунок 1.45).

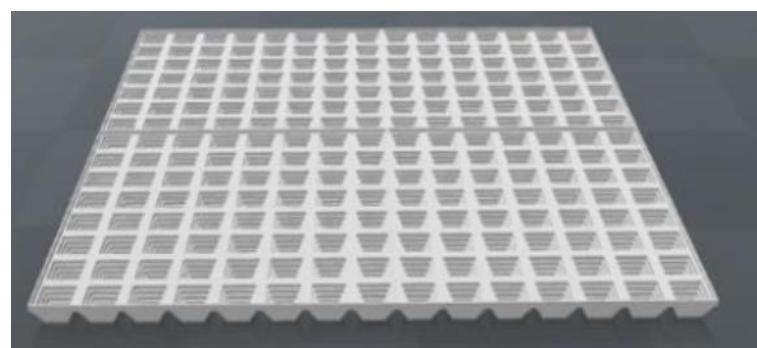


Рисунок 1.44 – Схематическое изображение одной из полимерных форм для электромагнитных экранов [108]

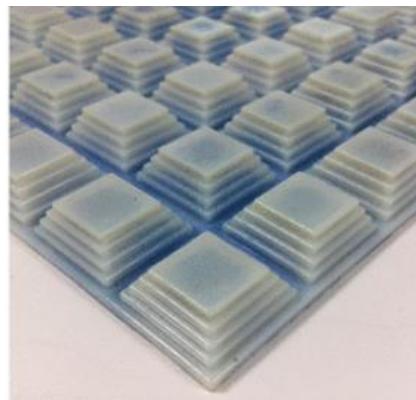


Рисунок 1.45 – Внешний вид фрагмента поверхности образца электромагнитных экранов [108]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [109], состоит в выполнении 3D-печати с селективным лазерным спеканием их фрагментов с использованием смеси углеродных волокон, полиамида и карбонильного железа и дальнейшем соединении этих фрагментов (рисунок 1.46).



Рисунок 1.46 – Внешний вид сбоку образца одного из фрагментов электромагнитных экранов [109]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [110], также, как и технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [109], состоит в выполнении 3D-печати с той лишь разницей, что в рамках этого процесса используется технический углерод (рисунок 1.47).

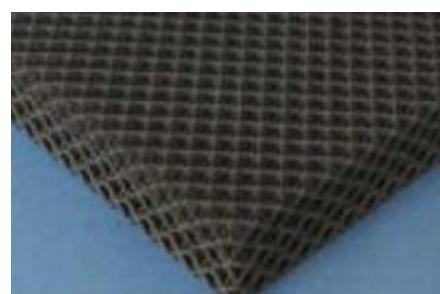


Рисунок 1.47 – Внешний вид фрагмента образца электромагнитных экранов [110]

В настоящее время также известны случаи использования технологии группы 4 для получения гибридных частотно-селективных электромагнитных экранов, в структуру которых входят и сквозные отверстия, и объемные элементы, за счет чего такие экраны представляют собой совокупность ячеек. По сути, такие экраны являются экранами и щелевого, и проволочного типов одновременно. Такие экраны представлены, например, в работах [111–113].

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [111], состоит в выполнении 3D-печати их подложек (рисунок 1.48) с использованием полимолочной кислоты и дальнейшем закреплении на наружных и внутренних стенках ячеек этих подложек пластинчатых элементов, изготовленных из металлизированной пленки.



Рисунок 1.48 – Внешний вид образца одного из фрагментов подложек электромагнитных экранов [111]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [112] (рисунок 1.49), состоит в выполнении 3D-печати их фрагментов с использованием композиционной смеси, в которой связующим веществом является полимолочная кислота, а наполнителем – углеродные нанотрубки, и дальнейшем соединении этих фрагментов.

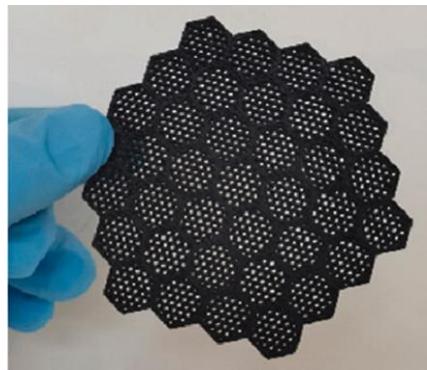


Рисунок 1.49 – Внешний вид образца одного из фрагментов электромагнитных экранов [112]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [113], состоит в выполнении 3D-печати совокупности объемных

элементов (рисунок 1.50) с использованием фотополимерных материалов и дальнейшей металлизации поверхностей этих элементов с использованием гальванического метода (рисунок 1.51).

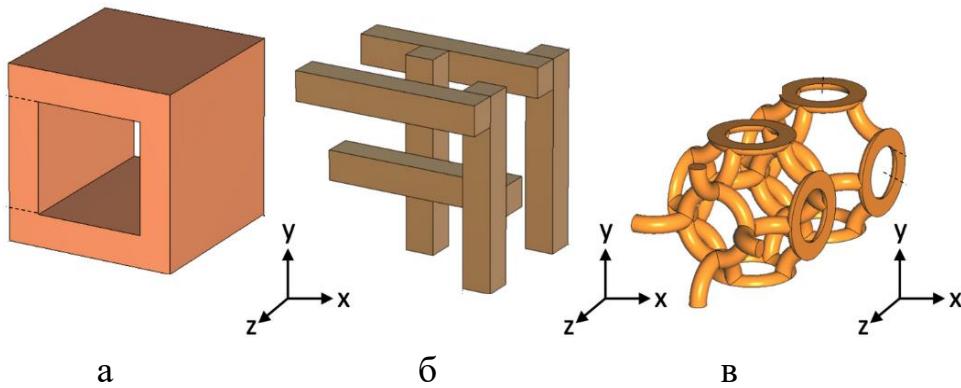


Рисунок 1.50 – Схематическое изображение объемных элементов для изготовления электромагнитных экранов [113]

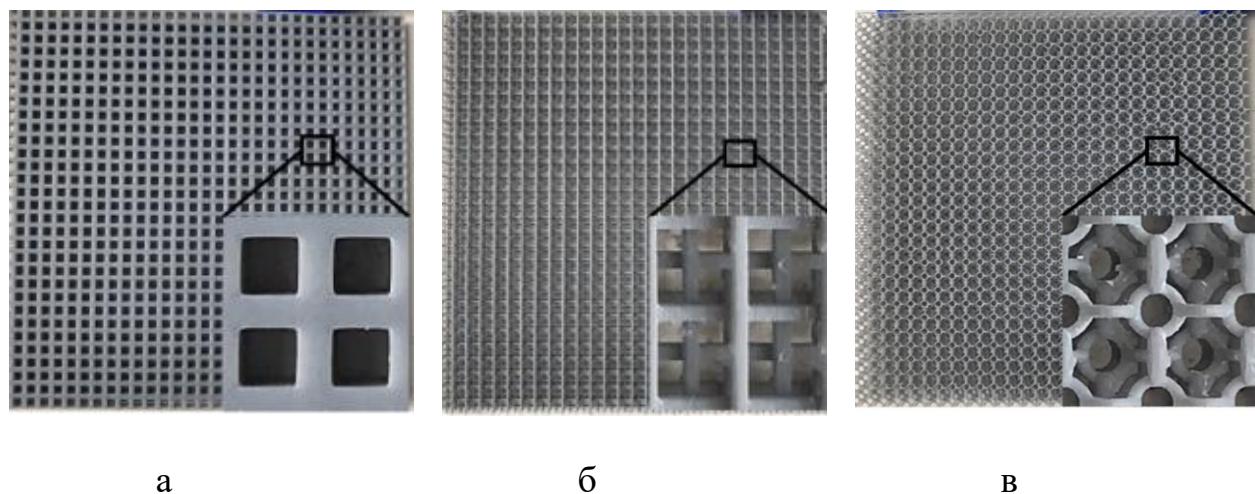


Рисунок 1.51 – Внешний вид сверху образцов электромагнитных экранов [113] на основе кубовидных объемных элементов (а), элементов типов «переплетенная поленница» (б) и «переплетенный торус» (в)

Технологии группы 5 используются в настоящее для получения как объемных, так и плоских элементов для частотно-селективных электромагнитных экранов (по сути, для получения как 3D, так и 2D частотно-селективных электромагнитных экранов). Электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологиями группы 5, представлены, например, в работах [20, 114–116].

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [114], состоит в формировании цилиндрических элементов из серебросодержащих нитей на поверхности фрагментов бархатной ткани (рисунок 1.52).

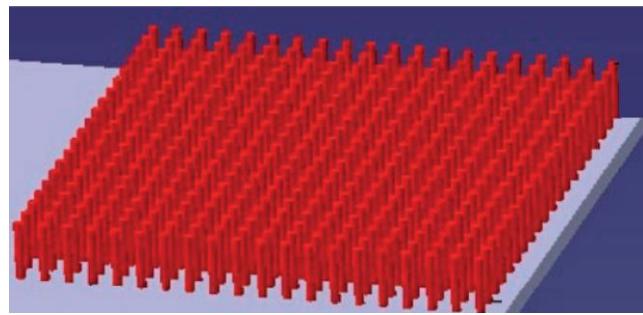


Рисунок 1.52 – Схематическое изображение модели образца электромагнитных экранов [114]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [115], состоит в выполнении компьютерной машинной вышивки крестообразных элементов с использованием токопроводящей нити на поверхностях подложек в виде фрагментов полиэстеровой ткани (рисунок 1.53).

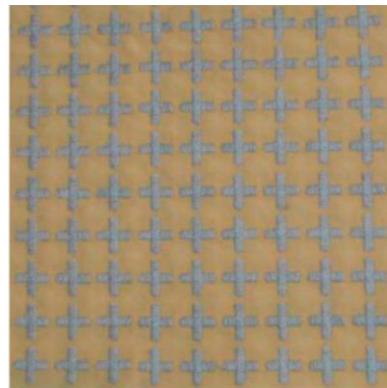


Рисунок 1.53 – Внешний вид сверху образца электромагнитных экранов [115]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [20], также, как и технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [115], состоит в выполнении компьютерной машинной вышивки элементов с использованием токопроводящей нити с серебряным покрытием. В первой из указанных технологий, в отличие от второй, в качестве подложек, на которых выполняется вышивка элементов, используются фрагменты джинсовой ткани, за счет чего электромагнитные экраны, представленные в работе [20], характеризуются более высокой прочностью по сравнению с электромагнитными экранами, представленными в работе [115].

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [116] состоит в изготовлении из фрагментов ткани подложек, характеризующихся геометрически неоднородной поверхностью, и нанесении на эти подложки крестообразных элементов (рисунок 1.54).

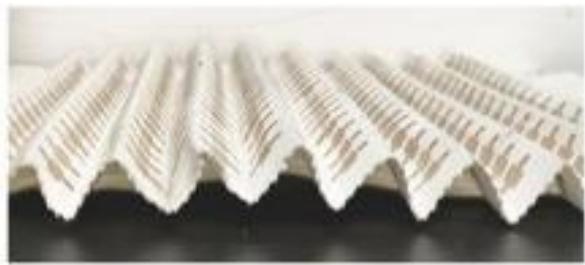


Рисунок 1.54 – Внешний вид сбоку образца электромагнитных экранов [116]

Следует отметить, что получение частотно-селективных электромагнитных экранов, характеризующихся широкой резонансной полосой, обеспечивается не только путем нанесения или закрепления на обеих поверхностях подложек плоских элементов, не только путем закрепления на поверхности подложек объемных элементов, но и путем поочередного нанесения друг на друга слоев, каждый или большая часть из которых представляет собой композиционный материал, наполнителями которого являются электропроводящие и / или магнитные порошки и / или волокна.

1.3.2 Экраны, характеризующиеся слоистой структурой

Частотно-селективные электромагнитные экраны, характеризующиеся слоистой структурой, включают в себя два или более слоев, изготовленных с использованием электропроводящих материалов в виде порошков, волокон, листов фольги, фольгированной (металлизированной) пленки. В настоящее время можно выделить следующие виды рассматриваемых экранов в зависимости от состава их слоев.

1. Электромагнитные экраны, каждый из слоев которых представляет собой одно из нижеследующего (далее – экраны вида 1):

- композиционный материал с электропроводящим и/ или магнитным наполнителем;
- волокнистый материал;
- электропроводящая пленка;
- лист фольги или фольгированной (металлизированной) пленки.

2. Электромагнитные экраны, один или несколько из слоев которых содержат упорядоченно размещенные отверстия или полученные на основе электропроводящих материалов плоские элементы (далее – экраны вида 2).

3. Электромагнитные экраны, наружный слой которых содержит упорядоченно размещенные объемные элементы, полученные на основе электропроводящих материалов (далее – экраны вида 3).

4. Электромагнитные экраны, представляющие собой совокупность закрепленных на поверхностях подложек объемных элементов, характеризующихся слоистой структурой (далее – экраны вида 4).

В таблице 1.3 представлены методы, заложенные в основу технологий изготовления экранов каждого из вышеперечисленных видов.

Таблица 1.3 – Методы, заложенные в основу технологий изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, характеризующихся слоистой структурой

Условное наименование технологий	Методы, заложенные в основу технологий
Технологии изготовления экранов вида 1	<ol style="list-style-type: none"> 1. Диспергирование порошкообразного материала в связующее вещество. 2. Механическое нанесение на подложку. 3. Инкорпорирование частиц порошкообразного материала в трикотажную матрицу. 4. Напыление пленки на подложку.
Технологии изготовления экранов вида 2	<ol style="list-style-type: none"> 1. Методы, заложенные в основу технологий изготовления экранов вида 1. 2. Формование отверстий в листовых материалах. 3. Упорядоченное размещение и закрепление (нанесение) на поверхности диэлектрических матриц или закрепление в объеме таких матриц плоских элементов, полученных на основе электропроводящих материалов.
Технологии изготовления экранов вида 3	<ol style="list-style-type: none"> 1. Методы, заложенные в основу технологий изготовления экранов вида 1. 2. Упорядоченное размещение и закрепление на поверхности диэлектрических матриц объемных элементов, полученных на основе электропроводящих материалов.
Технологии изготовления экранов вида 4	<ol style="list-style-type: none"> 1. Методы, заложенные в основу технологий изготовления экранов вида 1. 2. 3D-печать.

Следует отметить, что в течение 2019–2023 г. экраны вида 1 чаще являлись объектами разработок и научных исследований по сравнению с экранами видов 2, 3 и 4. Это утверждение основано на результатах анализа количества научных публикаций, посвященных этим экранам и проиндексированных за указанный период в реферативных базах данных рецензируемой научной литературы Scopus и Web of Science, а также в библиографической базе данных научных публикаций РИНЦ (рисунок 1.55).

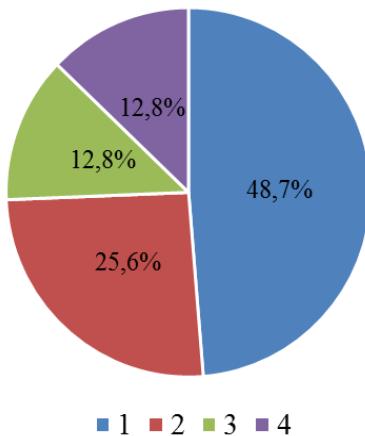


Рисунок 1.55 – Доли научных публикаций, посвященных экранам видов 1, 2, 3 и 4

В рамках технологий изготовления экранов вида 1, основанных на диспергировании порошкообразных материалов в связующие вещества и дальнейшем механическом нанесении на подложки полученных в результате этого композиционных материалов, предусмотрено использование и электропроводящих (как правило, углеродосодержащих), и магнитных материалов. Включение последних в состав электромагнитных экранов (в частности, в состав поверхностных слоев электромагнитных экранов) способствует увеличению коэффициента поглощения и снижению коэффициента отражения этих экранов [117]. Обозначенные технологии и изготовленные в соответствии с ними экраны вида 1, представлены, например, в работах [118–122].

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [118], состоит в нанесении на металлическую подложку слоя на основе композиционного материала, наполнителем которого является порошкообразный карбид кремния, в частицы которого включены наночастицы меди. Толщина таких экранов – $\sim 1,7$ мм.

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [119], состоит в нанесении на композиционный материал, наполнителем которого является смесь графена и порошкообразного карбонильного железа, а связующим веществом – полиметилметакрилат, слоя в виде композиционного материала, наполнителем которого является смесь графена и порошкообразного соединения $\text{Li}_{0,35}\text{Zn}_{0,3}\text{Fe}_{2,35}\text{O}_4$, а связующим веществом – полиметилметакрилат.

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [120], состоит нанесении слоя мелкодисперсного оксида железа (II, III) толщиной 0,1 мм на поверхность композиционной слоистой структуры MXene / Fe_3O_4 толщиной 1,9 мм. Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [121], аналогична технологии изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [120], с той лишь разницей, что в рамках нее на композиционную слоистую

структуре MXene наносится слой частиц карбида титана, содержащих включения в виде частиц мелкодисперсного оксида железа (III).

Использование оксида железа также предусмотрено и в технологии изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [122]. Эта технология состоит в нанесении на металлическую подложку слоя толщиной 2,7 мм в виде композиционного материала, наполнителями которого являются базальтовые волокна и мелкодисперсный оксид железа (III), а связующим веществом – полимерный материал, и последующем нанесении поверх него слоя толщиной 0,3 мм в виде композиционного материала, наполнителями которого являются базальтовые волокна и сажа, а связующим веществом – полимерный материал.

Следует отметить, что большая часть экранов вида 1, технологии изготовления которых основаны на диспергировании порошкообразных материалов в связующие вещества и дальнейшем механическом нанесении на подложки полученных в результате этого композиционных материалов, содержит три и более слоев. Это обусловлено тем, что в ходе изготовления в соответствии с обозначенными технологиями экранов, содержащих два слоя, как правило, необходимо решать задачу оптимизации, направленную на выбор оптимального соотношения между электропроводящими и магнитными компонентами в порошкообразных материалах, подлежащих диспергированию в связующие вещества [123].

Особенностью экранов, технологии изготовления которых основаны на диспергировании порошкообразных материалов в связующие вещества и дальнейшем механическом нанесении на подложки полученных в результате этого композиционных материалов, является то, что они, как правило, являются твердотельными, что накладывает ограничения на процессы эксплуатации таких экранов (в частности, их проблематично наносить на поверхности подлежащих электромагнитному экранированию объектов сложной формы). В целях обеспечения свойства гибкости (конформности) электромагнитных экранов, характеризующихся слоистой структурой, необходимо для их изготовления использовать технологии, основанные на инкорпорировании частиц порошкообразного материала в трикотажную матрицу, или технологии, основанные на напылении пленок на гибкие подложки.

Технологии изготовления экранов вида 1, основанные на инкорпорировании частиц порошкообразного материала в трикотажную матрицу, и соответственно экраны вида 1, изготовленные в соответствии с этими технологиями, представлены, например, в работах [124, 125].

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [124], состоит в пропитывании фрагментов нетканого полиэфирного полотна водным раствором, содержащим углеродные нанотрубки, дальнейших горячей прокатке этих фрагментов и нанесении на обе их поверхности слоев частиц порошкообразного оксида железа (II, III) и последующем ламинации полученных в результате этого структур (рисунок 1.56).

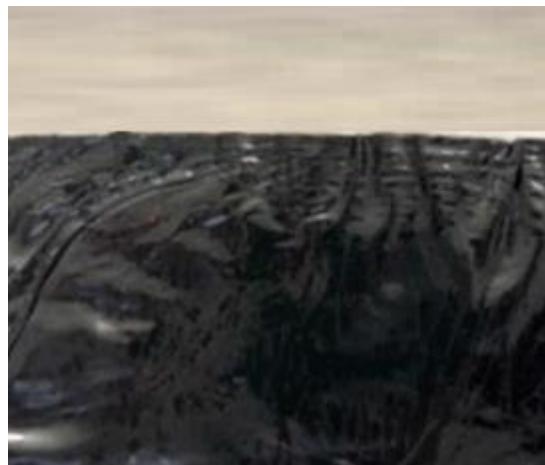


Рисунок 1.56 – Внешний вид фрагмента поверхности одного из образцов электромагнитных экранов [124]

Технологии изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [125], основаны на формировании композиционных материалов путем включения частиц магнитных и электропроводящих порошков в текстильные матрицы и дальнейшем соединение этих материалов друг с другом.

Технологии изготовления экранов вида 1, основанные на напылении пленок на подложки, и соответственно экраны вида 1, изготовленные в соответствии с этими технологиями, представлены, например, в работах [126–128].

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [126], состоит в закреплении на поверхности стекла стеклоткани, на которую напылен слой в виде никелевой пленки, и дальнейшем закреплении на поверхности этой ткани стеклоткани, на которую напылен слой в виде никель-кобальтовой пленки.

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [127], состоит в том, что сначала на пленку, синтезированную из поликарбоната, наносится первый слой в виде пленки, синтезированной из поликарбоната (98,0 об. %) и углеродных нанотрубок (2,0 об. %), после чего поверх указанного первого слоя, наносится слой в виде пленки, синтезированной из поликарбоната, затем на этот слой наносится второй слой в виде пленки, синтезированной из поликарбоната (95,0 об. %) и углеродных нанотрубок (5,0 об. %), далее поверх указанного второго слоя, наносится слой в виде пленки, синтезированной из поликарбоната, после чего на этот слой наносится третий слой в виде пленки, синтезированной из поликарбоната (92,5 об. %) и углеродных нанотрубок (7,5 об. %). Также в работе [127] представлена технология изготовления электромагнитных экранов, которая состоит в нанесении на слой в виде композиционного материала на основе поликарбоната и углеродных нанотрубок слоя в виде композиционного материала на основе поликарбоната и никелированных нанопроволок.

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [128], состоит в нанесении на листы на основе дисульфида ванадия пленки из оксида никеля. Толщина таких экранов – ~ 1,2 мм.

Следует отметить, что рассматриваемые экраны вида 1, как правило, характеризуются высокой стоимостью, что связано с соответствующим свойством входящих в их состав компонентов, а также с высокой технологической сложностью процессов изготовления таких экранов [129]. Для исключения указанного недостатка в настоящее время предложено при изготовлении указанных экранов использовать отходы производства. В частности, в работе [130] представлены двухслойные электромагнитные экраны, технология изготовления которых состоит в механическом нанесении на лист металла толщиной 1,0 мм слоя в виде композиционного материала, наполнителем которого является смесь порошкообразного материала, полученного путем измельчения кукурузной шелухи, и порошкообразного угля. В работе [131] представлены трехслойные электромагнитные экраны, технология изготовления которых состоит, по сути, в механическом нанесении на поверхность экрана, представленного в работе [130], слоя в виде композиционного материала, наполнителем которого является порошкообразный материал, полученный путем измельчения кукурузной шелухи.

Еще одним подходом к снижению стоимости частотно-селективных электромагнитных экранов, характеризующихся слоистой структурой, является замена их одного или нескольких слоев слоем (-ями) в виде листа фольги или фольгированной пленки, содержащего упорядоченно размещенные отверстия, или слоем (-ями) в виде подложки на поверхности которой упорядоченно закреплены или нанесены полученные с использованием электропроводящих материалов плоские элементы. Результатом реализации этого подхода, по сути, является получение экранов вида 2. Следует отметить, что в результате использования представленного подхода можно обеспечить не только снижение стоимости, но и уменьшение толщины частотно-селективных электромагнитных экранов, характеризующихся слоистой структурой.

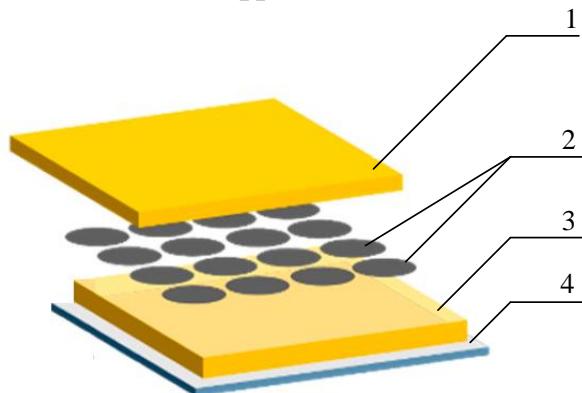
В структуру экранов вида 2, как и экранов вида 1, входят два или более слоя. Экраны вида 2 могут быть условно разделены на два подвида в зависимости о количества входящих в их структуру слоев в виде подложки на поверхности которой упорядоченно закреплены или нанесены полученные с использованием электропроводящих материалов плоские элементы:

– экраны, в структуру которых входит один слой в виде подложки на поверхности которой упорядоченно закреплены или нанесены полученные с использованием электропроводящих материалов плоские элементы (далее по тексту – экраны подвида 2.1);

– экраны, в структуру которых входят два или более слоев в виде подложки на поверхности которой упорядоченно закреплены или нанесены полученные с использованием электропроводящих материалов плоские элементы (далее по тексту – экраны подвида 2.2).

Экраны подвида 2.1 и технологии их изготовления представлены в работах [132–138].

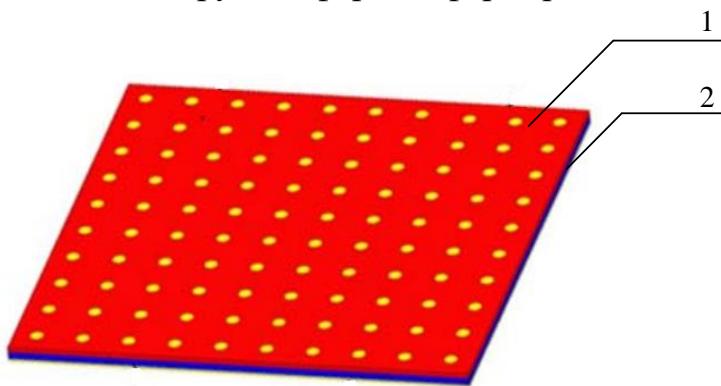
Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [132] (рисунок 1.57), состоит в закреплении на медной подложке слоя в виде фрагмента стекловолокнистого материала, дальнейшем нанесении на этот слой пластинчатых элементов круглой формы из пленок на основе восстановленного оксида графена и последующем нанесении поверх этих элементов слоя в виде фрагмента стекловолокнистого материала.



1, 3 – слои в виде фрагмента стекловолокнистого материала;
2 – пластинчатые элементы из пленок на основе восстановленного оксида
графена; 4 – медная подложка

Рисунок 1.57 – 3D-модель декомпозированного образца
электромагнитных экранов [132]

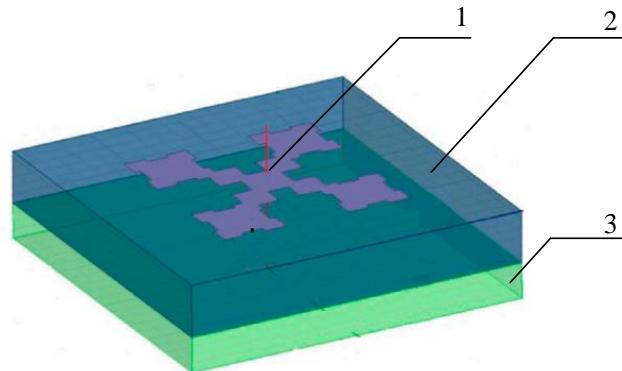
Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [133] (рисунок 1.58), также, как и технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [132], основана на использовании слоя в виде подложки, на поверхности которой упорядоченными закреплены пластинчатые элементы круглой формы. Подложка сформирована из композита, наполнителем которого являются волокна радиопрозрачного материала, связующим веществом – эпоксидная смола. Пластинчатые элементы круглой формы сформированы из медного листа.



1 – слой в виде подложки, на поверхности которой упорядоченными
закреплены пластинчатых элементов круглой формы; 2 – медная подложка

Рисунок 1.58 – Схематическое изображение образца электромагнитных
экранов [133]

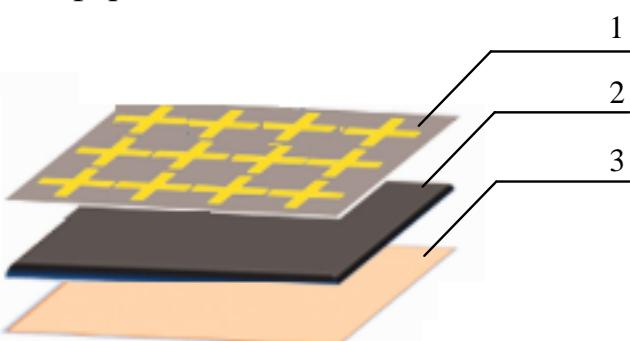
Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [134] (рисунок 1.59), состоит в нанесении на алюминиевую подложку слоя в виде композиционного материала, наполнителем которого является отход сельскохозяйственного производства (жом сахарного тростника) и дальнейшем нанесении на этот слой пластинчатых фрактальных элементов типа «петля Минковского».



1 – пластинчатый фрактальный элемент типа «петля Минковского»;
2 – слой в виде композиционного материала, наполнителем которого является жом сахарного тростника; 3 – алюминиевая подложка

Рисунок 1.59 – 3D-модель декомпозированного фрагмента образца электромагнитных экранов [134]

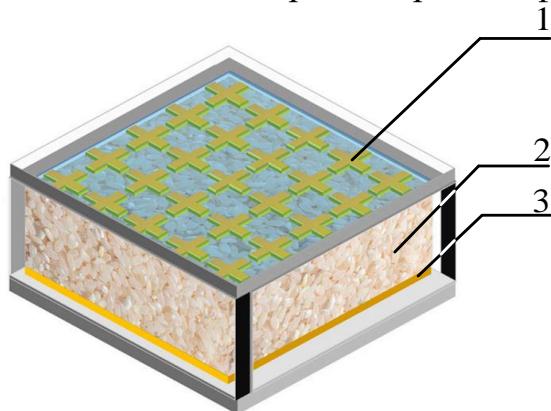
Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [135] (рисунок 1.60), состоит в закреплении на ткани, поверхность которой покрыта частицами карбонильного железа, слоя в виде никелированной ткани, и последующем закреплении на этом слое ткани, на поверхность которой методом струйной печати с использованием чернил, содержащих карбонильное железо, упорядоченно нанесены пластинчатые элементы крестообразной формы.



1 – слой в виде ткани, на поверхность которой упорядоченно нанесены пластинчатые элементы крестообразной формы; 2 – слой в виде никелированной ткани; 3 – слой в виде ткани, поверхность которой покрыта частицами карбонильного железа

Рисунок 1.60 – Модель декомпозированного фрагмента образца электромагнитных экранов [135]

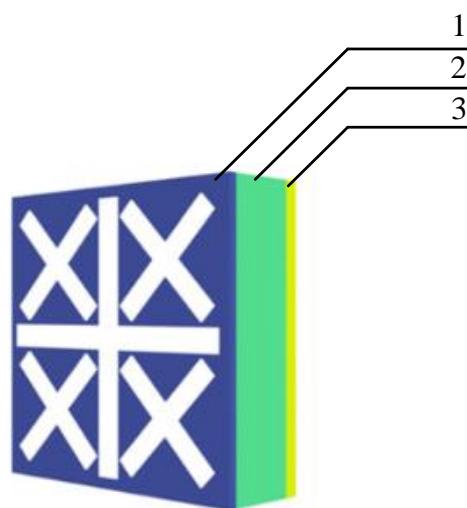
Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [136] (рисунок 1.61), схожа с технологией изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [135], и состоит в нанесении на медную подложку слоя на основе частиц диэлектрического материала и дальнейшем закреплении на этом слое подложки FR-4, на поверхность которой методом печати нанесены пластинчатые элементы крестообразной формы.



1 – слой в виде подложки FR-4, на поверхность которой нанесены пластинчатые элементы; 2 – слой на основе частиц диэлектрического материала; 3 – медная подложка

Рисунок 1.61 – 3D-модель фрагмента образца электромагнитных экранов [136]

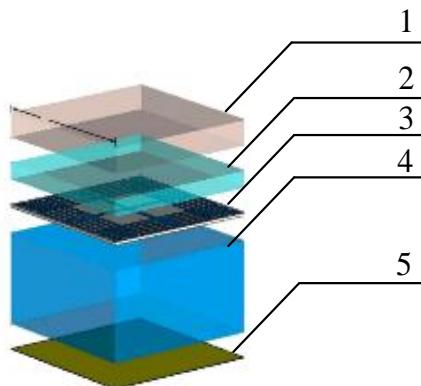
Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [137] (рисунок 1.62), состоит в закреплении на медной подложке слоя из поливинилхлоридной пленки и дальнейшем закреплении на этом слое слоя в виде полиэтиленовой пленки, на поверхности которой упорядоченно нанесены пластинчатые элементы крестообразной формы из пленок оксида индия – олова.



1 – слой в виде полиэтиленовой пленки, на поверхности которой нанесены плоские элементы из пленок из оксида индия – олова; 2 – слой в виде поливинилхлоридной пленки; 3 – медная подложка

Рисунок 1.62 – 3D-модель фрагмента образца электромагнитных экранов [137]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [138] (рисунок 1.63), состоит в закреплении на медной подложке слоя в виде листа из полиметакрилимида, закреплении на этом слое слоя в виде полиэтиленовой пленки, на поверхности которой упорядоченно нанесены петлевидные элементы с модифицированной формой (рисунок 1.64) из пленок из оксида индия – олова, и последующем поочередном закреплении поверх указанного слоя слоев в виде листа из полиметилметакрилата и в виде подложки FR-4.



1 – слой в виде подложки FR-4; 2 – слой в виде листа из полиметилметакрилата; 3 – слой в виде полиэтиленовой пленки, на поверхности которой упорядоченно нанесены петлевидные элементы с модифицированной формой; 4 – слой в виде листа из полиметакрилимида; 5 – медная подложка

Рисунок 1.63 – 3D-модель декомпозированного фрагмента образца электромагнитных экранов [138]

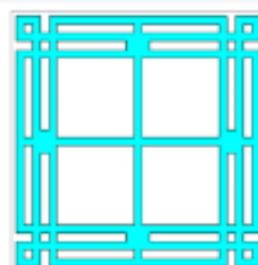


Рисунок 1.64 – Схематическое изображение одного из петлевидных элементов с модифицированной формой, которые должны быть нанесены на поверхность полиэтиленовой пленки при изготовлении электромагнитных экранов [138]

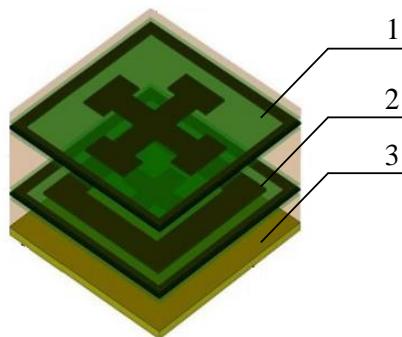
Экраны подвида 2.2 и технологии их изготовления представлены, например, в работах [139–144].

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [139], состоит в последовательной реализации следующих операций:

- нанесение на металлическую подложку слоя из вспененного материала;
- нанесение на вышеуказанный слой слоя в виде подложки, на поверхности которой упорядоченно закреплены полученные из фольги пластинчатые элементы квадратной формы;

- нанесение на вышеуказанный слой слоя из вспененного материала;
- нанесение на вышеуказанный слой слоя в виде подложки, на поверхности которой упорядоченно закреплены полученные из фольги петлевидные элементы квадратной формы.

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [140] (рисунок 1.65), состоит в закреплении на слое в виде медной подложки двух слоев в виде диэлектрических подложек, на поверхности которых методом струйной печати с использованием чернил, содержащих углеродные нанотрубки с включением наночастиц оксида железа (II, III), упорядоченно нанесены плоские комбинированные элементы. При этом указанные два слоя отличаются друг от друга формой входящих в их структуру плоских комбинированных элементов.



1, 2 – слои в виде диэлектрических подложек, на которые нанесены плоские комбинированные элементы;
3 – медная подложка

Рисунок 1.65 – 3D-модель декомпозированного фрагмента образца электромагнитных экранов [140]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [141], также, как и технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [137], основана на использовании слоев в виде полиэтиленовых пленок, на поверхности которых нанесены элементы из пленок оксида индия – олова. В отличие от электромагнитных экранов, представленных в работе [137], в структуру электромагнитных экранов, представленных в работе [141], входят три слоя в виде полиэтиленовых пленок, на поверхности которых нанесены плоские элементы из пленок оксида индия – олова. При этом форма элементов, нанесенных на поверхность полиэтиленовой пленки одного слоя, отличается от формы элементов, нанесенных на поверхности полиэтиленовых пленок других слоев. В целом, электромагнитные экраны, представленные в работе [141], включают в себя следующие слои (порядок представления слоев – от наружного к внутреннему):

- первый слой в виде полиэтиленовой пленки, на поверхности которой упорядоченно нанесены комбинированные элементы из пленок оксида индия – олова (рисунок 1.66, а);
- первый слой в виде листа из полиметилметакрилата;

- второй слой в виде полиэтиленовой пленки, на поверхности которой упорядоченно нанесены комбинированные элементы из пленок оксида индия – олова (рисунок 1.66, б);
- второй слой в виде листа из полиметилметакрилата;
- третий слой в виде полиэтиленовой пленки, на поверхности которой упорядоченно нанесены комбинированные элементы из пленок оксида индия – олова (рисунок 1.66, в);
- третий слой в виде листа из полиметилметакрилата;
- слой в виде полиэтиленовой пленки;
- слой в виде подложки, на поверхности которой нанесена пленка оксида индия – олова.

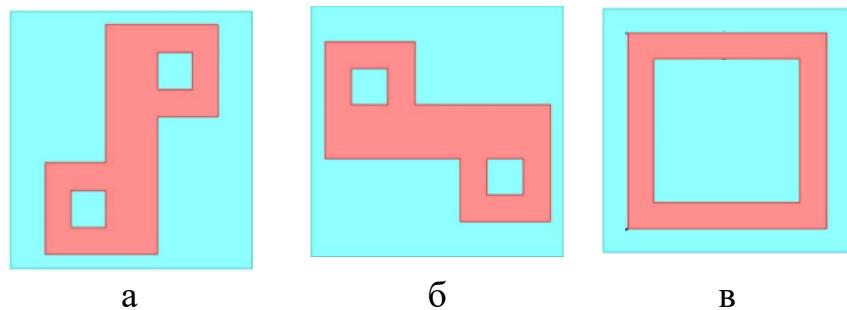
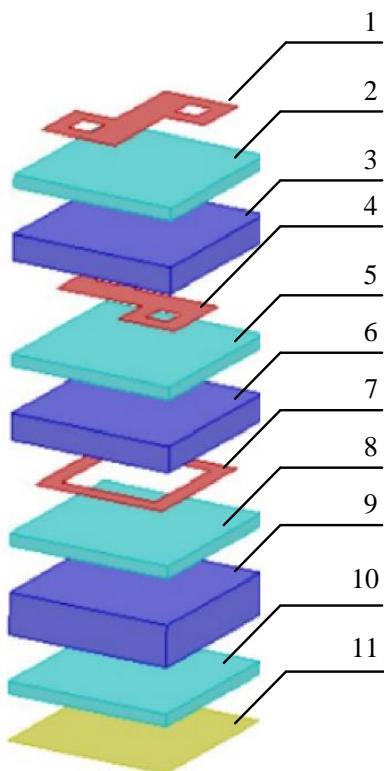


Рисунок 1.66 – Схематическое изображение элементов, которые должны быть нанесены на поверхности первого (а), второго (б) и третьего (в) слоев в виде полиэтиленовой пленки при изготовлении электромагнитных экранов [141]

3D-модель декомпозированного фрагмента образца электромагнитных экранов, представленных в работе [141] представлена на рисунке 1.67.

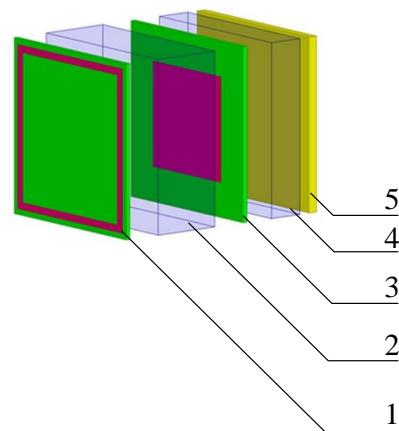
Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [142] (рисунок 1.68) состоит в закреплении на медной подложке слоя в виде листа из вспененного полиэтилена толщиной 0,2 см и последующем поочередном закреплении поверх этого слоя следующих слоев:

- слой в виде подложки FR-4 толщиной 0,02 см, на поверхности которой методом термопечати с использованием чернил, содержащих технический углерод, упорядоченно нанесены пластиначатые элементы;
- слой в виде листа из вспененного полиэтилена толщиной 0,3 см;
- слой в виде подложки FR-4 толщиной 0,02 см, на поверхности которой методом термопечати с использованием чернил, содержащих технический углерод, упорядоченно нанесены петлевидные элементы квадратной формы.



1, 4, 7 – комбинированные элементы, нанесенные на поверхности соответственно первого, второго и третьего слоев в виде полиэтиленовых пленок; 2, 5, 8 – полиэтиленовые пленки для формирования первого, второго и третьего слоев соответственно; 3, 6, 9 – соответственно первый, второй и третий слои в виде листа из полиметилметакрилата; 10 – слой в виде полиэтиленовой пленки; 11 – слой в виде подложки, на поверхности которой нанесена пленка оксида индия – олова

Рисунок 1.67 – 3D-модель декомпозированного фрагмента образца электромагнитных экранов [141]



1 – слой виде подложки FR-4, на поверхности которой упорядоченно нанесены петлевидные элементы; 2, 4 – слои в виде листов из вспененного полиэтилента; 3 – слой виде подложки FR-4, на поверхности которой упорядоченно нанесены пластинчатые элементы; 5 – медная подложка

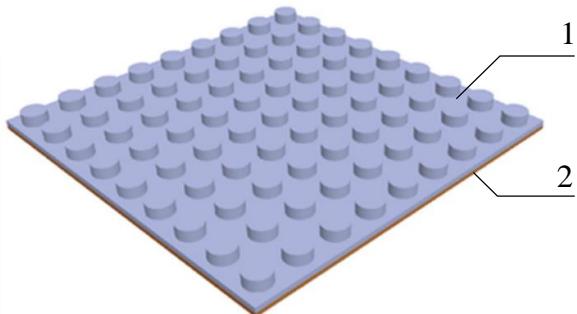
Рисунок 1.68 – 3D-модель декомпозированного фрагмента образца электромагнитных экранов [142]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работах [143, 144], состоит в закреплении поверх слоя в виде медной подложки, в которой сформированы отверстия круглой формы, слоя в виде подложки из радиопрозрачного материала, на поверхности которой закреплены пластинчатые элементы круглой формы, изготовленные из меди.

Известны также технологии изготовления экранов подвида 2.2, состоящие в соединении друг с другом слоев в виде одинаковых подложек, на поверхностях которых упорядоченно закреплены изготовленные из электропроводящих материалов плоские элементы, характеризующиеся одинаковыми размером и формой. Экраны, изготовленные в соответствии с такими технологиями, представлены, например, в работах [145, 146]. Слои таких экранов – текстильные подложки, на поверхностях которых упорядоченно закреплены пластинчатые элементы крестообразной формы [145] и петлевидные элементы квадратной формы [146]. Эти экраны являются трехслойными.

Для расширения диапазона значений углов падения ЭМИ, в котором величины коэффициентов отражения, передачи и поглощения ЭМИ экранов, характеризующихся слоистой структурой, остаются неизменными, а также для обеспечения дополнительного снижения величины коэффициента отражения ЭМИ этих экранов, выполняется модификация наружного слоя последних таким образом, чтобы он содержал упорядоченно размещенные объемные элементы, полученные на основе электропроводящих материалов. Экраны, модифицированные обозначенным образом, относятся к экранам вида 3, согласно классификации, представленной в начале текущего подраздела. Экраны вида 3 и технологии их изготовления представлены в работах [147–151]. Большая часть этих технологий основана на методе 3D-печати.

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [147] (рисунок 1.69) состоит в закреплении на металлической подложке слоя в виде совокупности элементов цилиндрической формы, полученных путем 3D-печати с использованием углеродсодержащего акрилонитрил-бутадиен-стирола.



1 – слой в виде совокупности элементов цилиндрической формы;
2 – металлическая подложка

Рисунок 1.69 – 3D-модель образца электромагнитных экранов [147]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [148] (рисунок 1.70) состоит в поочередном нанесении

на металлическую подложку путем 3D-печати десяти слоев в виде совокупности полых объемных элементов. Каждый слой характеризуется определенной толщиной (от 0,12 до 0,3 см). 3D-печать слоев выполняется с использованием композиционного материала, наполнителем которого являются частицы карбонильного железа (не менее 50,0 масс. %), а связующим веществом – полиэфирэфиркетон.

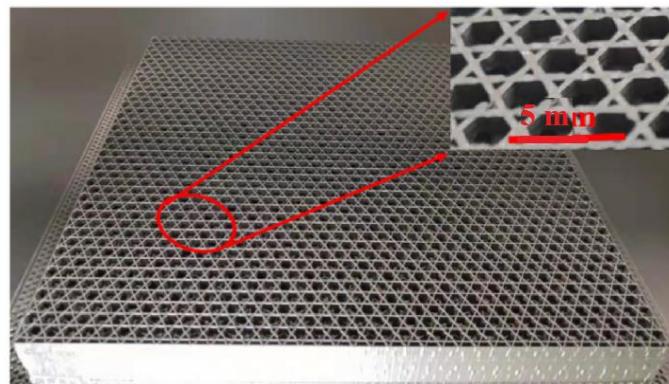
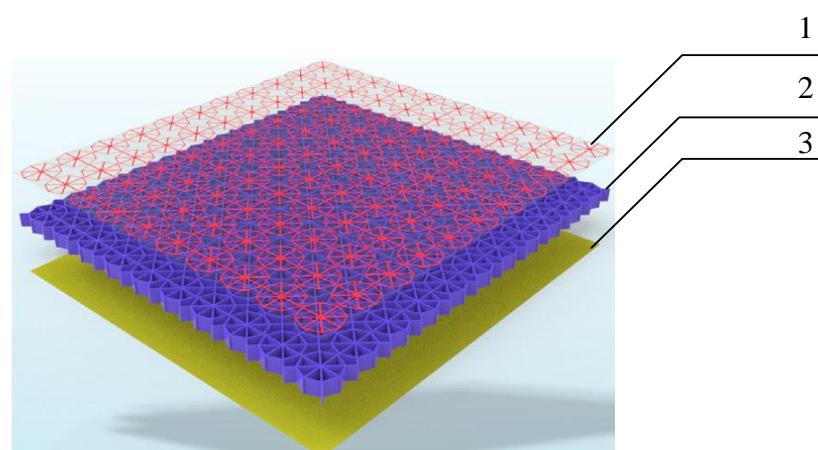


Рисунок 1.70 – Внешний вид образца электромагнитных экранов [148]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [149] состоит в выполнении 3D-печати совокупности полых объемных элементов с использованием термопластичного полимера (полиэфир-эфир-кетона), нанесении на лицевую сторону этих элементов пленки на основе оксидов индия и олова и закреплении на обратной стороне этих элементов медной фольги с использованием оптически прозрачного клея (рисунки 1.71, 1.72).



1 – пленка на основе оксидов индия и олова;

2 – совокупность полых объемных элементов; 3 – медная фольга

Рисунок 1.71 – Схематическое изображение декомпозированной модели образца электромагнитных экранов [149]

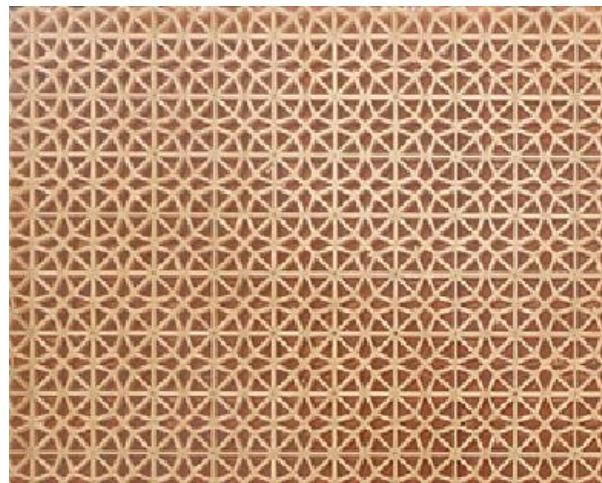


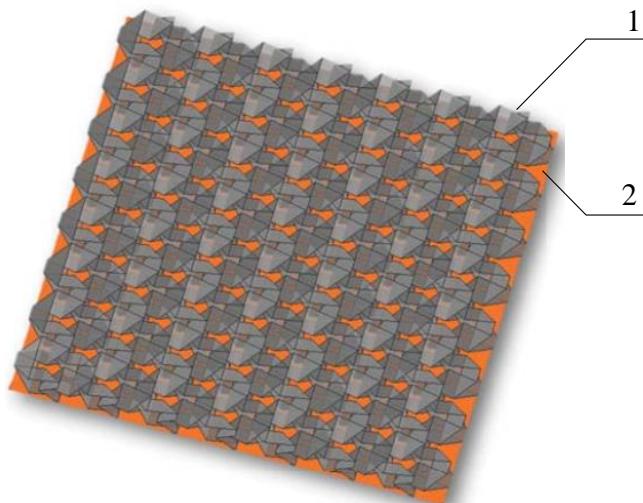
Рисунок 1.72 – Внешний вид фрагмента поверхности образца электромагнитных экранов [149]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [150] (рисунок 1.73), состоит в закреплении на металлической подложке слоя в виде листа на основе композиционного материала, наполнителем которого являются углеродные нанотрубки, и дальнейшем закреплении на этом слое совокупности пирамидальных элементов, изготовленных из композиционного материала, наполнителем которого является рисовая шелуха. Толщина листа на основе композиционного материала – 1,0 см, высота пирамидальных элементов – 11,5 см.



Рисунок 1.73 – Внешний вид образца электромагнитных экранов [150]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [151] (рисунок 1.74), состоит в закреплении на металлической подложке слоя в виде многогранника Тачи-Миура, изготовленного из тонкого полимерного листа с использованием техники оригами (рисунок 1.75).



1 – слой в виде многогранника Тачи-Миура; 2 – металлическая подложка
Рисунок 1.74 – 3D-модель образца электромагнитных экранов [151]

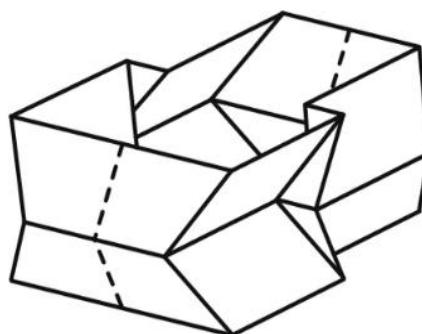


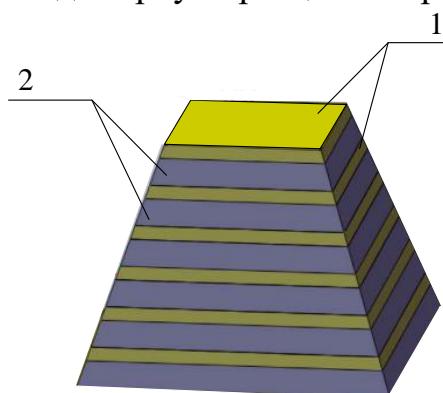
Рисунок 1.75 – Фрагмент многогранника Тачи-Миура

В целях расширения резонансной полосы частотно-селективных электромагнитных экранов, наружный слой которых содержит полученные на основе электропроводящих материалов упорядоченно размещенные объемные элементы, в настоящее время предлагается обеспечивать многослойную структуру для этих элементов. Результатом реализации такого подхода, по сути, является получение экранов вида 4, согласно классификации, представленной в начале текущего подраздела. Такие экраны и технологии их изготовления представлены в работах [152–153].

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [152] (рисунок 1.76), состоит в упорядоченном закреплении на металлической подложке объемных элементов в виде усеченных правильных четырехугольных пирамид, сформированных путем поочередного соединения друг с другом металлических пластин и пластин из диэлектрического материала (рисунок 1.77). Размер сторон оснований указанных пирамид – 0,33 и 0,13 см или 0,22 и 0,09 см.



Рисунок 1.76 – Внешний вид сверху образца электромагнитных экранов [152]



1 – металлические пластины; 2 – пластины из диэлектрического материала

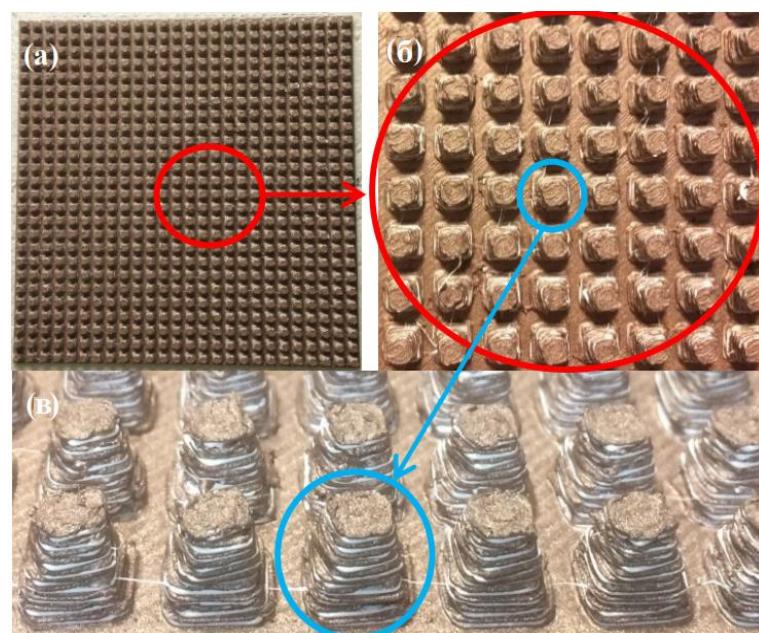
Рисунок 1.77 – 3D-модель одного из объемных элементов, с использованием которых изготовлены электромагнитные экраны [152]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [153] (рисунок 1.78), состоит в упорядоченном закреплении на подложке из полиэфиркарбоната объемных элементов, в структуру которых входят четыре слоя в виде пластин, сформированных из композиционного материала, наполнителем которого является смесь частиц карбонильного железа и многостенных углеродных нанотрубок, а связующим веществом – силиконовая резина. Толщина указанных пластин – 0,2 см. Ширина пластин, образующих первые слои объемных элементов (относительно подложки из полиэфиркарбоната, на которой закреплены эти элементы), – 1,5 см, ширина пластин, образующих вторые, третьи и четвертые слои указанных элементов, – 1,2, 1,0 и 0,8 см.



Рисунок 1.78 – Внешний вид образца электромагнитных экранов [153]

Технология изготовления электромагнитных экранов, представленных в работе [154] (рисунок 1.79), состоит в упорядоченном закреплении на металлической подложке объемных элементов в виде усеченных четырехугольных пирамид, характеризующихся многослойной структурой, в которую входят металлические слои и слои из диэлектрического материала. Указанные элементы получены методом 3D-печати с использованием металлических нитей (для формирования первых из вышеуказанных слоев) и диэлектрических нитей (для формирования вторых из вышеуказанных слоев).



а – вид сверху; б – увеличенный вид сверху; в – увеличенный вид сбоку
Рисунок 1.79 – Внешний вид образца электромагнитных экранов [154]

На практике выбор технологии изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона зависит от предъявляемых к ним требований, основными из которых являются следующие:

- толщина;
- плотность;
- гибкость (конформность);
- устойчивость к механическим воздействиям;
- коррозионная стойкость;
- стоимость.

В свою очередь, требования, предъявляемые частотно-селективным электромагнитным экранам СВЧ-диапазона, определяются планируемой областью применения этих экранов (таблица 1.4).

Следует также отметить, что соблюдение требований, предъявляемых к частотно-селективным электромагнитным экранам СВЧ-диапазона, обеспечивается за счет выбора не только технологии, но и материалов для изготовления таких экранов.

Таблица 1.4 – Области применения частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона

Область применения	1*	2*	3*	4*	5*	6**	7**	8**	9**
Изготовление обтекателей для летательных аппаратов [100, 155]			+				+		
Производство беспилотных летательных аппаратов [151, 155]		+	+				+		
Изготовление СВЧ-измерительных систем [5, 6]	+	+	+			+			
Изготовление антенных систем [7, 25, 156]	+	+	+						
Изготовление навигационных систем [7, 25]	+	+	+						
Создание датчиков электромагнитного поля с повышенной чувствительностью [157, 158, 159]									
Скрытие датчиков электромагнитного поля [160]		+	+				+		
Создание экранированных помещений [93, 96, 150]	+	+	+			+		+	+
Обеспечение адаптивного экранирования электромагнитных помех [100, 155]	+	+	+		+	+			
Производство изделий для защиты человека от воздействия ЭМИ СВЧ-диапазона [155, 161]			+	+	+		+		

* С помощью цифр «1», «2», «3», «4» и «5» обозначены электромагнитные экраны, характеризующиеся пространственно-периодической структурой и изготовленные в соответствии с технологиями групп 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно (см. таблицу 1.2)

** С помощью цифр «6», «7», «8» и «9» обозначены соответственно электромагнитные экраны видов 1, 2, 3 и 4, характеризующиеся слоистой структурой (см. таблицу 1.3)

1.4 Материалы для изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона

Основные материалы, используемые в рамках технологий изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, характеризующихся пространственно-периодической структурой, представлены в таблице 1.5, а основные материалы, используемые в рамках технологий изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, характеризующихся слоистой структурой, – в таблице 1.6.

Таблица 1.5 – Основные материалы, используемые в рамках технологий изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, характеризующихся пространственно-периодической структурой

Условное наименование технологий (см. таблицу 1.2)	Основные материалы, используемые в рамках технологий
Технологии группы 1	Металлические листы, полимерные материалы
Технологии группы 2	Металлические листы, проволоки, графеновые полотна
Технологии группы 3	Металлические листы, фольгированные (металлизированные) материалы, проволоки, графеновые полотна, углеродные волокнистые материалы, чернила, содержащие электропроводящие материалы (как правило, серебро)
Технологии группы 4	Фольгированные (металлизированные) материалы, углеродные волокнистые материалы, чернила, содержащие электропроводящие материалы (как правило, углерод), полимерные материалы, вода и водные растворы
Технологии группы 5	Токопроводящие (как правило, серебросодержащие) нити

Таблица 1.6 – Основные материалы, используемые в рамках технологий изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, характеризующихся слоистой структурой

Условное наименование технологий (см. таблицу 1.3)	Основные материалы, используемые в рамках технологий
1	2
Технологии изготовления экранов вида 1	Оксид железа (II, III), оксид железа (III), графен, углеродные нанотрубки, карбид кремния, карбонильное железо, пленки MXene, никельсодержащие пленочные материалы
Технологии изготовления экранов вида 2	Медные листы, алюминиевые листы, графен, порошкообразные материалы на основе отходов производства, карбонильное железо, металлизированная ткань, чернила, содержащие электропроводящие материалы (как правило, углерод), пленочные материалы из оксида индия – олова, углеродные нанотрубки, оксид железа (II, III)
Технологии изготовления экранов вида 3	Медные листы, чернила, содержащие электропроводящие материалы (как правило, углерод), углеродные нанотрубки, полимерные материалы, порошкообразные материалы на основе отходов производства
Технологии изготовления экранов вида 4	Металлические листы, полимерные листовые материалы

На основе данных, представленных в таблицах 1.4 и 1.5, можно заключить что в настоящее время для изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона используются материалы, которые могут быть условно разделены на следующие виды в зависимости от их формы:

- листовые электропроводящие материалы;
- дисперсные (как правило, мелкодисперсные) электропроводящие (как правило, углеродосодержащие) или магнитные (как правило, содержащие оксиды металлов) материалы;
- волокнистые электропроводящие материалы;
- жидкие материалы (вода, водные растворы, чернила для печати);
- пленочные электропроводящие или магнитные материалы;
- полимерные листовые материалы;
- полимерные жидкие материалы.

Характеристики (в частности, преимущества) частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона зависят от вида материала, использованного для изготовления таких экранов (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Преимущества частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона в зависимости от вида материала, использованного при их изготовлении [125]

Вид материала	Низкая плотность	Широкая резонансная полоса частот	Высокая механическая прочность	Низкая стоимость
Листовые электропроводящие материалы			+	
Пленочные электропроводящие или магнитные материалы	+		+ (обеспечивается за счет подложки)	
Полимерные материалы			+	
Графеновые полотна	+	+		
Дисперсные углеродосодержащие материалы	+	+	+	
Дисперсные оксиды металлов			+	+
Волокнистые электропроводящие материалы	+	+		
Вода, водные растворы		+	+	+
Чернила, содержащие электропроводящие материалы	+		+ (обеспечивается за счет подложки)	

* При условии, что экраны характеризуются пространственно-периодической структурой и представляют собой совокупность объемных элементов, закрепленных на подложках, или характеризуются слоистой структурой

В настоящее время к характеристикам частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона чаще всего предъявляются такие требования, как низкая плотность, широкая резонансная полоса частот и низкая стоимость. Как видно из таблицы 1.7, что двум из трех обозначенных требований (низкая плотность, низкая стоимость) удовлетворяют экраны, при изготовлении которых используются пленочные электропроводящие материалы, содержащие оксид алюминия [162, 163]. В связи с этим

в настоящее время представляется целесообразным проводить исследования, направленные на обеспечение следующего:

– расширение резонансной полосы частот частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе пленочных электропроводящих материалов, содержащих оксид алюминия;

– снижение стоимости частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе дисперсных или волокнистых углеродсодержащих материалов.

Для изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, содержащих оксид алюминия, представляется перспективным использование алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки. Она по сравнению с другими производимыми в настоящее время на промышленной основе фольговыми материалами характеризуется низкой стоимостью (таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Стоимость производимых в настоящее время на промышленной основе фольговых материалов

Наименование материала	Стоимость 1 м ² в белорусских рублях*
Алюминийсодержащая фольгированная полимерная пленка	2,5
Алюминиевая фольга толщиной 20,0 мкм	5,0
Алюминиевая фольга толщиной 50,0 мкм	20,0
Медная фольга толщиной 50,0 мкм	25,0

*по состоянию на 30.12.2023

Кроме того, алюминийсодержащая фольгированная полимерная пленка характеризуется свойствами гибкости и механической прочности, обуславливающими возможность модификации ее формы и получения за счет этого на ее основе объемных элементов сложной формы.

ГЛАВА 2

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

2.1 Исследование характеристик поглощения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона образцов электромагнитных экранов

Исследование характеристик поглощения электромагнитного излучения образцов электромагнитных экранов выполнялось в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц. Выбор такого диапазона частот обусловлен тем, что ему принадлежат частоты, характерные для ЭМИ, формируемого современными устройствами, широко используемыми в настоящее время в промышленности и быту (таблица 2.1). Такое излучение обуславливает увеличение электромагнитного фона и является причиной внешних электромагнитных помех.

Таблица 2.1 – Частоты ЭМИ, формируемые устройствами различного назначения

Наименование устройства	Частота (диапазоны частот) ЭМИ, формируемого устройством
Мобильные телефоны [164]	1,8 ГГц, 2,1 ГГц, 2,5 ГГц, 2,6 ГГц
Бытовые и промышленные СВЧ-печи [165]	2,45 ГГц
Устройства для построения беспроводных сетей [166]	2,4 ГГц, 5,6 ГГц, 5,7 ГГц
«Умные» счетчики электроэнергии, воды, газа, тепла [167]	1,8 ГГц, 2,4 ГГц
Устройства для физиотерапии пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата [168]	2,45 ГГц
СВЧ-устройство для хирургической деструкции тканей организма человека [169]	2,4 ГГц
Радиолокационные станции [170]	1,0–18,0 ГГц

В ходе исследования характеристик поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц каждого из образцов частотно-селективных электромагнитных экранов использовалась измерительная система, состоявшая из:

– панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18 (производитель – БГУИР, Республика Беларусь), включающего в себя генератор качающейся частоты (ГКЧ) и блок обработки измерительных сигналов;

- персонального компьютера;
- видеодисплейного терминала;

- двух рупорных антенн типа П6-23М;
- блоков направленных ответвителей (блок В и А/Р), предназначенных для выделения и детектирования падающей, отраженной и прошедшей через образец электромагнитных волн;
- специального программного обеспечения для установки параметров измерений (диапазон частот, вид измеряемой величины), обработки и систематизации их результатов.

Исследование характеристик поглощения ЭМИ СВЧ-диапазона образцов экранов выполнялось в соответствии с методикой, включавшей в себя следующие этапы.

1. Получение значений коэффициента отражения ЭМИ образца. В рамках этого этапа выполнялись следующие действия.

1.1. Калибровка измерительной системы в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.1, для установления оптимального уровня мощности ЭМИ для работы детекторов блока обработки измерительных сигналов.

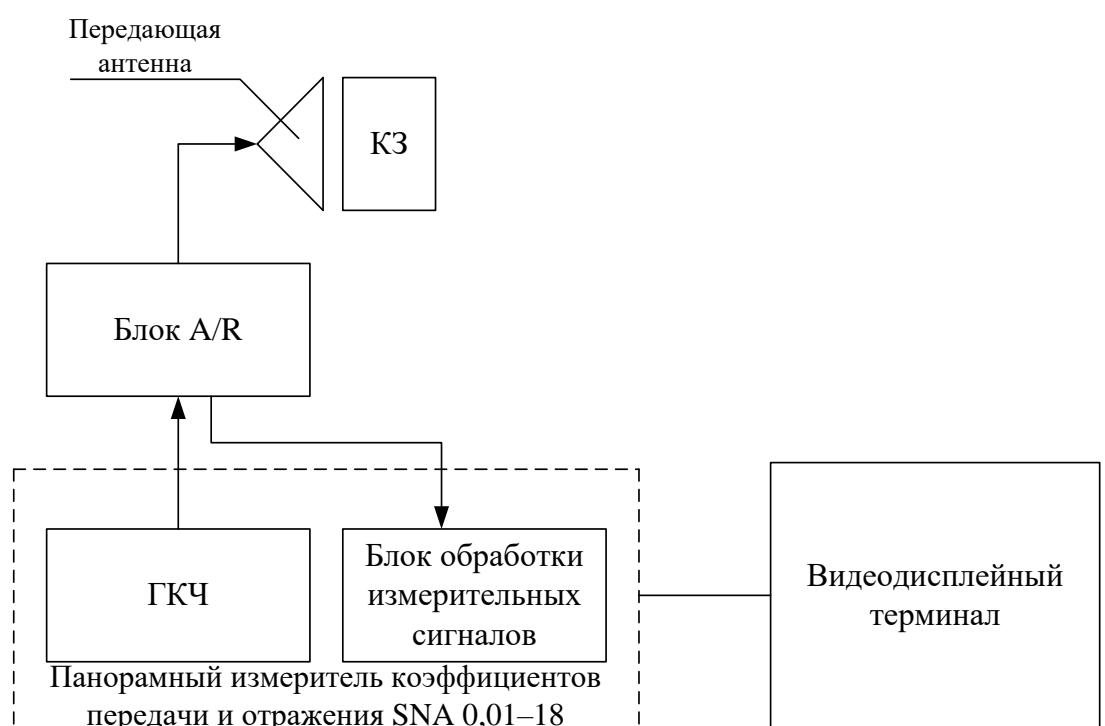


Рисунок 2.1 – Схема соединения устройств измерительной системы при ее калибровке перед измерением значений S_{11i} (КЗ – короткий замыкатель (металлический лист))

1.2 Проведение измерений значений коэффициента отражения ЭМИ в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.2.

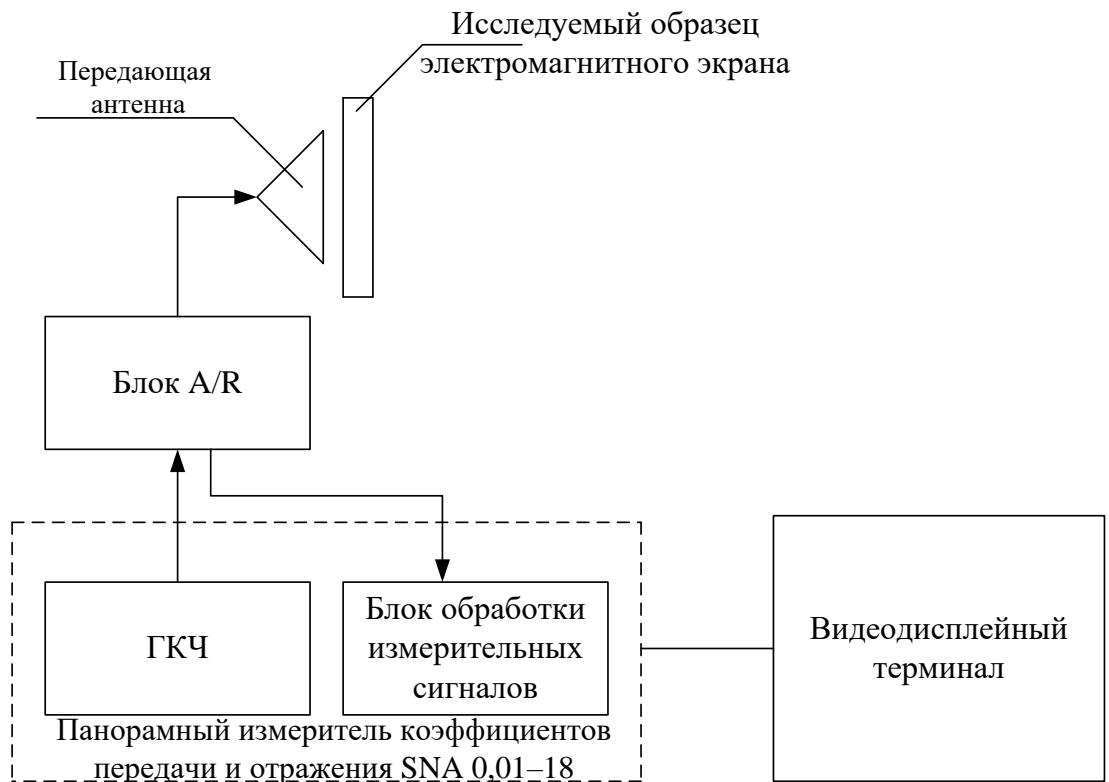


Рисунок 2.2 – Схема соединения устройств измерительной системы при проведении измерений значений S_{11i}

1.3 Последовательное повторение действий 1.1 и 1.2 не менее 4 раз.

1.4 Расчет средних значений коэффициента передачи ЭМИ ($\langle S_{11} \rangle$), согласно следующей формуле:

$$\langle S_{11} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n S_{11i}}{n}, \text{ дБ}, \quad (2.1)$$

где S_{11i} – измеренное в i -ый раз значение коэффициента отражения ЭМИ;

n – количество раз, которые проводились измерения значений коэффициента отражения ЭМИ образца ($n \geq 5$).

2. Получение значений коэффициента передачи ЭМИ образца. В рамках этого этапа выполнялись следующие действия.

2.1. Калибровка измерительной системы в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.3, для установления оптимального уровня мощности ЭМИ для работы детекторов блока обработки измерительных сигналов.

2.2 Проведение измерений значений коэффициента передачи ЭМИ в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.4.

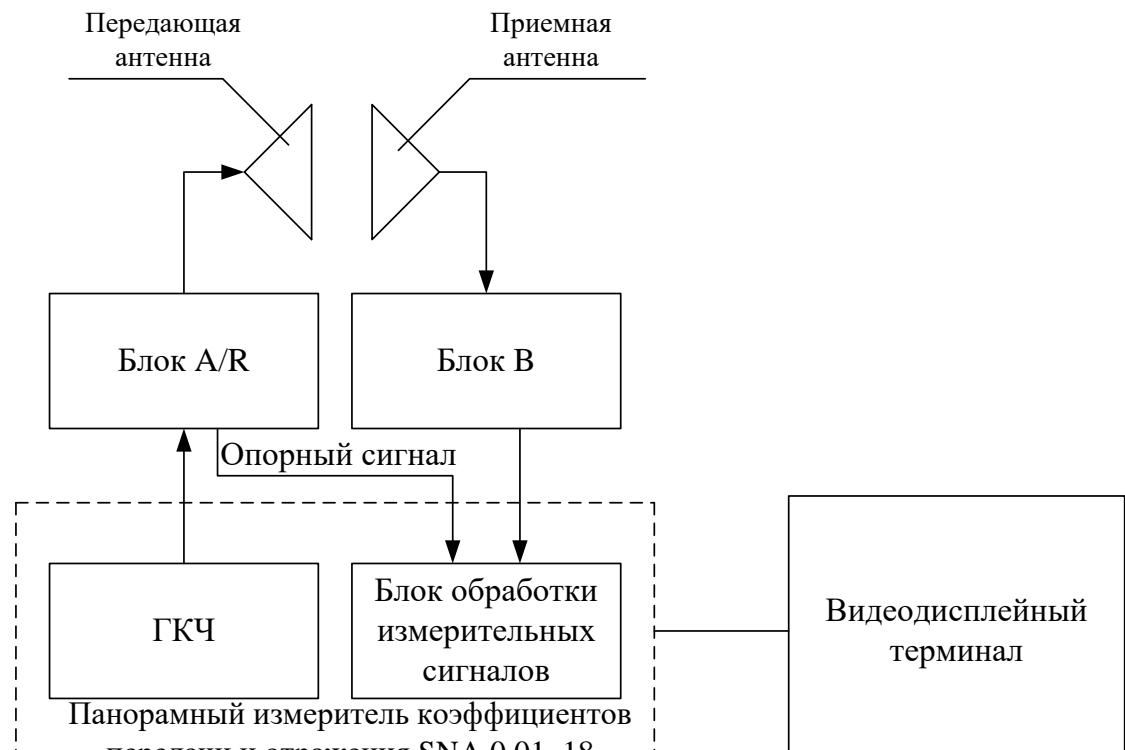


Рисунок 2.3 – Схема соединения устройств измерительной системы при ее калибровке перед измерениями значений S_{21i}

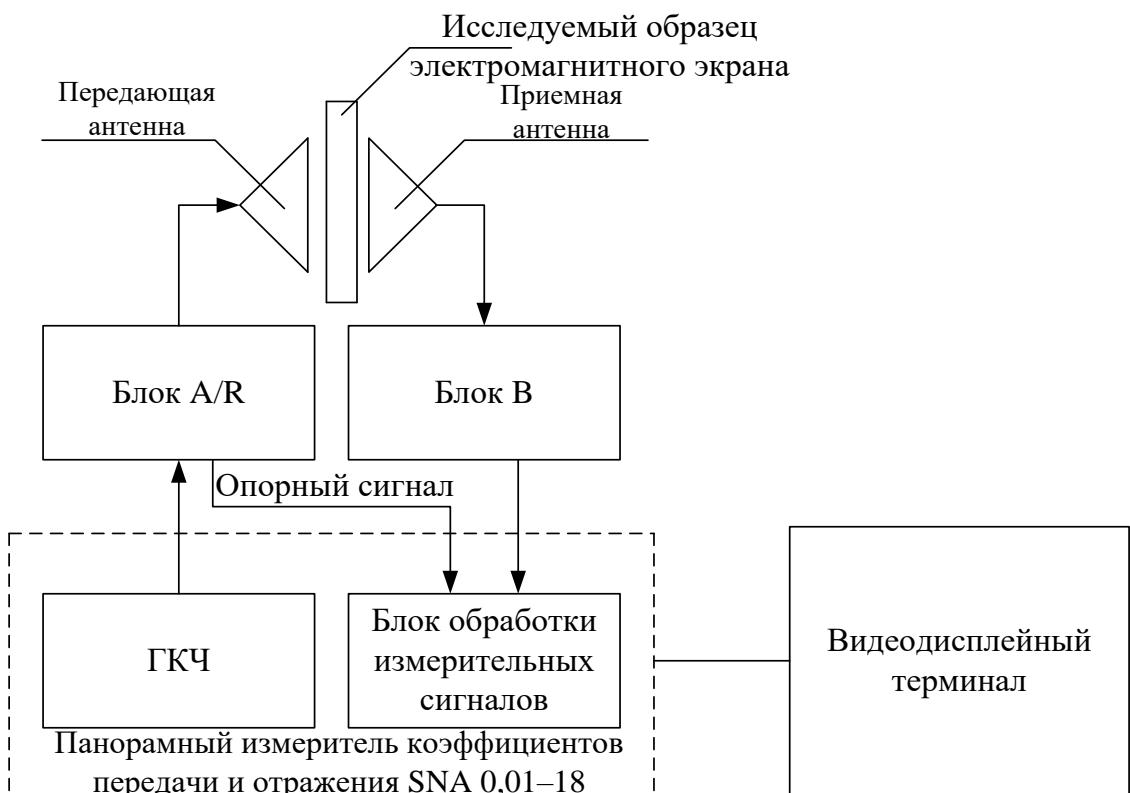


Рисунок 2.4 – Схема соединения устройств измерительной системы при проведении измерений значений S_{21i}

2.3 Последовательное повторение действий 2.1 и 2.2 не менее 4 раз.

2.4 Расчет средних значений коэффициента передачи ЭМИ ($\langle S_{21} \rangle$), согласно следующей формуле:

$$\langle S_{21} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^m S_{21i}}{m}, \text{ дБ,} \quad (2.2)$$

где S_{21i} – измеренное в i -ый раз значение коэффициента передачи ЭМИ; m – количество раз, которые проводились измерения значений коэффициента отражения ЭМИ образца ($m \geq 5$).

3. Вычисление значений коэффициента поглощения ЭМИ (A) образца, согласно следующей формуле:

$$A = 1 - 10^{\frac{\langle S_{11} \rangle}{10}} - 10^{\frac{\langle S_{21} \rangle}{10}}, \text{ отн. ед.} \quad (2.3)$$

Модуль относительной погрешности измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ с использованием панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18 не превышает 10 %.

2.2 Исследование взаимодействия электромагнитного излучения ИК-диапазона с образцами электромагнитных экранов

В ходе проведения исследования взаимодействия электромагнитного излучения ИК-диапазона с образцами экранов, был использован представленный в работе [171] стенд, конструкция которого была предварительно модифицирована. В состав модифицированной конструкции использованного стенда входили следующие элементы:

- предметный столик;
- источник ЭМИ ИК-диапазона;
- дуга с закрепленными на ней устройством регистрации ИК-излучения и планками для размещения образца;
- дуга с закрепленными на ней планками для размещения образца;
- блок управления устройством регистрации ИК-излучения.

Дуги, входившие в состав конструкции стенда, были размещены в параллельных плоскостях в 20,0 см друг от друга. Расстояние между свободными концами планок для размещения образца, закрепленных на каждой из дуг, также составляли 20,0 см. Планки были изготовлены из органического стекла.

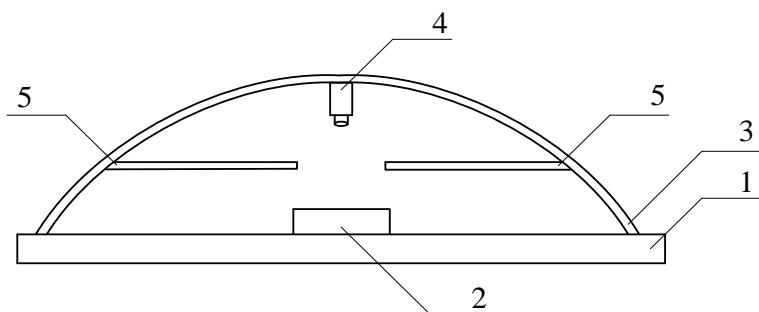
Схематическое изображение использованного стенда представлено на рисунке 2.5

В качестве источника ЭМИ ИК-диапазона в ходе проведения исследования был использован нагреватель на основе галогеновой лампы MR16, температура поверхности которого составляла $70,0 \pm 2,0$ °С. В качестве

устройства регистрации ИК-излучения в ходе проведения исследования была использована тепловизионная камера MobIR M4 (производитель – Wuhan Guide Infrared Ltd., Китайская Народная Республика), характеризующаяся следующими параметрами:

- рабочий диапазон длин волн – 8,0–14,0 мкм;
- оптическое поле зрения по вертикали и горизонтали – $25,0 \times 19,0^\circ$;
- диапазон измеряемых температур – от –25,0 до +250,0 °C;
- точность измерения температуры – $\pm 2,0$ °C;
- минимальная наблюдаемая площадь – 0,5 мм².

Расстояние между источником ЭМИ ИК-диапазона и поверхностью исследуемого образца, а также объективом тепловизионной камеры и поверхностью образца составляло 5,0 см. Корпус тепловизионной камеры размещался под углом 90,0° относительно поверхности исследуемого образца.



1 – предметный столик; 2 – источник ИК-излучения;
3 – дуга с закрепленными на ней устройством регистрации ИК-излучения
и планками для размещения образца; 4 – устройство регистрации
ИК-излучения; 5 – планки для размещения образца

Рисунок 2.5 – Схематическое изображение использованного стенда
(вид спереди)

Исследование взаимодействия электромагнитного излучения ИК-диапазона с образцами экранов выполнялось в соответствии с методикой, включавшей в себя следующие этапы.

1. Регистрация телевизионных изображений поверхности исследуемого образца экрана в течение 60,0 мин в определенные моменты времени (таблица 2.2).

2. Анализ каждого из 23 зарегистрированных тепловизионных изображений с помощью специального программного обеспечения Guide IrAnalyser, поставляемого в комплекте с тепловизионной камерой MobIR M4. Результатами этого анализа были значения средней температуры поверхности образца в каждый из моментов времени, в которые выполнялась регистрация ее телевизионных изображений, а также ее термопрофили.

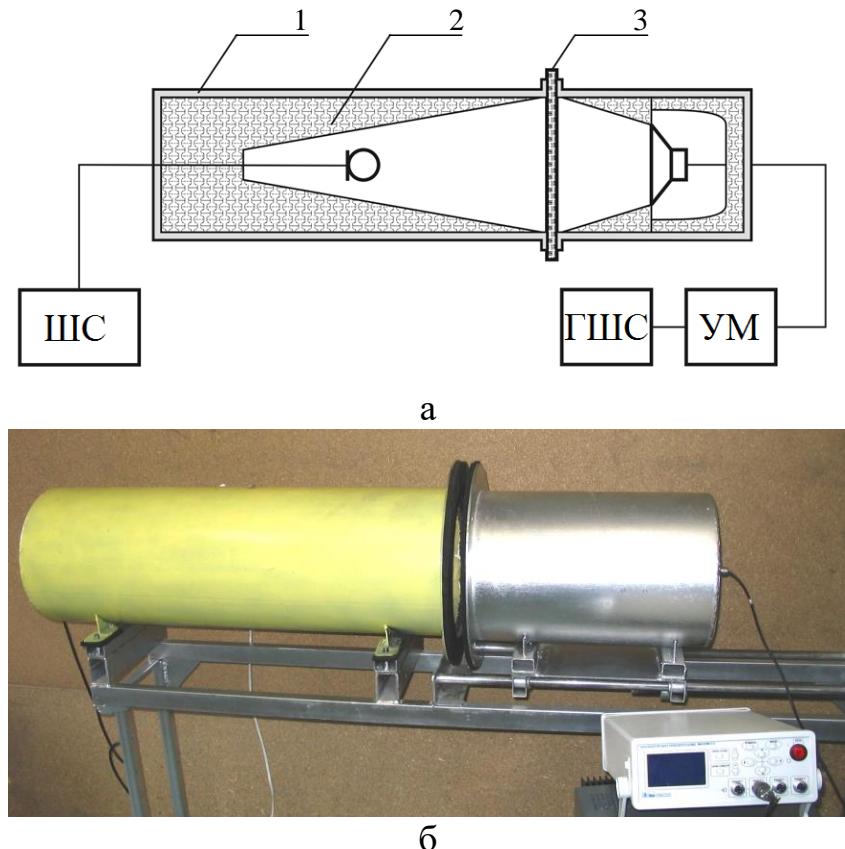
3. Построение графика динамики изменения средней температуры поверхности образца на основе результатов анализа, полученных на этапе 2.

Таблица 2.2 – Порядок регистрации тепловизионных изображений поверхностей образцов при проведении исследований

Номер телевизионного изображения	Момент времени от начала исследований, мин
1	2
1	0,00
2	0,21
3	0,47
4	0,78
5	1,15
6	1,61
7	2,16
8	2,83
9	3,64
10	4,62
11	5,81
12	7,25
13	9,0
14	11,12
15	13,68
16	16,78
17	20,54
18	25,10
19	30,62
20	37,31
21	45,41
22	55,23
23	60,00

2.3 Методика оценки коэффициента звукоизоляции, характерного для образцов электромагнитных экранов

Для оценки коэффициента звукоизоляции, характерного для образцов электромагнитных экранов, была использована экспериментальная установка, схематическое изображение и внешний вид которой представлены на рисунке 2.6.



1 – металлическая труба; 2 – звукопоглощающий материал; 3 – исследуемый образец электромагнитного экрана; ШС – шумомер-спектроанализатор; ГШС – генератор узкополосных шумовых сигналов; УМ – усилитель мощности

Рисунок 2.6 – Схематическое изображение (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки, использованной для измерения амплитуды звуковых волн, прошедших через образец электромагнитного экрана

Металлическая труба, входящая в состав вышепредставленной экспериментальной установки, состоит из двух частей длиной 80,0 и 40,0 см. Толщина стенок частей указанной трубы – 0,6 см, а их внутренний диаметр – 26,0 см. Внешние торцы каждой из частей указанной трубы заварены наглухо. На внутренние торцы каждой из частей указанной трубы наварены круговые фланцы с резиновыми прокладками для фиксации электромагнитного экрана. Внутренние поверхности обеих частей трубы облицованы звукопоглощающим материалом на основе стекловаты. Обе части трубы размещены на металлической станине. Одна часть трубы является стационарной и размещена на виброизолирующих прокладках из резины, а другая – подвижной (оснащена червячной передачей). В подвижной части трубы на резиновых нитях подведен микрофон. В подвижной части трубы установлен динамик [172].

В ходе проведения измерений с использованием вышепредставленной экспериментальной установки использовалось следующее оборудование:

– генератор узкополосных шумовых сигналов в комплексе с усилителем мощности LV 103 и двухдиффузорным динамиком Pioneer TS-G1709, характеризующимся номинальным сопротивлением 4 Ом, пиковой / номинальной мощностью 170/35 Вт и чувствительностью 90 дБ;

– микрофон марки М-101 в комплексе с микрофонным предусилителем ВПМ-101;

– шумомер-спектроанализатор МАНОМ-4.

Порядок оценки коэффициента звукоизоляции, характерного для образцов электромагнитных экранов, с использованием вышеуказанной экспериментальной установки следующий.

1. Запуск генератора узкополосных шумовых сигналов.
2. Регистрация амплитуды звуковых волн, формируемых запущенным генератором узкополосных шумовых сигналов ($ASW_{1,l}$), с помощью шумомера-спектроанализатора и микрофона.
3. Повтор действий по п. 2 не менее 4 раз.
4. Установка исследуемого образца электромагнитного экрана между двумя частями трубы (т. е. между генератором узкополосных шумовых сигналов и шумомером-спектроанализатором).
5. Регистрация амплитуды звуковых волн, прошедших через исследуемый образец электромагнитного экрана ($ASW_{2,l}$), с помощью шумомера-спектроанализатора и микрофона.
6. Повтор действий по п. 5 не менее 4 раз.
7. Расчет среднего значения зарегистрированной амплитуды звуковых волн, формируемых запущенным генератором ($\langle ASW_1 \rangle$), с использованием следующей формулы:

$$\langle ASW_1 \rangle = \frac{\sum_{l=1}^{s_1} ASW_{1,l}}{s_1}, \quad (2.4)$$

где s_1 – количество раз, которое регистрировалась амплитуда звуковых волн, формируемых запущенным генератором узкополосных шумовых сигналов, с помощью шумомера-спектроанализатора и микрофона.

8. Расчет среднего значения зарегистрированной амплитуды звуковых волн, прошедших через исследуемый образец электромагнитного экрана ($\langle ASW_2 \rangle$), с использованием следующей формулы:

$$\langle ASW_2 \rangle = \frac{\sum_{l=1}^{s_2} ASW_{2,l}}{s_2}, \quad (2.5)$$

где s_2 – количество раз, которое регистрировалась амплитуда звуковых волн, прошедших через исследуемый образец электромагнитного экрана, с помощью шумомера-спектроанализатора и микрофона.

9. Расчет коэффициента звукоизоляции (*SIC*), характерного для исследуемого образца электромагнитного экрана, с использованием следующей формулы:

$$SIC = \langle ASW_1 \rangle - \langle ASW_2 \rangle. \quad (2.6)$$

Регистрация амплитуды звуковых волн с помощью шумомера-спектроанализатора и микрофона проводилась на следующих частотах: 125,0 Гц, 250,0 Гц, 500,0 Гц, 1000,0 Гц, 2000,0 Гц, 4000,0 Гц и 8000,0 Гц.

2.4 Методика экспериментального обоснования возможности использования электромагнитных экранов для защиты речевой информации от утечки по прямому акустическому и параметрическому каналам

Для экспериментального обоснования возможности использования электромагнитных экранов для защиты информации от утечки по прямому акустическому и параметрическому каналам была применена методика, основанная на использовании аппаратно-программного комплекса «Локатор для обнаружения устройств ЛВ-2Р» (далее – комплекс; производитель – БГУИР, Республика Беларусь). Комплекс предназначен для выявления приемопередающих устройств специальных технических средств, предназначенных для негласного получения информации, по резонансным явлениям в их антенных системах и в сопутствующих фильтрующих элементах. Комплекс включает в себя следующие устройства:

- автономный генераторно-приемный блок;
- антенна широкополосная приемо-передающая АШ 0,3–3;
- комплект комбинированный, в состав которого входят адаптер питания, кабель питания от сети переменного тока 220 В, кабель соединительный, стереонаушники, кабель USB;
- персональный компьютер, на котором установлено специальное программное обеспечение для детальной обработки информации;
- комплект из пяти имитаторов специальных технических средств, предназначенных для негласного получения информации, каждый из которых отличается определенной рабочей частотой, соответствующей либо частоте сигналов, используемых для передачи данных в системах сотовой связи, либо частоте GPS-сигналов, либо частоте, относящейся к ISM-диапазону (имитатор № 1 – 434 МГц, имитатор № 2 – 900 МГц, имитатор № 3 – 1880 МГц, имитатор № 4 – 1575 МГц, имитатор № 5 – 2,45 ГГц); в конструкцию каждого из имитаторов входят компоненты беспроводных систем: микросхема приемопередатчика, фильтры, антенна.

Автономный генераторно-приемный блок комплекса обеспечивает генерацию зондирующих сигналов и обработку принимаемых переизлученных сигналов в заданном диапазоне частот в режиме реального

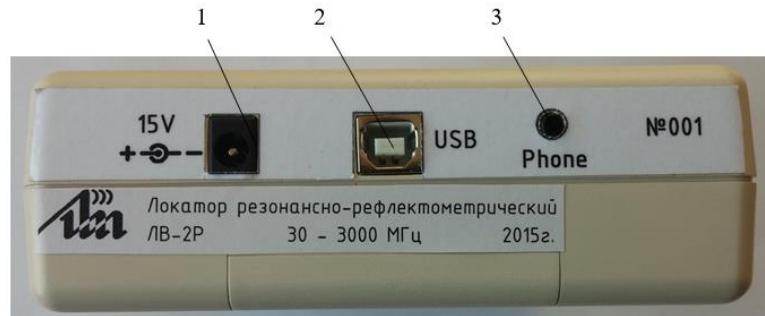
времени. Тип генерируемых рассматриваемым блоком сигналов – перестраиваемые по частоте гармонические короткие радиоимпульсы [173].

Внешний вид автономного генераторно-приемного блока комплекса представлен на рисунках 2.7, 2.8.



1 – разъем типа SMA для подключения приемо-передающей антенны;
2 – дисплей; 3 – клавиатура; 4 – динамик; 5 – индикатор питания

Рисунок 2.7 – Внешний вид спереди автономного генераторно-приемного блока комплекса



1 – разъем для подключения внешнего источника питания;
2 – разъем USB для подключения к персональному компьютеру;
3 – разъем mini Jack Ø3,5 мм для подключения стереонаушников

Рисунок 2.8 – Внешний вид сзади автономного генераторно-приемного блока комплекса

Внешний вид диалогового окна специального программного обеспечения для детальной обработки информации, установленного на персональном компьютере, представлен на рисунке 2.9.

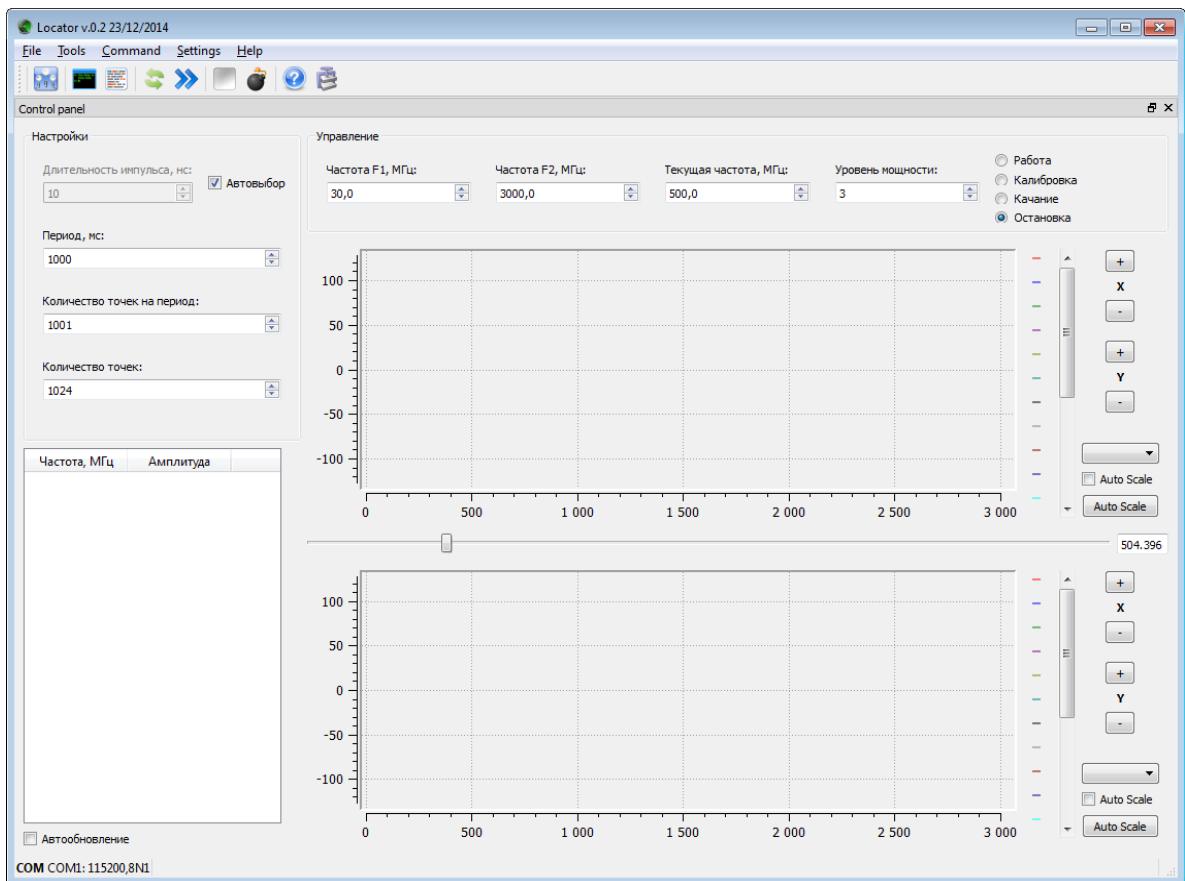


Рисунок 2.9 – Внешний вид диалогового окна программы специального программного обеспечения для детальной обработки информации

Внешний вид имитаторов специальных технических средств, предназначенных для негласного получения информации, представлен на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Внешний вид имитаторов специальных технических средств, предназначенных для негласного получения информации, использованных в ходе проведения экспериментального обоснования

Примененная для экспериментального обоснования методика включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Соединение устройств комплекса в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.11.

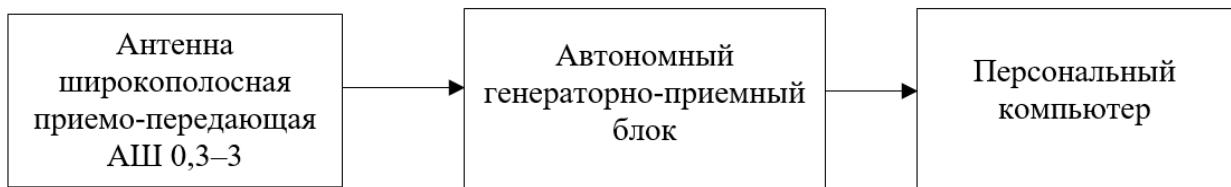


Рисунок 2.11 – Схема соединения устройств комплекса

Шаг 2. Размещение одного из имитаторов специальных технических средств, предназначенных для негласного получения информации, на расстоянии 0,5 м от приемо-передающей антенны.

Шаг 3. Запуск автономного генераторно-приемного блока и специального программного обеспечения для детальной обработки информации, установленного на персональном компьютере, с целью формирования коротких радиоимпульсов.

Шаг 4. Воздействие короткими радиоимпульсами на имитатор специального технического средства, предназначенного для негласного получения информации.

Шаг 5. Регистрация с помощью автономного генераторно-приемного блока комплекса, подключенной к нему антены широкополосной приемо-передающей и специального программного обеспечения для детальной обработки информации, установленного на персональном компьютере, сигнала, переизлученного имитатором специального технического средства, предназначенного для негласного получения информации, вследствие воздействия на этот имитатор короткими радиоимпульсами.

Шаг 6. Размещение исследуемого образца электромагнитного экрана поверх имитатора специального технического средства, предназначенного для негласного получения информации.

Шаг 7. Повторная реализация шагов 4, 5.

Шаг 8. Сравнительный анализ данных, полученных в результате реализации шагов 4–7.

ГЛАВА 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ФОЛЬГИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ

Как было отмечено в п. 1.3.2, в целях обеспечения дополнительного снижения величины коэффициента отражения ЭМИ электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, характеризующихся слоистой структурой, выполняется упорядоченное размещение на поверхности их наружного слоя объемных элементов, полученных на основе электропроводящих материалов. Дополнительное снижение величины коэффициента отражения ЭМИ электромагнитных экранов СВЧ-диапазона при использовании такого подхода обуславливается тем, что указанные элементы обеспечивают рассеяние и многократное переотражение взаимодействующего с ними излучения [174]. Как было показано в п. 1.3.2, современные технологии получения объемных элементов для закрепления на поверхности наружного слоя электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, характеризующихся слоистой структурой, основаны на методе 3D-печати или на методе формования смесей связующего вещества и электропроводящего наполнителя. Большая часть таких элементов характеризуется высокой массой, что обуславливает соответствующую характеристику экранов, на поверхностях которых закреплены эти элементы. Выполнено экспериментальное обоснование перспективности использования объемных элементов, сформированных из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, для закрепления на поверхностях электромагнитных экранов СВЧ-диапазона в целях обеспечения снижения величины коэффициента отражения ЭМИ таких экранов.

Такие элементы представляли собой одно из нижеследующего:

- объемные элементы в виде классических спиралей Архимеда;
- объемные петлевидные элементы;
- объемные элементы в виде лент Мебиуса.

3.1 Характеристики пленки с закрепленными на ее поверхности объемными элементами в виде классических спиралей Архимеда

Проведены исследования, направленные на установление закономерностей изменения характеристик поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с закрепленными на ее поверхности объемными элементами в виде классических спиралей Архимеда (далее по тексту – спиралевидных элементов) в зависимости от диаметра таких элементов. В ходе проведения исследования использовались результаты анализа параметров антенны в виде спирали Архимеда, представленные в работе [175]. На основе этих результатов было установлено, что в обозначенной антенне наибольшие потери энергии ЭМИ

СВЧ-диапазона наблюдаются при выполнении совокупности следующих условий:

– длина наименьшего витка пропорционально сопоставима с длиной электромагнитной волны (минимальным значением длины электромагнитной волны) на рабочей частоте (в рабочем диапазоне частот) антенны;

– значение диаметра поперечного сечения проводника, на основе которого изготовлена антенна (D_c), и расстояния между ее витками (S) (рисунок 3.1) связаны следующим соотношением:

$$\frac{D_c}{D_c + S} = 0,167. \quad (3.1)$$

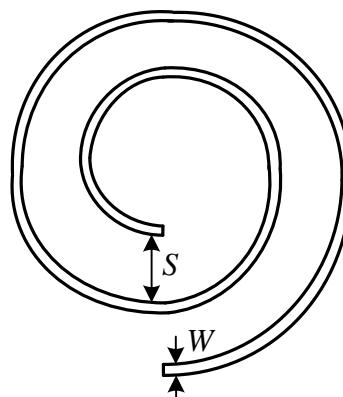


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение спиралевидного элемента с обозначением его параметров

Для проведения исследования было выполнено следующее.

1. Изготовление группы образцов в виде фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с закрепленными на их поверхностях объемными спиралевидными элементами.

2. Оценка значений коэффициента поглощения ЭМИ изготовленной группы образцов.

В ходе изготовления образцов, относившихся к одной группе, последовательно реализовывались следующие операции.

1. Откраивание от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки одинаковых фрагментов с учетом следующих требований:

– длина (L_f) и ширина (W_f) каждого фрагмента пленки должны быть не менее длины и ширины раскрыта рупора антенны типа П6-23М, входящей в состав системы для измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов экранов (см. раздел 2.1);

– количество фрагментов должно быть эквивалентно количеству образцов в группе.

2. Выбор шага расположения объемных спиралевидных элементов (s_e) с учетом условия (1.11) (в качестве λ_r принималось значение длины электромагнитной волны на средней частоте в диапазоне частот, в котором

проводилась оценка значений коэффициента поглощения ЭМИ образцов экранов).

3. Выбор толщины и расстояния между витками объемных спиралевидных элементов с учетом условия (3.1).

4. Выбор диаметра объемных спиралевидных элементов (D_e) с учетом результатов реализации операции 3.

5. Определение количества объемных спиралевидных элементов (n_e) на основе следующей формулы:

$$n_e = \text{int}\left(\frac{L_f}{D_e + s_e}\right) \text{int}\left(\frac{W_f}{D_e + s_e}\right), \quad (3.2)$$

где $\text{int}()$ – функция, значение которой является целой частью от ее аргумента.

6. Откраивание от рулона алюминиевой фольги одинаковых фрагментов прямоугольной формы для формирования объемных спиралевидных элементов с учетом следующих условий:

– длина и ширина каждого фрагмента должны быть такими, чтобы на его основе можно было сформировать объемный спиралевидный элемент с диаметром, выбранным в результате реализации операции 4, и толщиной, выбранной в результате реализации операции 3;

– количество фрагментов должно быть эквивалентно n_e , рассчитанному в результате реализации операции 5 по формуле (3.2).

7. Формирование одинаковых объемных спиралевидных элементов из фрагментов алюминиевой фольги, полученных в результате реализации операции 6, (рисунок 3.2) с использованием пластины-трафарета, содержащей углубления, форма которых повторяет форму классической спирали Архимеда.



Рисунок 3.2 – Внешний вид объемного спиралевидного элемента, сформированного из фрагмента алюминиевой фольги

8. Клеевое закрепление сформированных спиралевидных элементов, полученных в результате реализации операции 7, с шагом, выбранным в результате реализации операции 2, на поверхностях фрагментов

алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, откроенных в результате реализации операции 1.

Обозначенным путем были изготовлены три группы образцов. Образцы каждой из групп отличались диаметром объемных спиралевидных элементов, использованных для их изготовления. Шаг расположения указанных элементов составлял 1,0 см. Кроме того, была изготовлена одна группа образцов в виде одинаковых фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, длина и ширина которых были эквиваленты длине и ширине образцов, изготовленных обозначенным путем. В таблице 3.1 представлены характеристики изготовленных образцов каждой из групп. Было изготовлено по 10 образцов каждой из групп.

Таблица 3.1 – Характеристики изготовленных образцов каждой из групп

Условное обозначение группы образцов	Диаметр объемных спиралевидных элементов, использованных для изготовления образцов, см
Образцы группы 1.1*	–
Образцы группы 1.2	6,0
Образцы группы 1.3	9,0
Образцы группы 1.4	12,0

*Образцы представляли собой одинаковые фрагменты алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 представлены на рисунке 3.3.

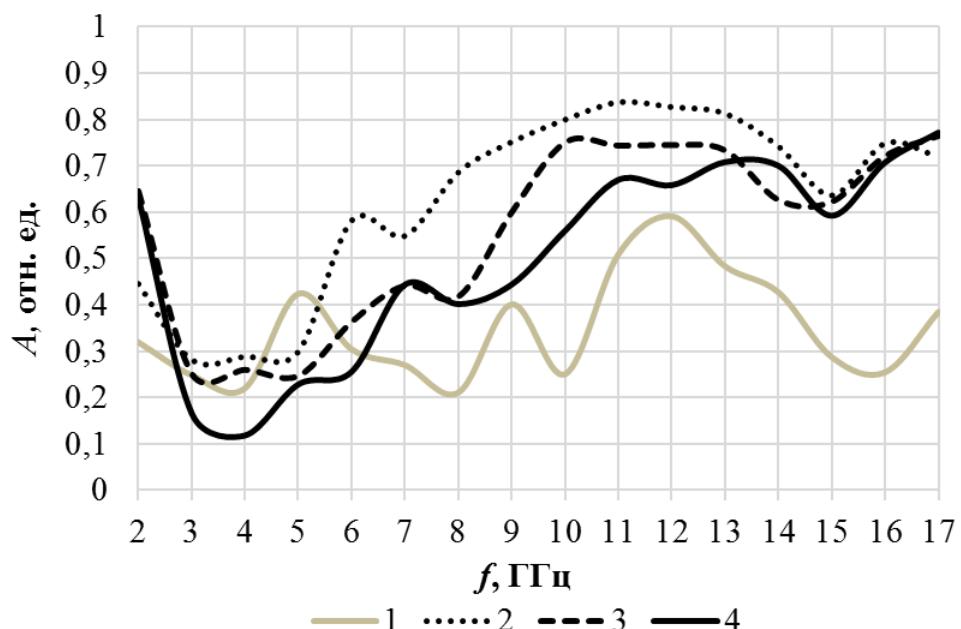


Рисунок 3.3 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов групп 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Из рисунка 3.3 следует, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц образцов группы 1.1 изменяются в пределах от 0,3 отн. ед. до 0,59 отн. ед., а образцов групп 1.2, 1.3 и 1.4 –

соответственно в пределах от 0,28 отн. ед. до 0,84 отн. ед., от 0,25 отн. ед. до 0,75 отн. ед. и от 0,12 отн. ед. до 0,75 отн. ед. Характеристики образцов групп 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики образцов групп 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4

Условное обозначение группы образцов	ЭПП ЭМИ	Ширина ЭПП ЭМИ, ГГц	Ширина ЭПП ЭМИ, %	Значения коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП
Образцы группы 1.1	11,0–13,0 ГГц	2,0	16,7	0,5–0,59 отн. ед.
Образцы группы 1.2	5,5–17,0 ГГц	11,5	102,2	0,5–0,84 отн. ед.
Образцы группы 1.3	8,5–17,0 ГГц	8,5	66,7	
Образцы группы 1.4	9,5–17,0 ГГц	7,5	56,6	0,5–0,75 отн. ед.

Образцы группы 1.2 по сравнению с образцами групп 1.3 и 1.4 характеризуются более высокими значениями коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 5,5–17,0 ГГц в связи с тем, что значения их коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот ниже (рисунок 3.4).

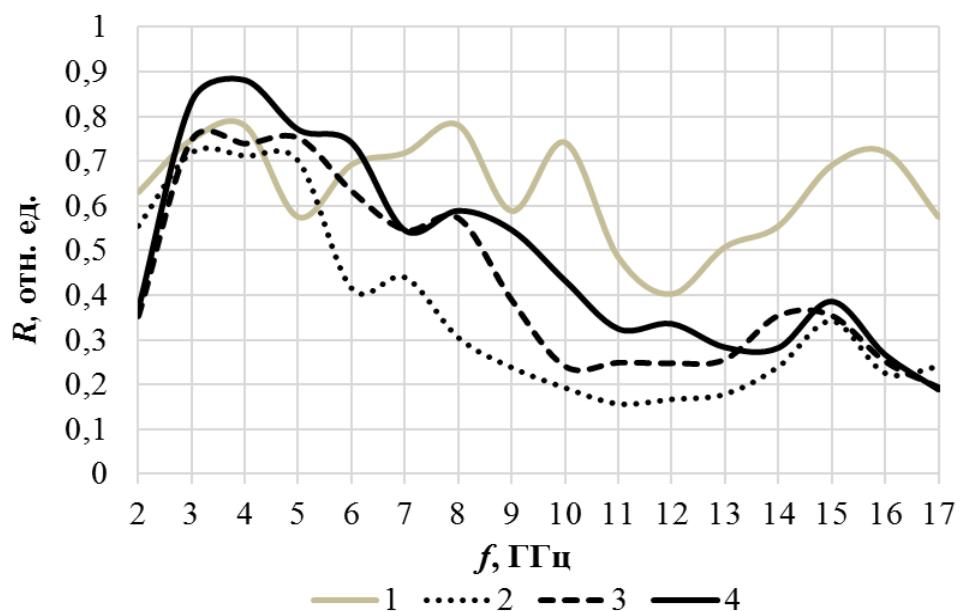


Рисунок 3.4 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов групп 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Таким образом, из рисунков 3.3, 3.4 и таблицы 3.2 следует, что в результате модификации алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки путем закрепления на ее поверхности с шагом 1,0 см объемных

элементов в виде классических спиралей Архимеда, сформированных из алюминиевой фольги, можно обеспечить увеличение 0,2–0,59 отн. ед. до 0,28–0,84 отн. ед. значений ее коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц и с 2,0 ГГц до 11,5 ГГц ширины ее ЭПП ЭМИ, что обусловлено снижением с 0,4–0,78 отн. ед. до 0,15–0,71 отн. ед. значений ее коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот.

3.2 Характеристики пленки с закрепленными на ее поверхности объемными петлевидными элементами

Проведены исследования, направленные на установление закономерностей изменения характеристик поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с закрепленными на ее поверхности объемными петлевидными элементами в зависимости от ширины таких элементов.

Для проведения исследования было выполнено следующее.

1. Изготовление групп образцов в виде фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с закрепленными на их поверхностях объемными петлевидными элементами.

2. Оценка значений коэффициента поглощения ЭМИ изготовленных образцов каждой из групп.

В ходе изготовления образцов, относившихся к одной группе, последовательно реализовывались следующие операции.

1. Откраивание от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки одинаковых фрагментов с учетом следующих требований:

– длина и ширина (W_f) каждого фрагмента пленки должны быть не менее длины и ширины раскрыта рупора антенны типа П6-23М, входящей в состав системы для измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов экранов (см. раздел 2.1);

– количество фрагментов должно быть эквивалентно количеству образцов одной группы.

2. Откраивание от рулона фольгированной полимерной пленки одинаковых фрагментов с учетом следующих условий:

– длина фрагментов равна длине фрагментов пленки, откроенных в результате реализации операции 1;

– ширина фрагментов (W_{lf}) – не более двух длин электромагнитной волны на средней частоте диапазона частот, в котором необходимо проводить оценку значений коэффициента поглощения ЭМИ образцов экранов;

– количество фрагментов (n_f) должно быть рассчитано на основе следующей формулы:

$$n_f = \frac{2W_f}{W_{lf}}. \quad (3.3)$$

3. Клеевое соединение двух противоположных краев большего размера у каждого из фрагментов, полученных в результате реализации операции 2 (рисунок 3.5).

4. Надрезание каждого из элементов, полученных в результате реализации операции 2, с помощью измельчителя для бумаги с учетом следующих условий:

– шаг расположения надрезов должен быть одинаковым;

– шаг расположения надрезов должен быть не более четверти от длины электромагнитной волны на средней частоте диапазона частот, в котором необходимо проводить оценку значений коэффициента поглощения ЭМИ образцов экранов (рисунок 3.6).

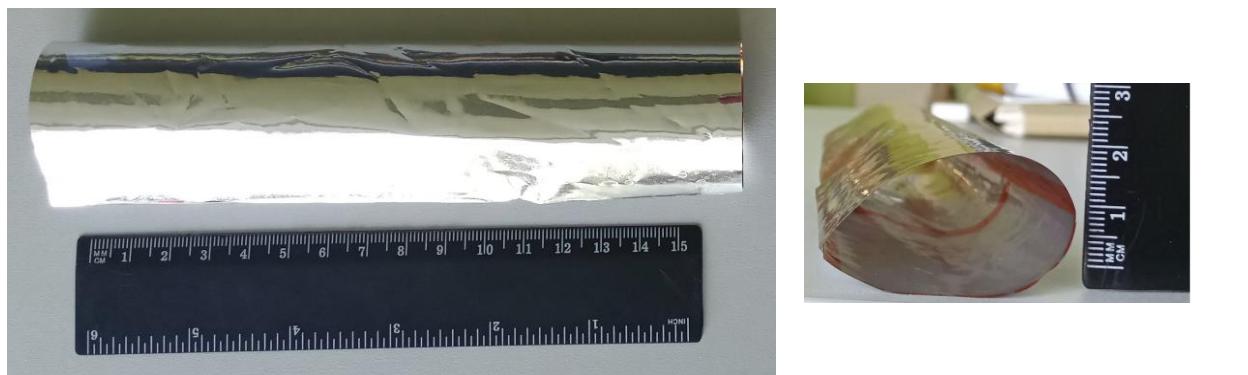


Рисунок 3.5 – Внешний вид сверху (а) и сбоку (б) элемента, полученного в результате реализации операции 3

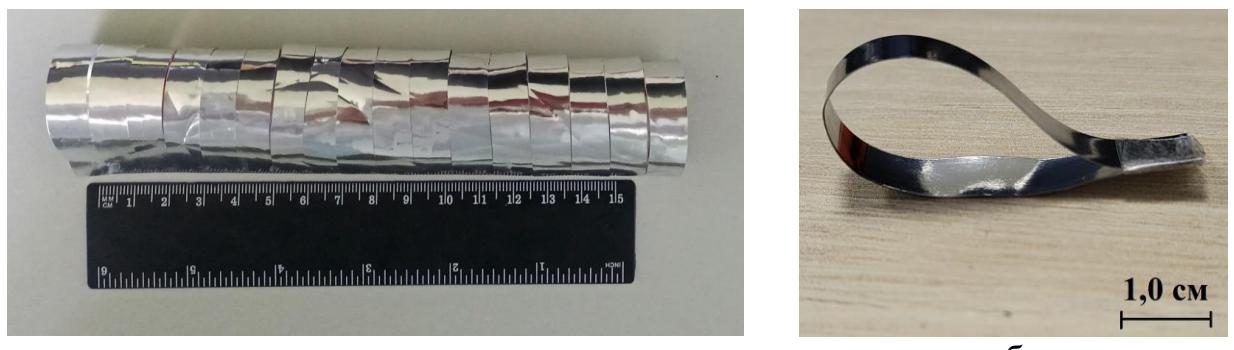


Рисунок 3.6 – Внешний вид сверху группы объемных петлевидных элементов, полученных в результате реализации операции 4 (а) и отдельного объемного петлевидного элемента (б)

5. Закрепление групп объемных петлевидных элементов, полученных в результате реализации операции 3, на поверхностях фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, откроенных в результате реализации операции 1.

Обозначенным путем были изготовлены три группы образцов. Образцы каждой из групп отличались шириной объемных петлевидных элементов, использованных для их изготовления. Кроме того, была изготовлена одна

группа образцов в виде одинаковых фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, длина и ширина которых были эквиваленты длине и ширине образцов, изготовленных обозначенным путем. В таблице 3.3 представлены характеристики изготовленных образцов каждой из групп. Было изготовлено по 10 образцов каждой из групп.

Таблица 3.3 – Характеристики изготовленных образцов каждой из групп

Условное обозначение группы образцов	Ширина объемных петлевидных элементов, использованных для изготовления образцов, см
Образцы группы 2.1*	–
Образцы группы 2.2	0,3
Образцы группы 2.3	0,6
Образцы группы 2.4	0,9

*образцы представляли собой одинаковые фрагменты алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов групп 2.1, 2.2, 2.3 и 2.4 представлены на рисунке 3.7.

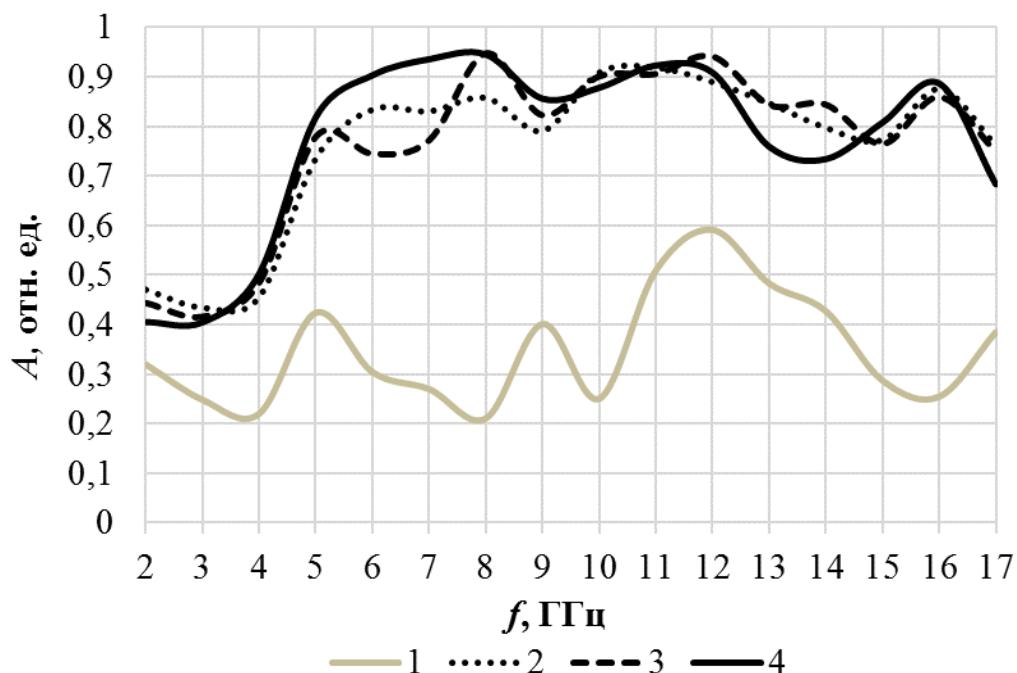


Рисунок 3.7 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов групп 2.1, 2.2, 2.3 и 2.4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Из рисунка 3.3 следует, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц образцов группы 2.1 изменяются в пределах от 0,2 отн. ед. до 0,6 отн. ед., а образцов групп 2.2, 2.3 и 2.4 – в пределах от 0,4 отн. ед. до 0,95 отн. ед.

Образцы групп 2.2, 2.3 и 2.4 обеспечивают поглощение энергии взаимодействующих с ними электромагнитных волн за счет механизма многоократного переотражения последних, возникающего при их

распространении как внутри объемных петлевидных элементов, так и между ними (волны многократно переотражаются от внутренних поверхностей элементов и между ними – см. рисунок 3.8). Этот механизм возникает из-за большой разницы между волновым сопротивлением воздуха, находящегося внутри объемных петлевидных элементов, и алюминийсодержащего фольгированного полимерного материала, на основе которого сформированы эти элементы.

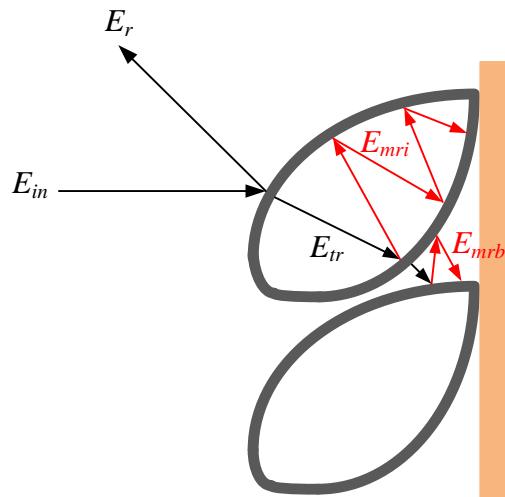


Рисунок 3.8 – Схематическая иллюстрация взаимодействия электромагнитной волны с рассматриваемыми экспериментальными образцами (E_{in} – падающая волна; E_r – отраженная волна; E_{tr} – прошедшая волна; E_{mri} – волны, многократно переотраженные от внутренних поверхностей объемных петлевидных элементов; E_{mrb} – волны, многократно переотраженные между объемными петлевидными элементами)

Характеристики образцов групп 2.1, 2.2, 2.3 и 2.4 представлены в таблице 3.4.

Следует отметить, что образцы группы 2.4 характеризуются более высокими значениями коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 4,0–8,0 ГГц по сравнению с образцами групп 2.2 и 2.3. Это обусловлено тем, что значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот образцов группы 2.4 ниже, чем образцов групп 2.2 и 2.3 (рисунок 3.9).

Таблица 3.4 – Характеристики образцов групп 2.1, 2.2, 2.3 и 2.4

Условное обозначение группы образцов	ЭПП ЭМИ	Ширина ЭПП ЭМИ, ГГц	Ширина ЭПП ЭМИ, %	Значения коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП
Образцы группы 2.1	11,0–13,0 ГГц	2,0	16,7	0,5–0,59 отн. ед.
Образцы группы 2.2				0,5–0,91 отн. ед.
Образцы группы 2.3	4,0–17,0 ГГц	13,0	123,8	
Образцы группы 2.4				0,5–0,95 отн. ед.

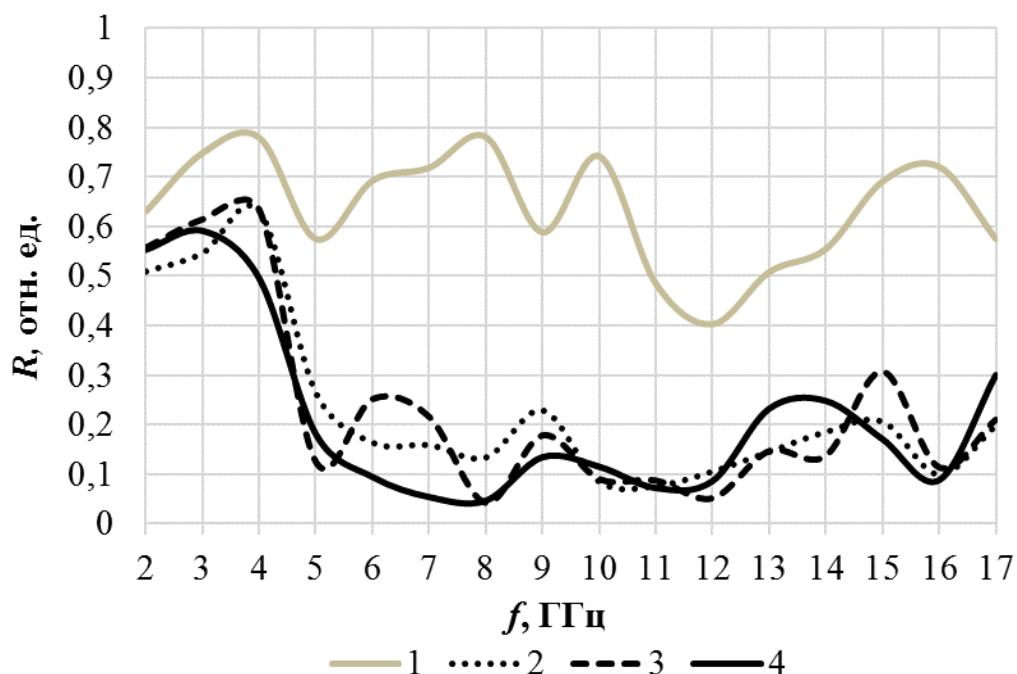


Рисунок 3.9 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов групп 2.1, 2.2, 2.3 и 2.4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Более низкие значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 4,0–8,0 ГГц образцов группы 2.4 по сравнению с образцами групп 2.2 и 2.3 могут быть обусловлены следующим.

1. Часть электромагнитных волн, характеризующихся частотами из указанного диапазона и рассеиваемых объемными петлевидными элементами, содержащимися в рассматриваемых образцах, имеет ту же фазу, что и электромагнитные волны, отражаемые от фрагмента алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, на которых закреплены эти элементы.

2. Амплитуда обозначенной в п. 1 части электромагнитных волн, взаимодействующих с образцами групп 2.2 и 2.3, выше, чем амплитуда аналогичной части электромагнитных волн, взаимодействующих с образцами группы 2.4.

Таким образом, в результате модификации алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки путем закрепления на ее поверхности групп объемных петлевидных элементов шириной 0,3–0,9 см, сформированных из аналогичной пленки, можно обеспечить увеличение с 0,2–0,59 отн. ед. до 0,5–0,95 отн. ед. значений ее коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 4,0–17,0 ГГц и с 2,0 ГГц до 13,0 ГГц ширины ее эффективной полосы поглощения ЭМИ, что обусловлено снижением с 0,38–0,78 отн. ед. до 0,04–0,48 отн. ед. значений ее коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот.

3.3 Характеристики пленки с закрепленными на ее поверхности объемными элементами в виде лент Мебиуса

В работах [176, 177] представлены результаты теоретического обоснования перспективности использования объемных элементов в виде лент Мебиуса в различных отраслях, связанных с разработкой материалов и антенных систем. В связи с этим были проведены исследования, направленные на установление закономерностей изменения характеристик поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с закрепленными на ее поверхности объемными элементами в виде лент Мебиуса в зависимости от шага закрепления таких элементов.

Для проведения исследования было выполнено следующее.

1. Изготовление групп образцов в виде фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с закрепленными на их поверхностях объемными элементами в виде лент Мебиуса.

2. Оценка значений коэффициента поглощения ЭМИ изготовленных образцов каждой из групп.

В ходе изготовления образцов, относившихся к одной группе, последовательно реализовывались следующие операции.

1. Откраивание от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки одинаковых фрагментов *с учетом следующих условий:*

– длина (L_f) и ширина (W_f) *каждого фрагмента пленки должны быть не менее длины и ширины раскрыта рупора антенны типа П6-23М, входящей в состав системы для измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов экранов* (см. раздел 2.1);

– количество фрагментов должно быть эквивалентно количеству образцов одной группы.

2. Выбор шага закрепления объемных элементов в виде лент Мебиуса (s_e) *с учетом условия (1.11) (в качестве λ_r принималось значение длины электромагнитной волны на средней частоте в диапазоне частот, в котором*

проводилась оценка значений коэффициента поглощения ЭМИ образцов экранов).

3. Откраивание от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки одинаковых фрагментов для формирования объемных элементов в виде лент Мебиуса с учетом следующих условий:

1) длина каждого фрагмента пленки (L_{ff}) – не более двух длин электромагнитной волны на средней частоте диапазона частот, в котором необходимо проводить оценку значений коэффициента поглощения ЭМИ образцов экранов;

2) ширина каждого фрагмента пленки (W_{ff}) – не менее пяти сотых от длины волны на средней частоте диапазона частот, в котором необходимо проводить оценку значений коэффициента поглощения ЭМИ образцов экранов, но не более четверти от длины такой волны;

3) количество фрагментов (n_f) должно быть должно быть рассчитано на основе следующей формулы:

$$n_f = \text{int}\left(\frac{2L_f}{L_{ff} + 2s_e}\right) \text{int}\left(\frac{W_f}{W_{ff} + s_e}\right), \quad (4.4)$$

где $\text{int}()$ – функция, значение которой является целой частью от ее аргумента.

Первое из обозначенных условий было основано на результатах исследования, представленных в работе [178]. Это условие было учтено в целях обеспечения расширения ЭПП экранов на основе объемных элементов в виде лент Мебиуса.

Второе из обозначенных условий было основано на результатах исследования, представленных в работе [6]. Это условие было учтено в целях обеспечения минимизации степени зависимости значений границ ЭПП экранов на основе объемных элементов в виде лент Мебиуса от угла падения и поляризации ЭМИ.

4. Формирование объемных элементов в виде лент Мебиуса из фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, откроенных в ходе реализации операции 2 (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Внешний вид объемного элемента в виде ленты Мебиуса, сформированного из фрагмента алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

5. Закрепление с одинаковым шагом, выбранным в ходе реализации операции 2, объемных элементов в виде лент Мебиуса, сформированных

в ходе реализации операций 3 и 4, на поверхностях фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, откроенных в ходе реализации операции 1, с учетом того, что указанные элементы должны быть расположены по отношению к поверхностям фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки под углом 45° . В работе [177] показано, что при такой ориентации элементов в виде лент Мёбиуса потери на рассеяние и поглощение энергии электромагнитных волн, взаимодействующих с ними, являются максимальными.

Обозначенным путем были изготовлены три группы образцов. Образцы каждой из групп отличались расстоянием между закрепленными на их поверхностях объемными элементами в виде лент Мёбиуса. Кроме того, была изготовлена одна группа образцов в виде одинаковых фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, длина и ширина которых были эквивалентны длине и ширине образцов, изготовленных обозначенным путем. В таблице 3.5 представлены характеристики изготовленных образцов каждой из групп. Было изготовлено по 10 образцов каждой из групп.

Таблица 3.5 – Характеристики изготовленных образцов каждой из групп

Условное обозначение группы образцов	Расстояние между объемными элементами в виде лент Мёбиуса, использованными для изготовления образцов см
Образцы группы 3.1*	–
Образцы группы 3.2	0,5
Образцы группы 3.3	1,0
Образцы группы 3.4	1,5

*Образцы представляли собой одинаковые фрагменты алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов групп 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 представлены на рисунке 3.11.

Из рисунка 3.11 следует, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц образцов групп 3.2, 3.3 и 3.4 изменяются соответственно в следующих пределах: 0,45–0,9 отн. ед., 0,6–0,95 отн. ед., 0,62–0,95 отн. ед. Характеристики образцов групп 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 представлены в таблице 3.6.

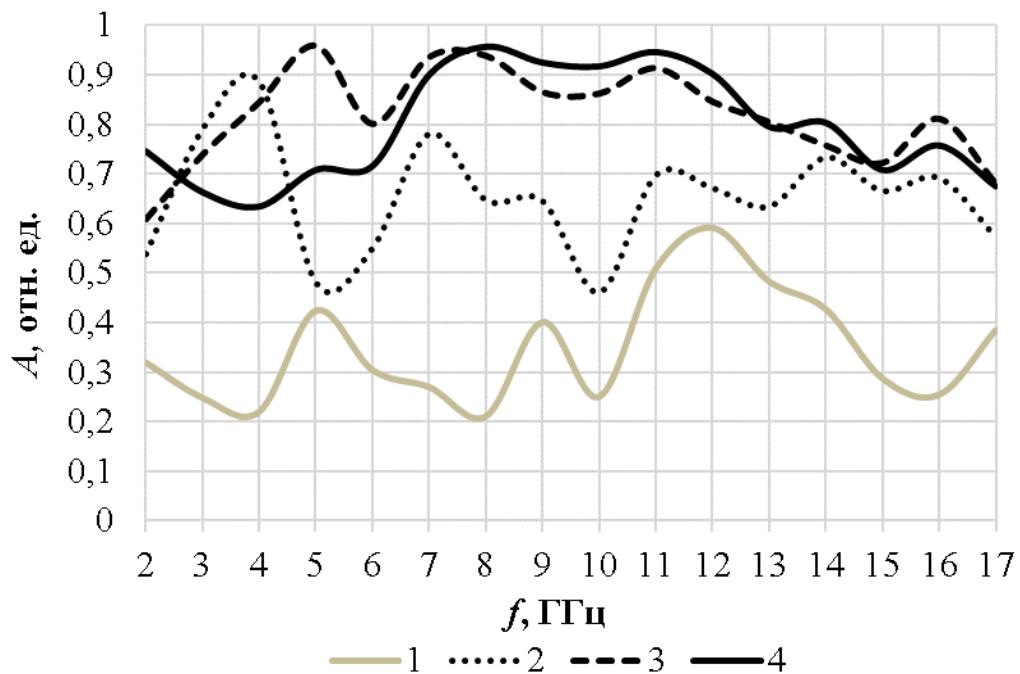


Рисунок 3.11 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов групп 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Таблица 3.6 – Характеристики образцов групп 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4

Условное обозначение группы образцов	ЭПП ЭМИ	Ширина ЭПП ЭМИ, ГГц	Ширина ЭПП ЭМИ, %	Значения коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП
Образцы группы 3.1	11,0–13,0 ГГц	2,0	16,7	0,5–0,59 отн. ед.
Образцы группы 3.2	2,0–5,0 ГГц 5,8–9,5 ГГц 10,2–17,0 ГГц	3,0 3,7 6,8	85,7 48,4 50,0	0,52–0,9 отн. ед. 0,5–0,78 отн. ед. 0,5–0,73 отн. ед.
Образцы группы 3.3	2,0–17,0 ГГц	15,0	157,9	0,6–0,95 отн. ед.
Образцы группы 3.4	2,0–17,0 ГГц	15,0	157,9	0,62–0,95 отн. ед.

Образцы групп 3.3 и 3.4 по сравнению с образцами группы 3.2 характеризуются более высокими значениями коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 4,5–17,0 ГГц в связи с тем, что значения их коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот ниже (рисунок 3.12).

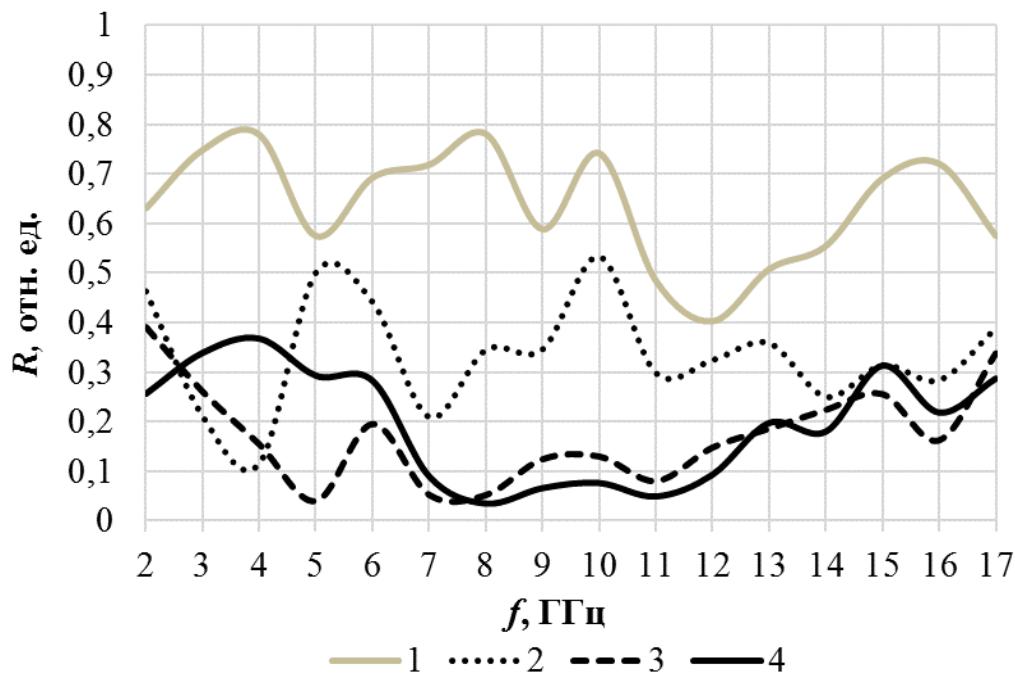


Рисунок 3.12 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов групп 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Таким образом, из рисунков 3.11, 3.12 и таблицы 3.6 следует, что в результате модификации алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки путем закрепления на ее поверхности с шагом 1,0–1,5 см объемных элементов в виде лент Мёбиуса, сформированных из аналогичной пленки, можно обеспечить увеличение 0,2–0,59 отн. ед. до соответственно 0,6–0,95 отн. ед. значений ее коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц и с 2,0 ГГц до 15,0 ГГц ширины ее ЭПП ЭМИ, что обусловлено снижением с 0,4–0,78 отн. ед. до 0,04–0,38 отн. ед. значений ее коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот.

3.4 Характеристики пленки с механически обработанной поверхностью

В работах [179, 180] представлены результаты теоретического обоснования гипотезы о том, что явления рассеяния и многократного переотражения ЭМИ СВЧ-диапазона наблюдаются при взаимодействии такого излучения не только с материалами, размеры неровностей (т. е. объемных элементов) поверхностей которых сопоставимы с длиной электромагнитных волн в указанном диапазоне частот, но и с материалами, размер неровностей поверхностей которых значительно меньше длины таких волн. Для экспериментального подтверждения этой гипотезы было выполнено следующее.

1. Изготовление групп образцов на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью, отличающихся средним размером неровностей последней.

2. Оценка среднего размера неровностей поверхностей изготовленных образцов каждой из групп.

3. Оценка значений коэффициента поглощения ЭМИ изготовленных образцов каждой из групп.

В ходе изготовления образцов, относившихся к одной группе, последовательно реализовывались следующие операции.

1. Откраивание от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки одинаковых фрагментов с учетом следующих требований:

1) длина и ширина каждого фрагмента пленки должны быть не менее длины и ширины раскрыва рупора антенны типа П6-23М, входившей в состав системы, использованной для измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов экранов (см. раздел 2.1);

2) количество фрагментов было эквивалентно количеству образцов одной группы.

2. При необходимости механическая обработка одной из поверхностей каждого из фрагментов, откроенных в ходе реализации операции 1, с использованием шлифовальной бумаги, характеризующейся определенным размером и плотностью распределения зерен.

Обозначенным путем были изготовлены четыре группы образцов. В таблице 3.7 представлены характеристики шлифовальной бумаги, использованной в ходе изготовления образцов каждой из групп.

Таблица 3.7 – Характеристики шлифовальной бумаги, использованной для изготовления образцов каждой из групп

Условное обозначение группы образцов	Размер зерен шлифовальной бумаги, использованный в ходе изготовления группы образцов, мкм [181]
Образцы группы 4.1*	–
Образцы группы 4.2	75,0–90,0
Образцы группы 4.3	28,0–40,0
Образцы группы 4.4	14,0–20,0

*образцы представляли собой фрагменты алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, поверхности которых не были механически обработаны

Было изготовлено по 10 образцов каждой из групп. Среднее значение размера неровностей поверхностей (s_{av}) изготовленных образцов каждой из групп определялось следующим образом.

1. Измерение размера неровностей в 100 точках поверхности каждого из образцов с помощью фотоэлектрического окулярного микрометра ФОМ-2-16 и оптического микроскопа металлографического агрегатного МЕТАМ-Р1

(точки поверхности, в которой проводились измерения размера неровностей, располагались с одинаковым шагом).

2. Расчет s_{av} в соответствии со следующей формулой:

$$s_{av} = \frac{\sum_{j=1}^{10} \frac{\sum_{i=1}^{100} s_{ij}}{100}}{10}, \text{ мкм}, \quad (3.5)$$

где s_{ij} – размер неровности в определенной точке поверхности образца определенного типа;

i – порядковый номер точки поверхности образца определенного типа, в которой проводится измерение размера неровности поверхности этой поверхности, $i \in [1; 100], i \in Z$;

j – порядковый номер образца определенного типа, $j \in [1; 100], j \in Z$.

Фотографии и микрофотографии фрагментов поверхности образцов групп 7.2, 7.3 и 7.4, полученные в ходе определения размера неровностей их поверхности, представлены на рисунках 3.13–3.15.

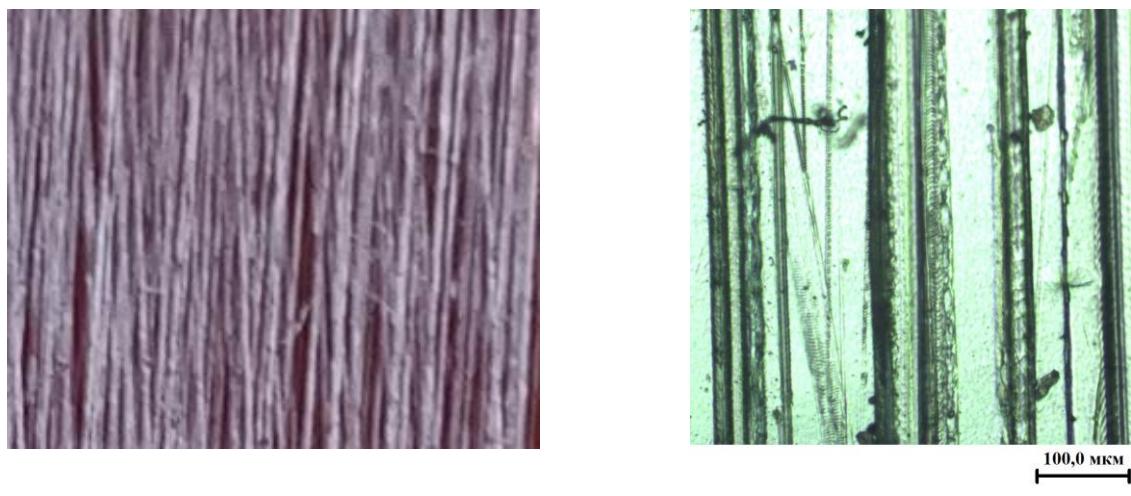


Рисунок 3.13 – Фотография, x5 (а) и микрофотография, x100, (б) поверхности образца группы 4.2

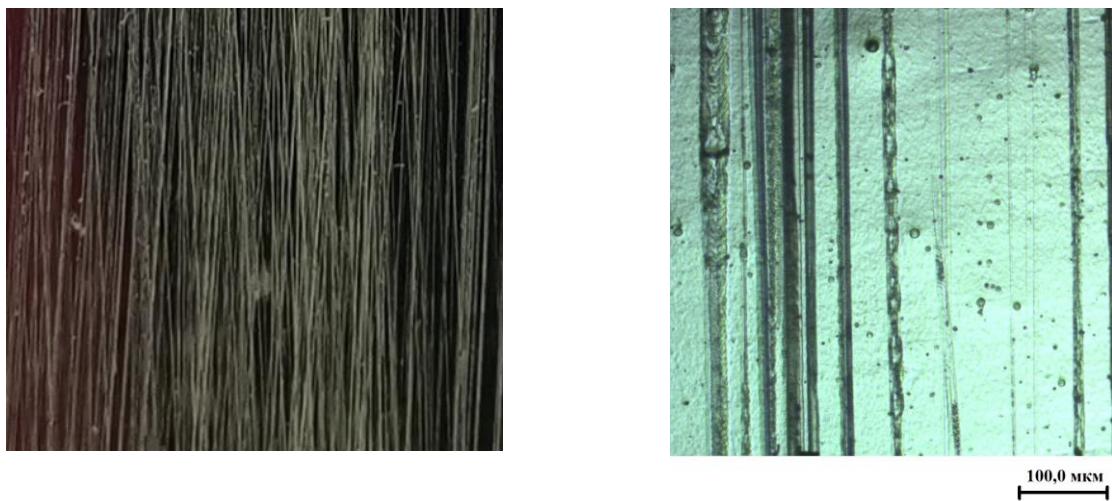


Рисунок 3.14 – Фотография, x5 (a) и микрофотография, x100, (б) поверхности образца группы 4.3

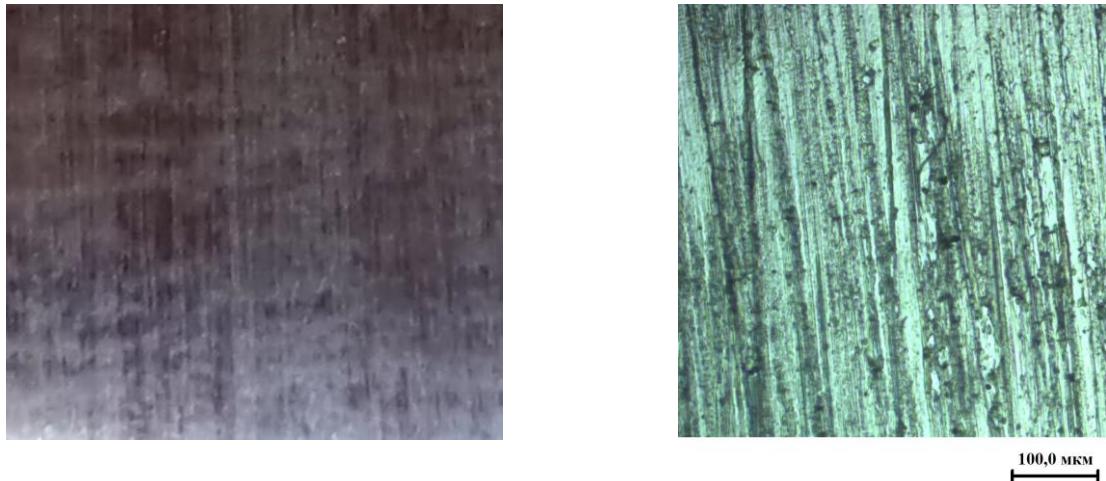


Рисунок 3.15 – Фотография, x5 (a) и микрофотография, x100, (б) поверхности образца группы 4.4

В таблице 3.6 представлены средние значения размера неровностей поверхности образцов групп 4.2, 4.3 и 4.4.

Таблица 3.8 – Средние значения размера неровностей поверхности образцов групп 7.2, 7.3 и 7.4

Условное обозначение группы образцов	S_{av} , мкм
Образцы группы 4.2	80,0
Образцы группы 4.3	50,0
Образцы группы 4.4	20,0

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц зафиксированных на металлических подложках образцов групп 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4 представлены на рисунке 3.16.

Как видно из рисунка 3.16, в результате формирования на поверхности алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки неровностей, среднее значение размеров которых составляет 80,0 мкм, можно обеспечить увеличение с 0,01–0,55 отн. ед. до 0,2–0,92 отн. ед. значений коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц такого материала (при условии, что такая пленка зафиксирована на металлической подложке). В результате формирования на поверхности указанной пленки неровностей, среднее значение размеров которых составляет 50,0 мкм и 20,0 мкм, можно обеспечить увеличение с 0,01–0,55 отн. ед. до соответственно 0,1–0,93 отн. ед. и 0,3–0,95 отн. ед. значений ее коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц (при условии, что такая пленка зафиксирована на металлической подложке). Таким образом, в результате формирования на поверхности алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки неровностей микронного размера можно обеспечить увеличение в 10,0–30,0 раз минимального значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц и увеличение в 1,5 раза максимального значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц.

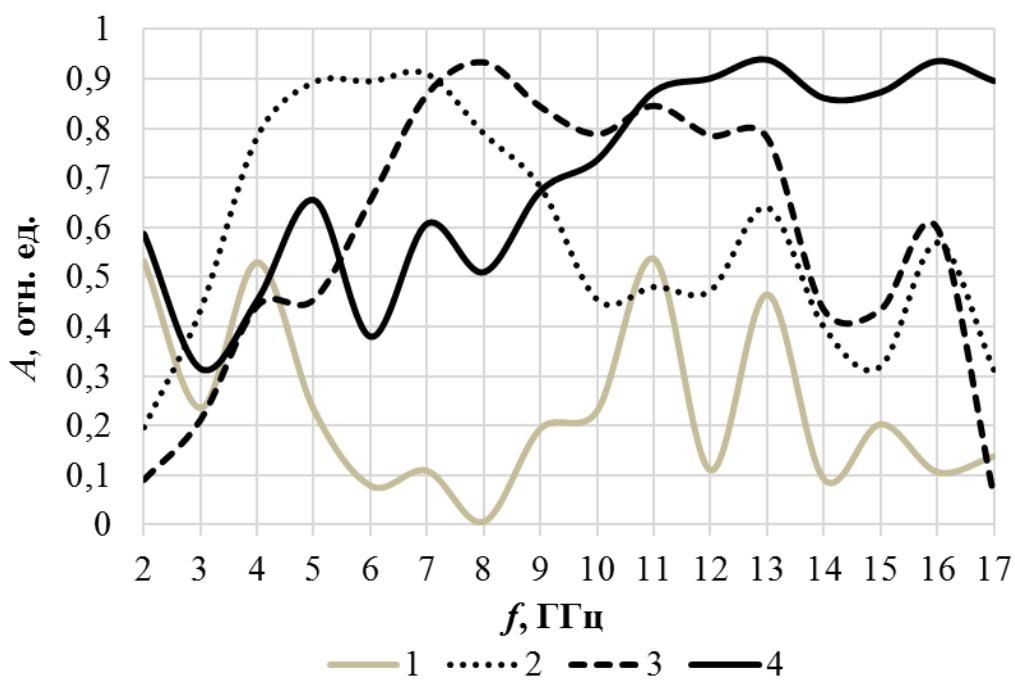


Рисунок 3.16 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ зафиксированных на металлических подложках образцов групп 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

В таблице 3.9 представлены характеристики зафиксированных на металлических подложках образцов групп 4.2, 4.3 и 4.4.

Таблица 3.9 – Характеристики зафиксированных на металлических подложках образцов групп 4.2, 4.3 и 4.4

Условное обозначение группы образцов	ЭПП ЭМИ	Ширина ЭПП ЭМИ, ГГц	Ширина ЭПП ЭМИ, %	Значения коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП
Образцы группы 4.2	3,5–9,5 ГГц 12,2–13,8 ГГц	6,0 1,6	92,3 12,3	0,5–0,92 отн. ед. 0,5–0,62 отн. ед.
Образцы группы 4.3	5,5–13,5 ГГц	8,0	84,2	0,5–0,93 отн. ед.
Образцы группы 4.4	4,2–5,5 ГГц 6,5–17,0 ГГц	1,3 10,5	26,8 89,4	0,5–0,65 отн. ед. 0,5–0,95 отн. ед.

Из таблицы 3.9 видно, что зафиксированные на металлических подложках образцы групп 4.2, 4.3 и 4.4 являются широкополосными поглотителями ЭМИ, т. к. ширина характерной для них ЭПП сопоставима со значением центральной частоты этой полосы (составляет более 84,0 % от значения центральной частоты этой полосы). Значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов групп 4.1 достигают величины 0,5, если частота этого излучения составляет 4,0 ГГц или 11,0 ГГц, в соответствии с чем эти образцы не могут считаться поглотителями ЭМИ. Также из таблицы 3.9 видно, что, если средний размер неровностей поверхности алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки уменьшается с 80,0 до 50,0 мкм или 20,0 мкм, то увеличиваются как граничные значения эффективной полосы поглощения ЭМИ такой пленки, зафиксированной на металлической подложке, так и ширина этой полосы (с 6,0 до соответственно 8,0 или 10,5 ГГц). Это обусловлено следующим. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 6,5–17,0 ГГц зафиксированной на металлической подложке алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, на поверхности которой сформированы неровности размером 20,0 мкм, снижаются с 0,5 до 0,04 отн. ед. При этом значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот зафиксированной на металлической подложке алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, на поверхности которой сформированы неровности размером 80,0 мкм, увеличиваются с 0,08 до 0,78 отн. ед. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 6,5–8,0 ГГц зафиксированной на металлической подложке алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, на поверхности которой сформированы неровности размером 50,0 мкм, уменьшаются с 0,2 до 0,04 отн. ед., а в диапазоне частот 8,0–17,0 ГГц – увеличиваются с 0,04 до 0,88 отн. ед. (рисунок 3.17).

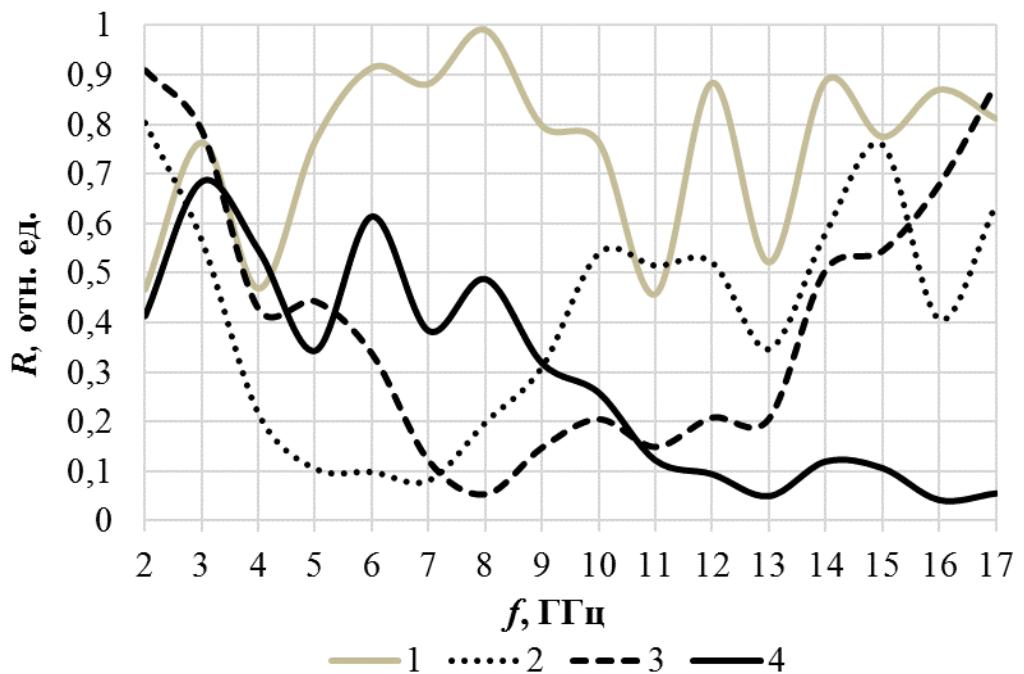


Рисунок 3.17 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ зафиксированных на металлических подложках образцов групп 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Таким образом, в результате модификации алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки путем формирования на ее поверхности неровностей, среднее значение размеров которых составляет 80,0 мкм, можно обеспечить увеличение с 0,01–0,55 отн. ед. до 0,2–0,92 отн. ед. значений ее коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц, что обусловлено снижением с 0,42–0,98 отн. ед. до 0,07–0,79 отн. ед. значений ее коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот (при условии, что такая пленка зафиксирована на металлической подложке). В результате модификации алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки путем формирования на ее поверхности неровностей, среднее значение размеров которых составляет 50,0 мкм или 20,0 мкм, можно обеспечить увеличение с 0,01–0,55 отн. ед. до соответственно 0,1–0,93 отн. ед. и 0,3–0,95 отн. ед. значений ее коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц, что обусловлено снижением с 0,42–0,98 отн. ед. до соответственно 0,04–0,88 отн. ед. или 0,04–0,68 отн. ед. значений ее коэффициента отражения ЭМИ (при условии, что такая пленка зафиксирована на металлической подложке).

3.5 Физико-математические модели для обоснования закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с электромагнитными экранами на основе алюминийсодержащих материалов

Для обоснования закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с электромагнитными экранами с закрепленными на их поверхности объемными элементами в виде классических спиралей Архимеда, или объемными петлевидными элементами, или объемными элементами в виде лент Мебиуса (результаты исследования образцов таких экранов представлены в разделах 3.1, 3.2 и 3.3 соответственно) предложено использовать модель, основанную на параметрах эквивалентных электрических схем ячеек этих экранов (т. е. по сути, участков этих экранов) – рисунок 3.18. Особенности таких схем представлены в разделе 1.2.

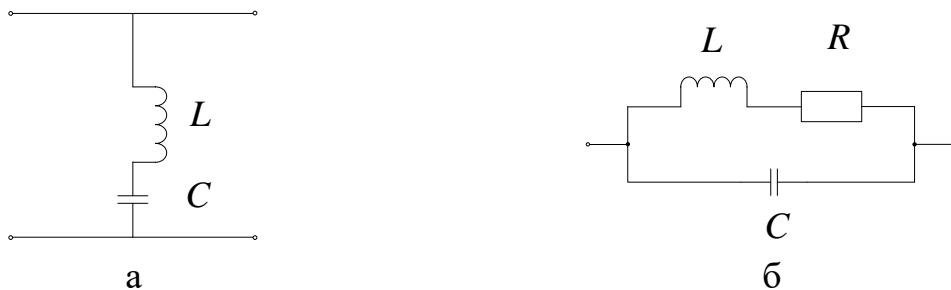


Рисунок 3.18 – Эквивалентные электрические схемы участков экранов с закрепленными на их поверхности объемными элементами в виде классических спиралей Архимеда или объемными элементами в виде лент Мебиуса (а), объемными петлевидными элементами (б)

Участок электромагнитных экранов с закрепленными на их поверхности объемными элементами в виде классических спиралей Архимеда, для которого построена эквивалентная электрическая схема (см. рисунок 3.18, а) включает в себя объемный элемент в виде классической спирали Архимеда и зазор между этим элементом и элементом, расположенным рядом с ним (ширина зазора равна шагу, с которым закреплены объемные элементы на поверхности электромагнитного экрана). Эквивалентом объемного элемента в виде классической спирали Архимеда является катушка индуктивности, а эквивалентом указанного зазора – конденсатор.

Участок электромагнитных экранов с закрепленными на их поверхности объемными элементами в виде лент Мебиуса, для которого построена эквивалентная электрическая схема (см. рисунок 3.18, а) включает в себя один из таких элементов и зазор между этим элементом и элементом, расположенным рядом с ним. Эквивалентом объемного элемента в виде лент Мебиуса является катушка индуктивности, а эквивалентом указанного зазора – конденсатор.

Участок электромагнитных экранов с закрепленными на их поверхности объемными петлевидными элементами, для которого построена эквивалентная электрическая схема (см. рисунок 3.18, б) включает в себя один горизонтальный ряд (т. е. группу) этих элементов и зазор между этим рядом и рядом, расположенным ниже или выше него. Эквивалентом ряда объемных петлевидных элементов являются последовательно соединенные катушки индуктивности и активное сопротивление, а эквивалентом указанного зазора – конденсатор.

Предложенная модель включает в себя следующие формулы [182].

1. Формулы для расчета индуктивности катушки индуктивности в эквивалентной электрической схеме участков электромагнитных экранов с закрепленными на их поверхности объемными элементами в виде классических спиралей Архимеда (L_1) [183] (рисунок 3.19).

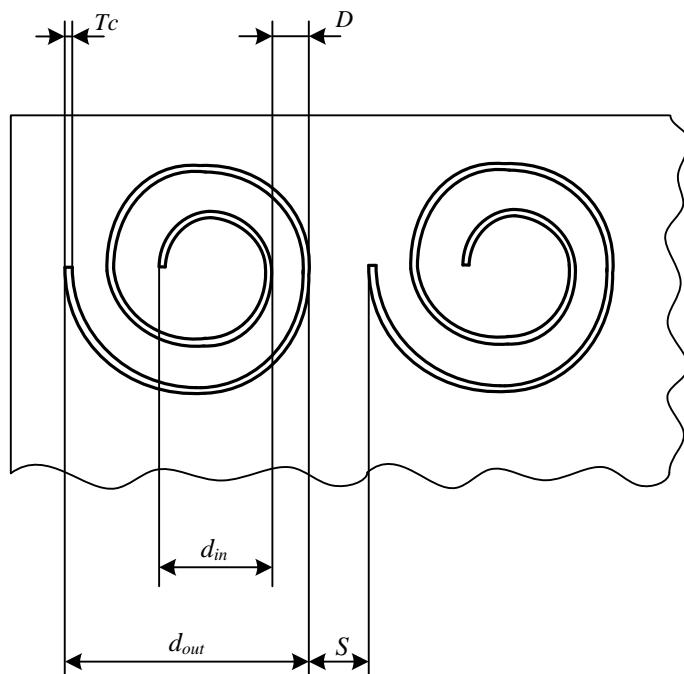


Рисунок 3.19 – Схематическое изображение двух участков электромагнитного экрана с закрепленными на его поверхности объемными элементами в виде классических спиралей Архимеда с указанием их основных параметров

$$L_1 = 31,33 \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{r_{av}^2}{8 \cdot r_{av} + 11 \cdot T_c}, \text{ Гн/м,} \quad (3.6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

N – количество витков катушки индуктивности;

T_c – толщина проводника катушки индуктивности (см. рисунок 3.19), рассчитываемая по формуле:

$$T_c = \frac{d_{out} - d_{in}}{2}, \text{ м,} \quad (3.8)$$

r_{av} – средний радиус катушки индуктивности, рассчитываемый по формулам:

$$r_{av} = \frac{d_{in} + d_{out}}{4}, \text{ м,} \quad (3.7)$$

где d_{in} – диаметр первого витка катушки индуктивности (см. рисунок 3.19);
 d_{out} – диаметр катушки индуктивности (см. рисунок 3.19), который связан со значением d_{in} следующей формулой:

$$d_{out} = d_{in} + (N + 1) \cdot (D + T_c), \text{ м,} \quad (3.8)$$

где D – расстояние между витками катушки индуктивности (см. рисунок 3.19).

2. Формулы для расчета индуктивности катушки индуктивности в эквивалентной электрической схеме участков электромагнитных экранов с закрепленными на их поверхности объемными петлевидными элементами или объемными элементами в виде лент Мебиуса (L_2) [184, с. 203; 185]:

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot N_c^2 \cdot S_c}{l}, \text{ Гн/м,} \quad (3.9)$$

где N_c – количество витков в катушке индуктивности (равно количеству объемных петлевидных элементов в случае, если расчет выполняется для электромагнитных экранов, на поверхности которых закреплены такие элементы; равно 1, если расчет выполняется для электромагнитных экранов, на поверхности которых закреплены объемные элементы в виде лент Мебиуса);

S_c – площадь поперечного сечения катушки индуктивности;

l – длина катушки индуктивности.

При расчете S_c предложено использовать формулу для расчета площади эллипса (т. е. предложено аппроксимировать формы объемного петлевидного элемента и объемного элемента в виде ленты Мебиуса к форме эллипса) [186]:

$$S_c = \pi \cdot a \cdot b, \text{ м}^2, \quad (3.10)$$

где a – длина элемента;

b – ширина элемента.

3. Формула для расчета реактивного сопротивления катушки индуктивности ($X_L(f)$) в эквивалентной электрической схеме участков электромагнитных экранов [187]:

$$X_L(f) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \text{Ом}, \quad (3.11)$$

где L принимает значение L_1 или L_2 в зависимости от того, для какого электромагнитного экрана выполняется расчет.

4. Формула для расчета емкости конденсатора (C) в эквивалентной электрической схеме участков электромагнитных экранов [184, с. 65]:

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot T_c}{S}, \Phi, \quad (3.12)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая константа, равна $0,885 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/м}$;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость подложки электромагнитного экрана, на которой закреплены объемные элементы;

S – шаг, с которым закреплены объемные элементы (см. рисунок 3.19).

5. Формула для расчета реактивного сопротивления конденсатора ($X_C(f)$) в эквивалентной электрической схеме участков электромагнитных экранов [184, с. 515]:

$$X_C(f) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}, \text{Ом}, \quad (3.13)$$

6. Формула (1.19) для расчета нормализованной проводимости участка электромагнитного экрана.

7. Формула (1.20) для получения функции зависимости коэффициента передачи ЭМИ электромагнитного экрана от длины или частоты электромагнитных волн, взаимодействующих с ним.

Для обоснования закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с электромагнитными экранами на основе листовых электропроводящих материалов, поверхности которых содержат неровности микронного размера (в том числе экранов, результаты исследования образцов которых представлены в разделе 3.4), предложено выполнять численное моделирование такого взаимодействия с использованием физико-математической модели, построенной с учетом следующих условий [188, 189].

1. Процесс изменения напряженности электромагнитного поля в области расположения экрана необходимо описывать с использованием следующего выражения:

$$\lambda \frac{\partial E}{\partial t} + \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu \mu_0} (\nabla^2 E - \text{grad}(\text{div } E)). \quad (3.14)$$

2. Начальные условия необходимо описывать с использованием следующих выражений:

$$E|_{t=0} = 0; \quad (3.15)$$

$$\left. \frac{\partial E}{\partial t} \right|_{t=0} = 0. \quad (3.16)$$

$E(t)$ необходимо определять согласно формулам (3.3) и (3.4) при следующих параметрах: $\Delta = 10^4 \text{ с}^{-1}$, $\theta = 10^6$, $m = 1$.

3. Границное условие необходимо описывать с помощью следующего выражения:

$$E|_{\Gamma} = \phi(t), \quad (3.17)$$

где Γ – это границы поверхности электромагнитного экрана.

4. Совокупность неровностей поверхности электромагнитного экрана необходимо описывались с использованием следующей функции:

$$f(x, y) = \sum_{m=-N}^N \sum_{n=-N}^N (m^2 + n^2)^{\frac{b}{2}} a(m, n) \cos(2\pi(mx + ny) + \phi(m, n)), \text{ мкм}$$

где $\phi(m, n)$ – функция, принимающая случайные значения от 0 до π ;

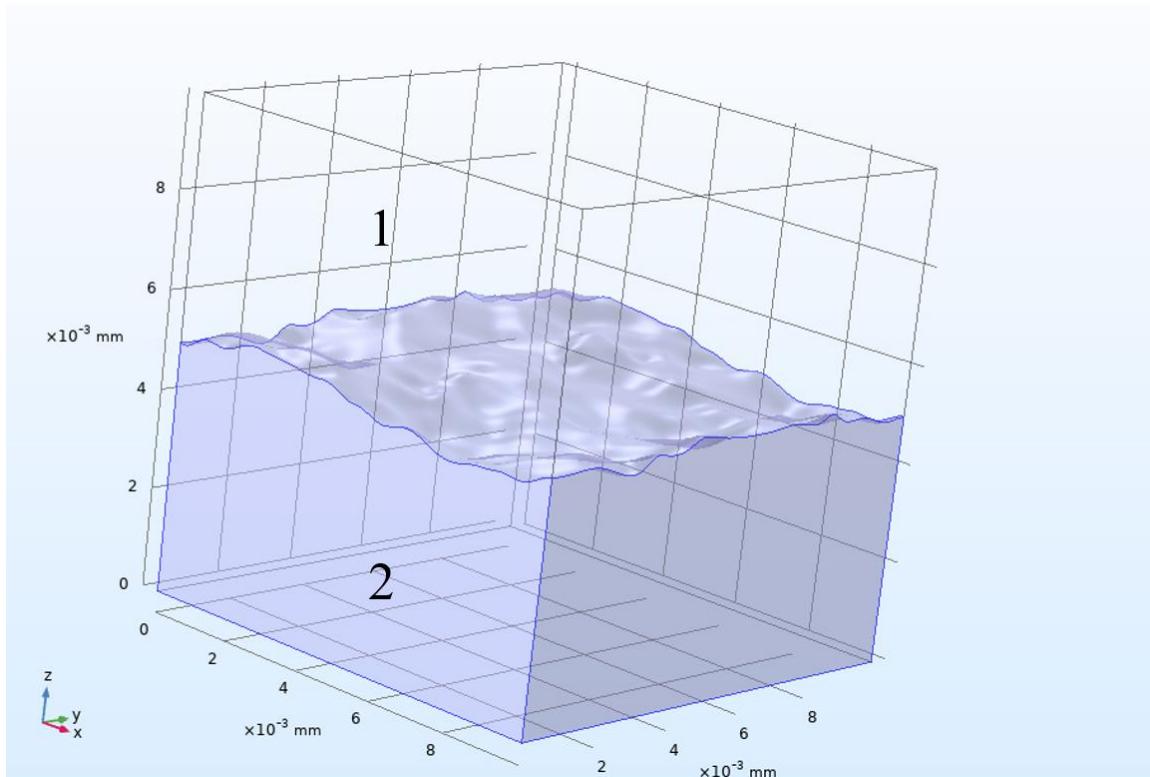
$a(m, n)$ – функция, принимающая случайные значения от 0 до 1;

b – амплитудный спектральный показатель.

Представленная формула соответствует функции, которая является подобной функции дискретного косинусного преобразования, где коэффициенты выбираются случайным образом. В ходе моделирования задавались следующие значения этих коэффициентов: $b = 2$, $n = 20$; $b = 1,8$, $n = 15$.

С использованием предложенной модели выполнено численное моделирование взаимодействия ЭМИ СВЧ-диапазона с электропроводящим материалом, поверхность которого характеризуется наличием неровностей микронного размера. Такое моделирование было проведено с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics 3.5. Область, в которой выполнялось моделирование процесса взаимодействия ЭМИ, представлена на рисунке 3.18.

Результаты моделирования процесса взаимодействия ЭМИ СВЧ-диапазона с электропроводящим материалом, поверхность которого характеризуется наличием неровностей микронного размера, представлены на рисунке 3.19.



1 – воздух; 2 – электропроводящий материал, поверхность которого характеризуется наличием неровностей микронного размера

Рисунок 3.18 – Область моделирования процесса взаимодействия ЭМИ СВЧ-диапазона с электропроводящим материалом, поверхность которого характеризуется наличием неровностей микронного размера

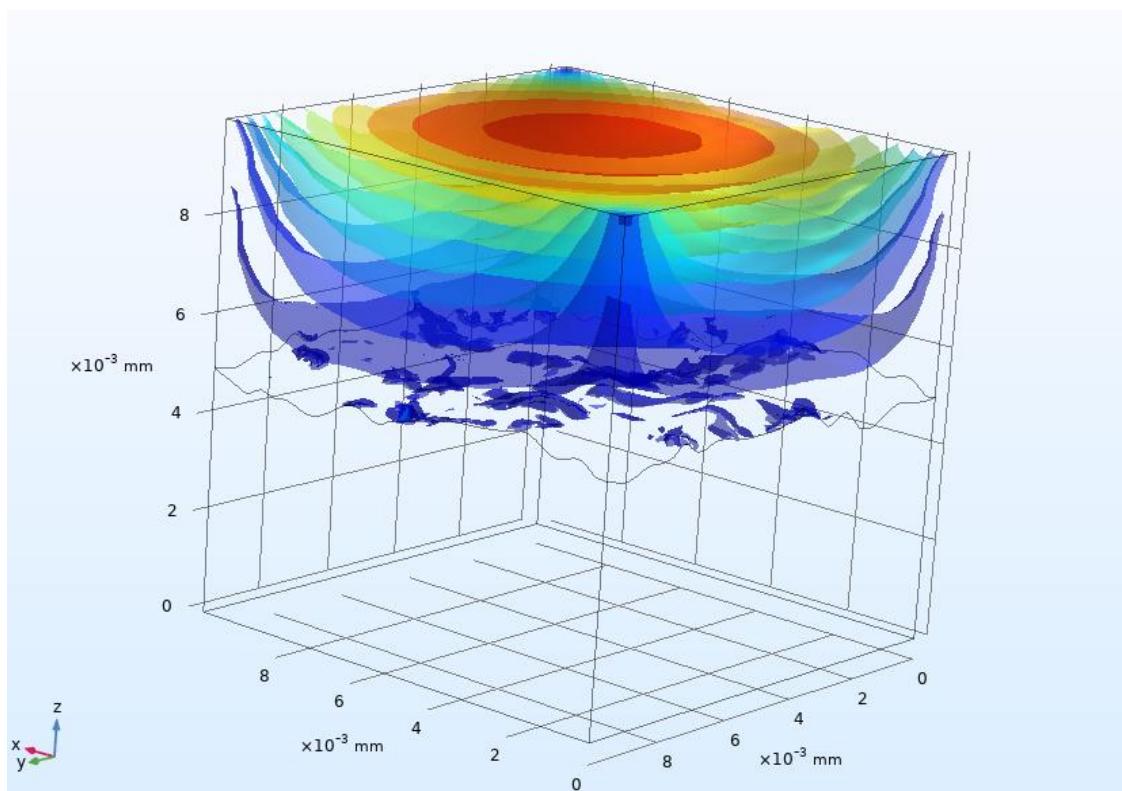


Рисунок 3.19 – Распределения напряженности электромагнитного поля на границе раздела «воздух – электропроводящий материал»

Из рисунка 3.19 видно, что на наибольшая напряженность электромагнитного поля, взаимодействующего с электропроводящим материалом, поверхность которого характеризуется наличием неровностей микронного размера, наблюдается в точках, расположенных на вершинах этих неровностей. При этом чем больше размер неровностей, тем выше напряженность электромагнитного поля. Обозначенная особенность является обоснованием увеличения в среднем на 0,4 отн. ед. значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 11,0–17,0 ГГц алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью при условии, что размер неровностей этих поверхностей увеличивается с 20,0 до 80,0 мкм (см. рисунок 3.17).

ГЛАВА 4

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ФОЛЬГИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ И АЛЮМИНИЕВОЙ ФОЛЬГИ

4.1 Экраны на основе объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги

С учетом установленных закономерностей изменения характеристик поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с закрепленными на ее поверхности объемными элементами в виде классических спиралей Архимеда в зависимости от диаметра таких элементов (см. раздел 3.1) разработана технология изготовления четырехслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе таких элементов [190]. Разработанная технология включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого и третьего слоев электромагнитного экрана путем откраивания от рулона синтетического нетканого волокнистого материала двух одинаковых фрагментов, длина (L_s), ширина (W_s) и форма которого определяются требованиями к длине, ширине и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

2. Формирование второго слоя электромагнитного экрана в виде совокупности объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги.

2.1. Определение количества объемных спиралевидных элементов (n_e), которые должны быть сформированы на основе следующей формулы (при условии, что диаметр этих элементов составляет 6,0 см, а шаг их размещения – 1,0 см):

$$n_e = \text{int}\left(\frac{L_s}{7}\right) \text{int}\left(\frac{W_s}{7}\right), \quad (4.1)$$

где $\text{int}()$ – функция, значение которой является целой частью от ее аргумента (значения L_s и W_s берутся в сантиметрах).

2.2. Откраивание от рулона алюминиевой фольги одинаковых фрагментов прямоугольной формы для формирования объемных спиралевидных элементов с учетом следующих условий:

– длина и ширина каждого фрагмента – 20,0 см и 5,0 см соответственно;

– количество фрагментов должно быть эквивалентно n_e , рассчитанному в результате реализации операции 1.2.1 по формуле (5.1).

2.3. Формирование одинаковых объемных спиралевидных элементов из фрагментов алюминиевой фольги, полученных в результате реализации операции 2.2.

2.4. Распределение объемных спиралевидных элементов, сформированных в результате реализации операции 2.3, с шагом 1,0 см на поверхности одного из фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала, откроенных в результате реализации операции 1.

3. Размещение второго из фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала, откроенных в результате реализации операции 1, поверх слоя в виде совокупности объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги, сформированного в результате реализации операции 2.

4. Термопрессование конструкции, полученной в результате реализации операций 1–3, при температуре $\sim 250,0$ °C (т. е. при температуре, соответствующей температуре плавления синтетического нетканого волокнистого материала) в течение 10,0 мин.

5. Формирование четвертого слоя электромагнитного экрана путем откраивания от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки фрагмента, длина, ширина и форма которых определяются требованиями к длине, ширине и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

6. Закрепление четвертого слоя электромагнитного экрана, сформированного в результате реализации операции 5, с помощью распыляемого клея на одной из поверхностей конструкции, полученной в результате реализации операций 1–4.

Внешний вид сверху четырехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги, приведен на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Внешний вид сверху фрагмента электромагнитного экрана на основе объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги

Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц четырехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги, приведена на рисунке 4.2.

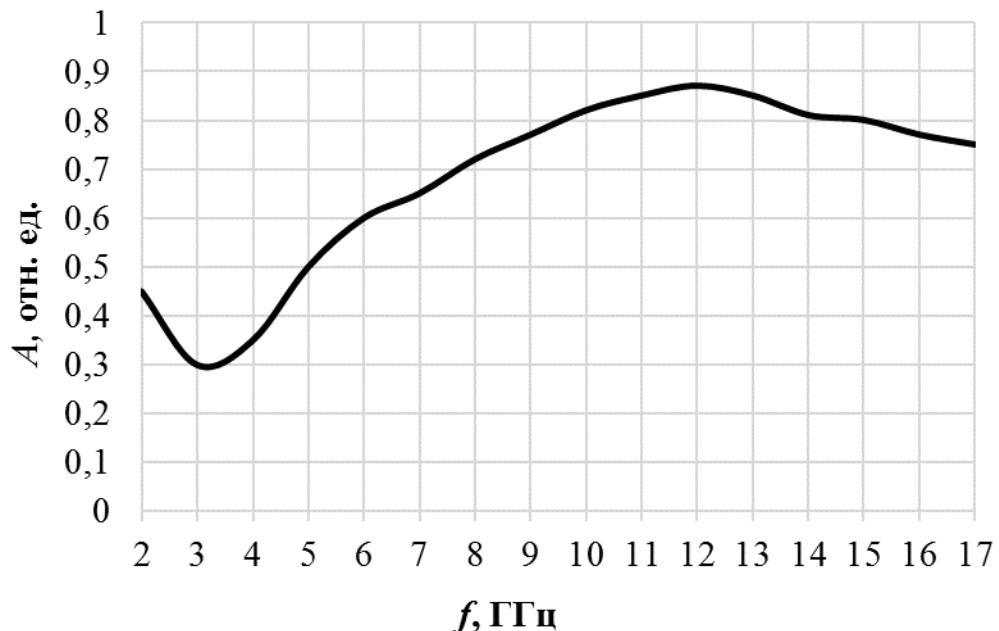


Рисунок 4.2 – Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц четырехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги

Из рисунка 4.2 видно, что ширина ЭПП ЭМИ четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с представленной технологией с использованием объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги, составляет 12,0 ГГц (ЭПП ЭМИ – 5,0–17,0 ГГц). Такие экраны характеризуются более широкой ЭПП ЭМИ по сравнению с аналогами (таблица 4.1).

Стоимость материалов для изготовления 1,0 м² экранов в соответствии с представленной технологией составляет 50,0 белорусских рублей.

Таблица 4.1 – Характеристики электромагнитных экранов, изготовленных с использованием спиралевидных или псевдоспиралевидных элементов

Краткое описание электромагнитных экранов	Толщина, см	ЭПП ЭМИ	Ширина ЭПП, ГГц
1	2	3	4
Экраны, изготовленные в соответствии с представленной технологией	0,5±0,1	5,0–17,0 ГГц	12,0
Трехполосные экраны на основе плоских спиралевидных элементов диаметром 0,66 см, сформированных из меди [191]	0,083	9,5–10,5 ГГц 11,5–12,5 ГГц 14,5–15,5 ГГц	1,0
Трехслойные экраны на основе квадратных спиралей, сформированных из меди [192]	~ 0,2	1,7–1,8 ГГц	0,1
Четырехполосные экраны на основе асимметричных кольцевых элементов с разрывами [193]	0,15	4,0–4,2 ГГц 6,7–6,9 ГГц 10,8–11,8 ГГц 12,8–14,0 ГГц	0,2 0,2 1,0 1,2
Широкополосные экраны на основе спиральных колец с разрывами сформированных из меди [194]	Не указано	8,5–9,7 ГГц	1,2

4.2 Экраны на основе объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

С учетом установленных закономерностей изменения характеристик поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с закрепленными на ее поверхности объемными петлевидными элементами в зависимости от ширины таких элементов (см. раздел 3.2) разработана технология изготовления двух- или трехслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе таких элементов [195]. Разработанная технология включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого слоя электромагнитного экрана в виде совокупностей объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки.

1.1. Откраивание от рулона фольгированной полимерной пленки фрагментов с учетом следующих условий:

- длина каждого фрагмента равна длине изготавливаемого электромагнитного экрана;
- ширина каждого фрагмента (W_{f1}) – 10,0 см;

– количество фрагментов (n_{f1}) должно быть рассчитано на основе следующей формулы:

$$n_{f1} = \frac{2W_{s1}}{W_{f1}}, \quad (4.2)$$

где W_{s1} – ширина изготавливаемого электромагнитного экрана, см.

1.2. Клеевое соединение двух противоположных краев большего размера у каждого из фрагментов, полученных в результате реализации операции 1.1.

1.3. Надрезание с шагом 0,9 см каждого из элементов, полученных в результате реализации операций 1.1, 1.2, с помощью измельчителя для бумаги.

2. Формирование второго слоя электромагнитного экрана путем откраивания от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки (если изготавливаемый экран должен характеризоваться свойством гибкости) или от листа гофрокартона (если изготавливаемый экран должен характеризоваться свойством жесткости) фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

3. Закрепление совокупностей объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, полученных в результате реализации операции 1, на одной из поверхностей фрагмента, откроенного в ходе реализации операции 2.

4. Если второй слой электромагнитного экрана сформирован из листа гофрокартона, то формирование третьего слоя электромагнитного экрана путем откраивания от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

5. Закрепление третьего слоя электромагнитного экрана, сформированного в результате реализации операции 4, на той поверхности сформированного из гофрокартона в результате реализации операции 2 второго слоя, на которой не закреплены совокупности объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, полученные в результате реализации операции 1.

Внешний вид сверху трехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, приведен на рисунке 4.3.

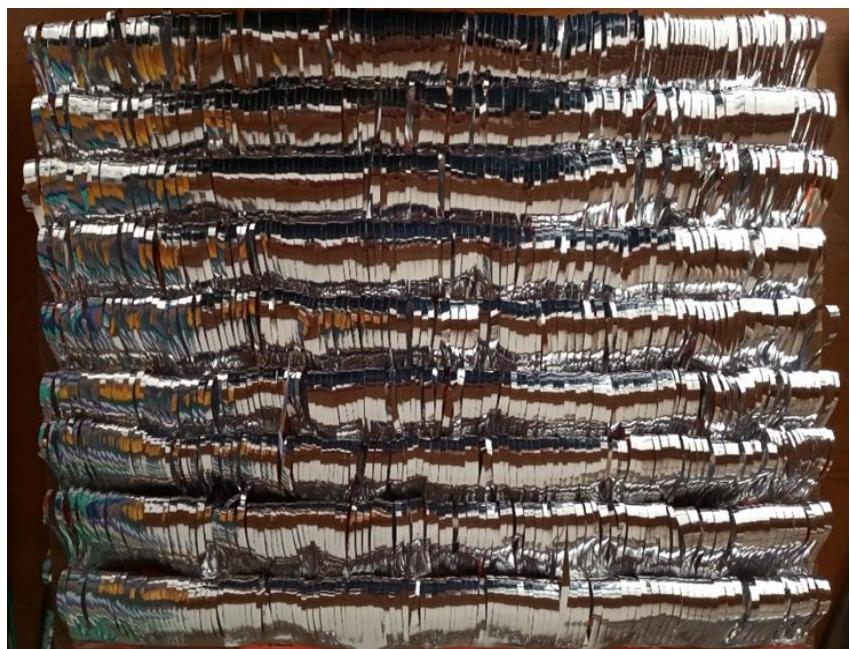


Рисунок 4.3 – Внешний вид сверху трехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, соответствует частотной зависимости, представленной на рисунке 4.7 (кривая 4).

Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц трехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, приведена на рисунке 4.4.

Как видно из рисунка 4.4, ширина ЭПП ЭМИ трехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с представленной технологией с использованием объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, составляет 13,0 ГГц (ЭПП ЭМИ – 4,0–17,0 ГГц).

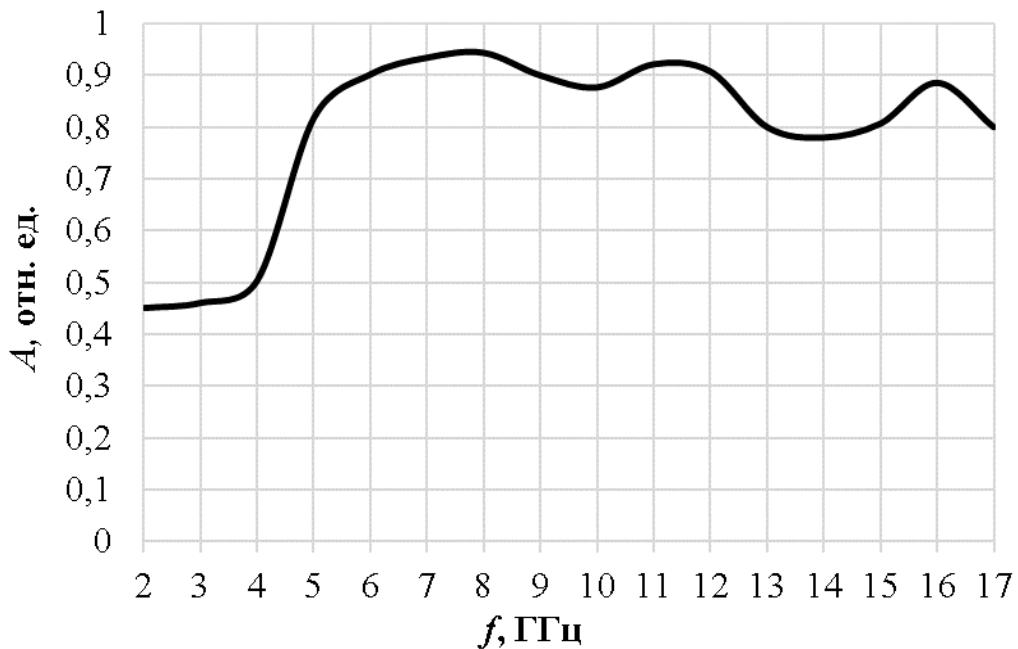


Рисунок 4.4 – Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц трехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

4.3 Экраны на основе объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

С учетом установленных закономерностей изменения характеристик поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с закрепленными на ее поверхности объемными элементами в виде лент Мебиуса в зависимости от шага закрепления таких элементов (см. раздел 3.3) разработана технология изготовления двух- или трехслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе таких элементов [196]. Разработанная технология включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого слоя электромагнитного экрана в виде совокупности объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки.

1.1. Откраивание от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки одинаковых фрагментов для формирования объемных элементов в виде лент Мебиуса с учетом следующих условий:

- длина каждого фрагмента пленки – 5,0 см;
- ширина каждого фрагмента пленки – 0,5 см;
- количество фрагментов (n_{f2}) должно быть должно быть рассчитано на основе следующей формулы (при условии, что шаг размещения этих элементов 1,0 см):

$$n_{f2} = \text{int}\left(\frac{L_{s2}}{3,5}\right)\text{int}\left(\frac{W_{s2}}{1,5}\right), \quad (4.3)$$

где $\text{int}()$ – функция, значение которой является целой частью от ее аргумента;

L_{s2} – длина изготавливаемого электромагнитного экрана, см;

W_{s2} – ширина изготавливаемого электромагнитного экрана, см.

1.2. Формирование объемных элементов в виде лент Мебиуса из фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, откроенных в ходе реализации операции 1.1.

2. Формирование второго слоя электромагнитного экрана путем откраивания от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки (если изготавливаемый экран должен характеризоваться свойством гибкости) или от листа гофрокартона (если изготавливаемый экран должен характеризоваться свойством жесткости) фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

3. Закрепление с шагом 1,0 см объемных элементов в виде лент Мебиуса, сформированных в ходе реализации операции 1, на одной из поверхностей фрагмента, откроенного в ходе реализации операции 2, с учетом того, что указанные элементы должны быть расположены под углом 45° по отношению к поверхности указанного фрагмента.

4. Если второй слой электромагнитного экрана сформирован из листа гофрокартона, то формирование третьего слоя электромагнитного экрана путем откраивания от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

5. Закрепление третьего слоя электромагнитного экрана, сформированного в результате реализации операции 4, на той поверхности сформированного из гофрокартона в результате реализации операции 2 второго слоя, на которой не закреплены совокупности объемные элементы в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, полученные в результате реализации операции 1.

Внешний вид сверху фрагмента трехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, приведен на рисунке 4.5.

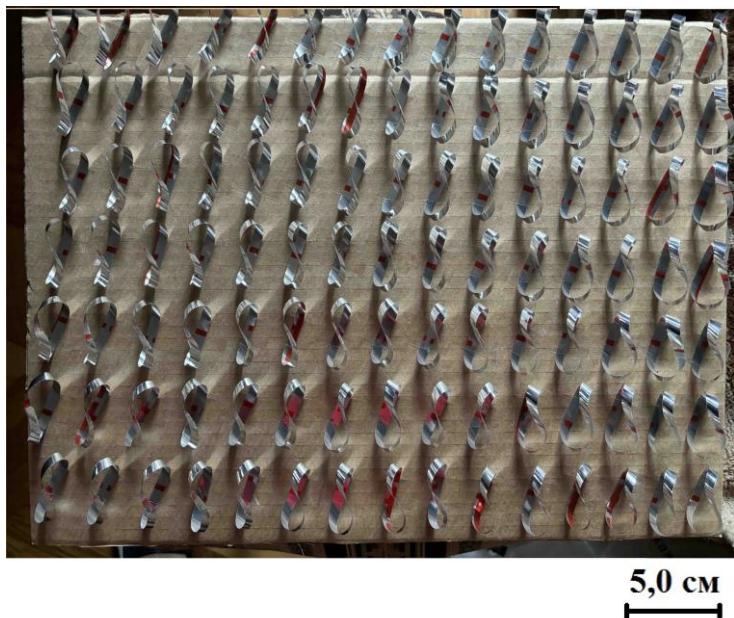


Рисунок 4.5 – Внешний вид сверху фрагмента трехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, соответствует частотной зависимости, представленной на рисунке 3.11 (кривая 3).

Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц трехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, приведена на рисунке 4.6.

Как видно из рисунка 4.6, ширина ЭПП ЭМИ трехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с представленной технологией с использованием объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, составляет 15,0 ГГц (ЭПП ЭМИ – 2,0–17,0 ГГц).

Двух- и трехслойные электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с представленной технологией с использованием объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, а также двух- и трехслойные электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с технологией, представленной в разделе 4.2, с использованием объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, характеризуются более широкой ЭПП ЭМИ по сравнению с аналогами (таблица 4.2).

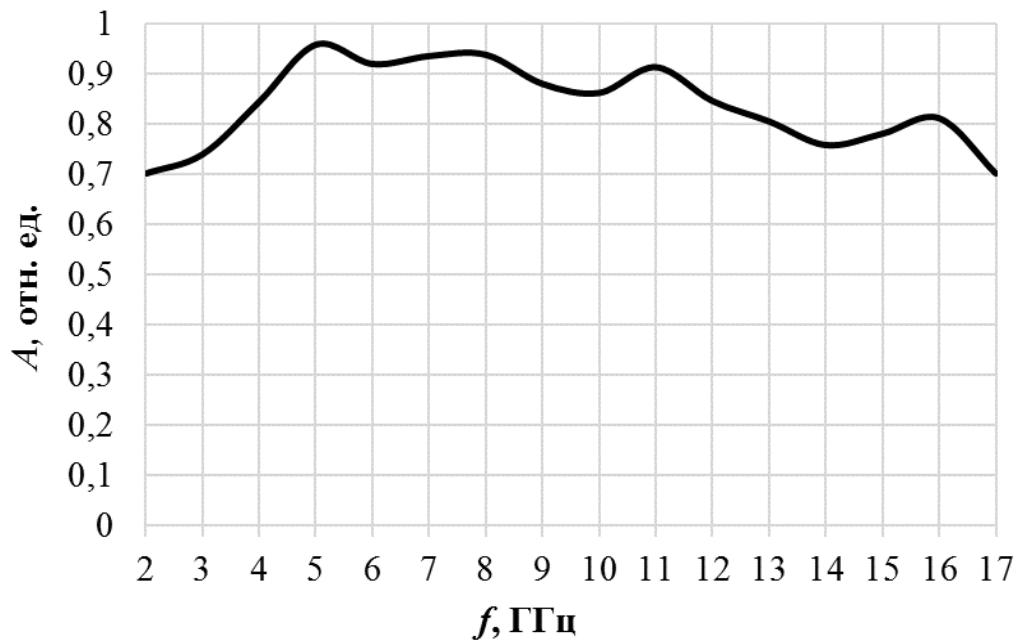


Рисунок 4.6 – Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц трехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией с использованием объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

Таблица 4.2 – Характеристики электромагнитных экранов, изготовленных с использованием петлевидных элементов

Краткое описание электромагнитных экранов	ЭПП ЭМИ	Ширина ЭПП, ГГц
1	2	3
Экраны, изготовленные с использованием объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки	4,0–17,0 ГГц	13,0
Экраны, изготовленные с использованием объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки	2,0–17,0 ГГц	15,0
Экраны, изготовленные с использованием кольцевых резонаторов с разрезами [197]	1,0–10,0 ГГц	9,0
Экраны, изготовленные с использованием петлевидных резонаторов квадратной формы [198]	5,5–7,3 ГГц 9,0–11,4 ГГц 13,5–13,6 ГГц	1,8 2,4 0,1

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3
Экраны, изготовленные с использованием петлевидных резонаторов квадратной формы [199]	3,5–4,0 ГГц 5,6–6,0 ГГц 6,8–7,2 ГГц 11,6–12,0 ГГц 17,6–18,0 ГГц	0,5 0,4 0,4 0,4 0,4
Экраны, изготовленные с использованием квадратных кольцевых резонаторов с разрезами [200]	1,4–1,6 ГГц 4,8–5,2 ГГц 5,8–6,2 ГГц	0,2 0,4 0,4

Стоимость материалов для изготовления 1,0 м² экранов с использованием объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки составляет 15,0 белорусских рублей, а с использованием объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки – 10,0 белорусских рублей.

4.4 Экраны на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью

С учетом установленных закономерностей изменения характеристик поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью в зависимости от среднего размера неровностей последней (см. раздел 3.4) разработаны технологии изготовления двух- и четырехслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе такой пленки [201]. Разработанная технология изготовления двухслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого слоя электромагнитного экрана.
 - 1.1. Откраивание от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.
 - 1.2. Механическая микрообработка одной из поверхностей фрагмента, откроенного в результате реализации операции 1.1, с использованием шлифовальной бумаги, размер зерен которой определяется требованиями к границам ЭПП ЭМИ изготавливаемого электромагнитного экрана (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Размер зерен шлифовальной бумаги, которую необходимо использовать при изготовлении электромагнитного экрана, характеризующегося определенной ЭПП ЭМИ

Размер зерен шлифовальной бумаги в структуре насадки шлифовальной машинки, мкм	ЭПП ЭМИ
75,0–90,0	3,5–9,5 ГГц 12,2–13,8 ГГц
28,0–40,0	5,5–13,5 ГГц
14,0–20,0	4,2–5,5 ГГц 6,5–17,0 ГГц

2. Формирование второго слоя электромагнитного экрана путем откраивания от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

3. Соединение с помощью двусторонней клейкой ленты первого и второго слоев, сформированных по результатам реализации операций 1 и 2, с учетом следующих условий:

- поверхность первого слоя, которая была подвергнута механической микрообработке в ходе реализации операции 1.2, должна быть ориентирована наружу;
- края слоев должны совпадать.

Установлено, что ширина ЭПП ЭМИ двухслойных электромагнитных экранов на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью, изготовленных в соответствии с разработанной технологией, сопоставима с шириной ЭПП ЭМИ, характерной для электромагнитных экранов на основе анодированной алюминиевой фольги, представленных в работах [202–206]. При этом значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 4,0–8,0 ГГц первых из указанных экранов выше на 0,05–0,9 отн. ед., чем вторых из указанных экранов, что видно из рисунка 4.6. Кроме того, в отличие от экранов на основе анодированной алюминиевой фольги двухслойные экраны, изготовленные в соответствии с представленной технологией, характеризуются свойством гибкости.

Стоимость материалов для изготовления 1,0 м² двухслойных экранов в соответствии с представленной технологией составляет 5,0 белорусских рублей.

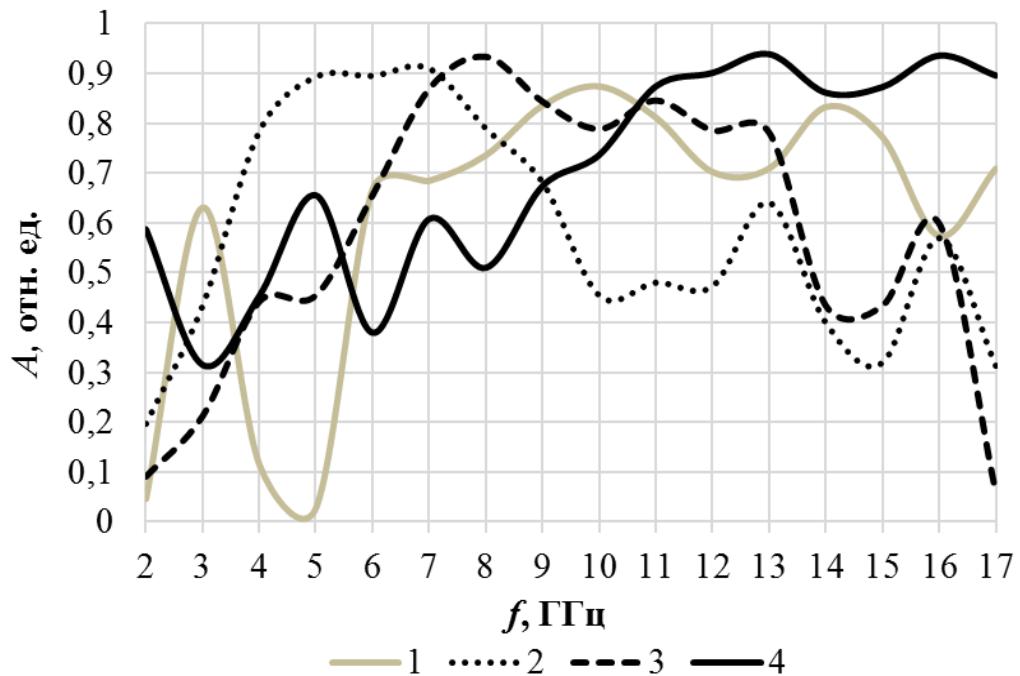


Рисунок 4.6 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана в виде анодированной алюминиевой фольги, соединенной с алюминиевой фольгой (кривая 1) и двухслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией с использованием шлифовальной бумаги с размером зерен 75,0–90,0 мкм (кривая 2), 28,0–40,0 мкм (кривая 3) и 14,0–20,0 мкм (кривая 4)

Разработанная технология изготовления четырехслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью включает в себя следующие операции [207].

1. Формирование первого и третьего слоев электромагнитного экрана путем откраивания от рулона синтетического нетканого волокнистого материала двух одинаковых фрагментов, длина (L_{s3}), ширина (W_{s3}) и форма которого определяются требованиями к длине, ширине и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

2. Формирование второго слоя электромагнитного экрана в виде совокупности пластинчатых элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки.

2.1. Откраивание от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки фрагмента, длина, ширина и форма которых определяются требованиями к длине, ширине и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

2.2. Механическая микрообработка одной из поверхностей фрагмента, откроенного в результате реализации операции 2.1, с использованием ручной

шлифовальной машинки с насадкой, в структуру которой входит шлифовальная бумага, размер зерен которой 75,0–90,0 мкм.

2.3. Вырезание с использованием станка для лазерной резки из фрагмента алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, обработанного в результате реализации операции 2.2, одинаковых элементов круглой формы с учетом следующих условий:

- диаметр этих элементов (d_{e3}) должен удовлетворять условию (1.10);
- количество этих элементов (n_{f3}) должно быть рассчитано на основе следующей формулы:

$$n_{f3} = \text{int}\left(\frac{L_{s3}}{d_{e3} + s_{e3}}\right) \text{int}\left(\frac{W_{s3}}{d_{e3} + s_{e3}}\right), \quad (4.4)$$

где s_{e3} – шаг размещения элементов, см (значения L_{s3} и W_{s3} берутся в сантиметрах).

2.4. Размещение элементов, вырезанных в результате реализации операции 2.3, на поверхности одного из фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала, откроенных в результате реализации операции 1, с учетом следующих условий:

- шаг размещения должен удовлетворять условию (1.11);
- элементы должны быть ориентированы наружу механически обработанными поверхностями.

3. Размещение второго из фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала, откроенных в результате реализации операции 1, поверх слоя в виде совокупности пластинчатых элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, сформированного в результате реализации операции 2.

4. Термопрессование конструкции, полученной в результате реализации операций 1–3, при температуре $\sim 250,0$ °С в течение 10,0 мин.

5. Формирование четвертого слоя электромагнитного экрана путем откраивания от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки фрагмента, длина, ширина и форма которых определяются требованиями к длине, ширине и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

6. Закрепление четвертого слоя электромагнитного экрана, сформированного в результате реализации операции 5, с помощью распыляемого клея на поверхности того слоя, полученной в результате реализации операций 1–4 конструкции, который не соприкасается с механически обработанными поверхностями пластинчатых элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, полученных и размещенных в результате реализации операции 2.

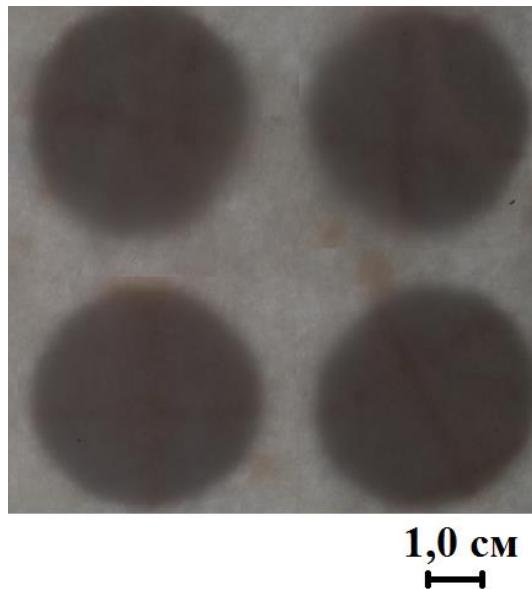


Рисунок 4.7 – Внешний вид сверху фрагмента четырехслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с представленной технологией на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью

Установлено, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в полосе частот 6,0–17,0 ГГц у электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией, выше на 0,02–0,5 отн. ед., чем у электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с аналогичной технологией с использованием алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, поверхность которой не обработана, что видно из рисунка 4.8. Это обусловлено тем, что значения коэффициента отражения ЭМИ в указанной полосе частот у первых из обозначенных экранов ниже на 0,02–0,5 отн. ед., чем у вторых из обозначенных экранов (рисунок 4.9).

Установлено, что четырехслойные электромагнитные экраны СВЧ-диапазона, изготовленные в соответствии с представленной технологией на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью, по сравнению с аналогами, рассмотренными в разделе 1.3.2, характеризуются более широкой ЭПП ЭМИ (таблица 4.4). Стоимость материалов для изготовления 1,0 м² таких экранов составляет 10,0 белорусских рублей.

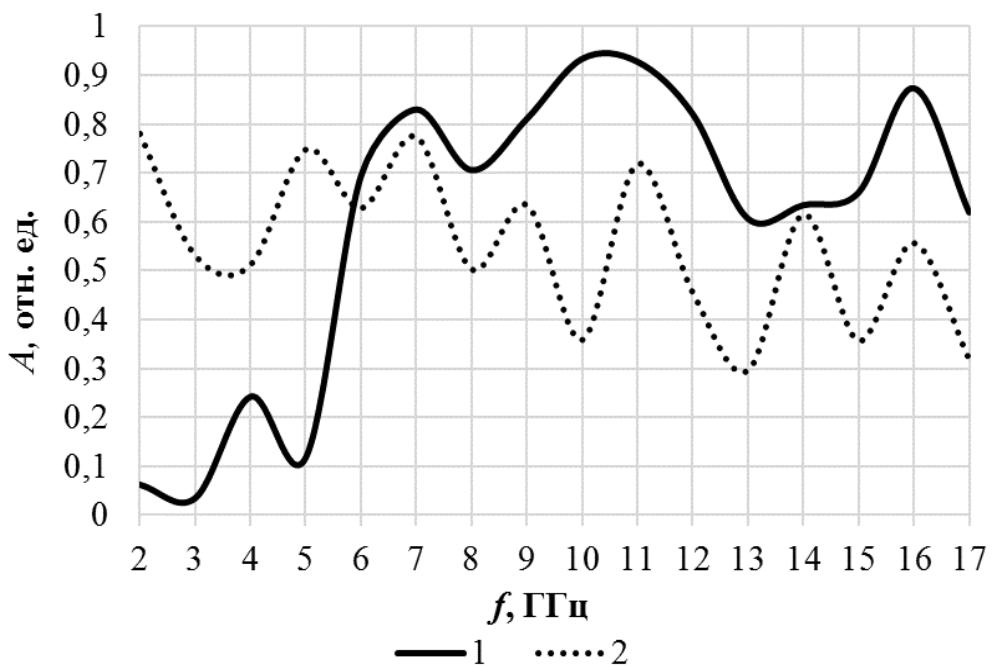


Рисунок 4.8 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц четырехслойного электромагнитного экрана, изготовленных в соответствии с разработанной технологией (кривая 1), и четырехслойного электромагнитного экрана, изготовленных в соответствии с аналогичной технологией с использованием алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, поверхность которой не обработана (кривая 2)

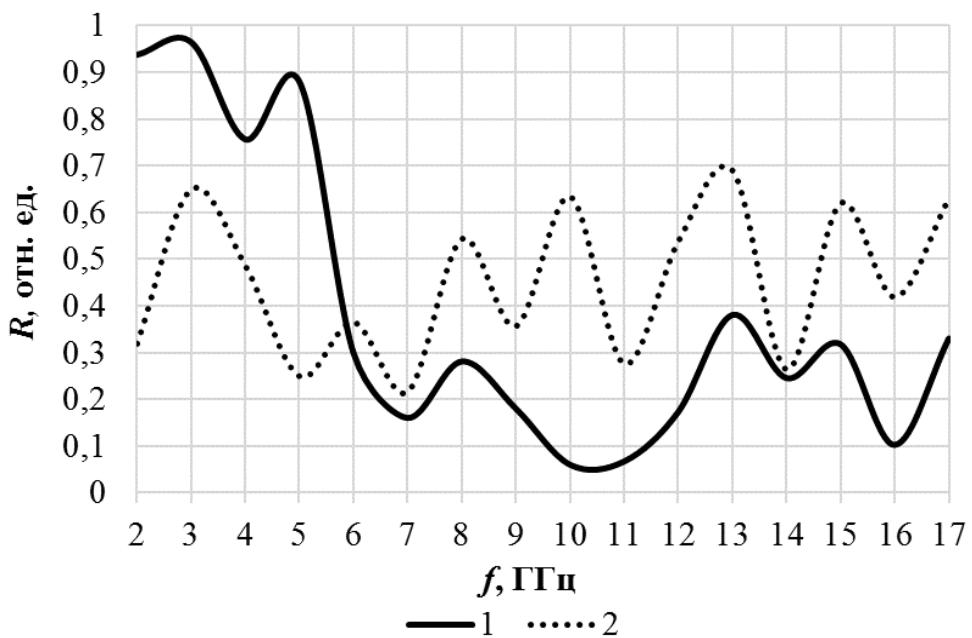


Рисунок 4.9 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц четырехслойного электромагнитного экрана, изготовленных в соответствии с разработанной технологией (кривая 1), и четырехслойного электромагнитного экрана, изготовленных в соответствии с аналогичной технологией с использованием алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, поверхность которой не обработана (кривая 2)

Таблица 4.4 – Характеристики электромагнитных экранов, изготовленных с использованием пластинчатых элементов

Краткое описание электромагнитных экранов	ЭПП ЭМИ	Ширина ЭПП, ГГц
1	2	3
Четырехслойные экраны, изготовленные в соответствии с представленной технологией на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью	5,7–17,0 ГГц	11,3
Экраны, изготовленные с использованием пластинчатых элементов квадратной формы [62]	5,0–6,0 ГГц	1,0
Тонкие экраны, изготовленные с использованием пластинчатых элементов квадратной формы [65]	3,4–4,5 ГГц	1,5
Экраны, изготовленные с использованием пластинчатых элементов квадратной формы с прорезями [66]	2,0–10,0 ГГц	8,0
Экраны, изготовленные с использованием пластинчатых элементов круглой формы и кольцевидных элементов круглой формы [67]	2,0–7,0 ГГц 9,0–12,0 ГГц	5,0 3,0

Экспериментально обоснована перспективность адаптации вышепредставленной технологии изготовления четырехслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона экранов для получения широкополосных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, содержащих алюминиевую стружку (рисунок 4.10) [208].



Рисунок 4.10 – Внешний вид алюминиевой стружки

Предпосылки для обозначенного экспериментального обоснования были следующие.

1. Авторами статей [209–222] отмечено, что при использовании отходов производства для изготовления поглотителей ЭМИ можно одновременно решить следующие задачи:

- получение низкостоимостных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, которые целесообразно использовать для электромагнитного экранирования зданий и помещений, в которых располагаются приборы электронной техники, чувствительные к воздействию электромагнитных помех;
- способствование решению проблемы утилизации ряда отходов производств.

2. Алюминиевая стружка представляет собой объемную спираль.

3. Среды, в структуру которых входят проводники в форме объемных спиралей (как упорядоченно, так и хаотично распределенные по объему этих сред), обеспечивают эффективное поглощение энергии взаимодействующего с ними ЭМИ СВЧ-диапазона, что теоретически обосновано в работе [223]. Однако следует отметить, что такое поглощение обеспечивается в узкой полосе частот.

На рисунке 4.11 представлены частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией и содержащих алюминиевую стружку.

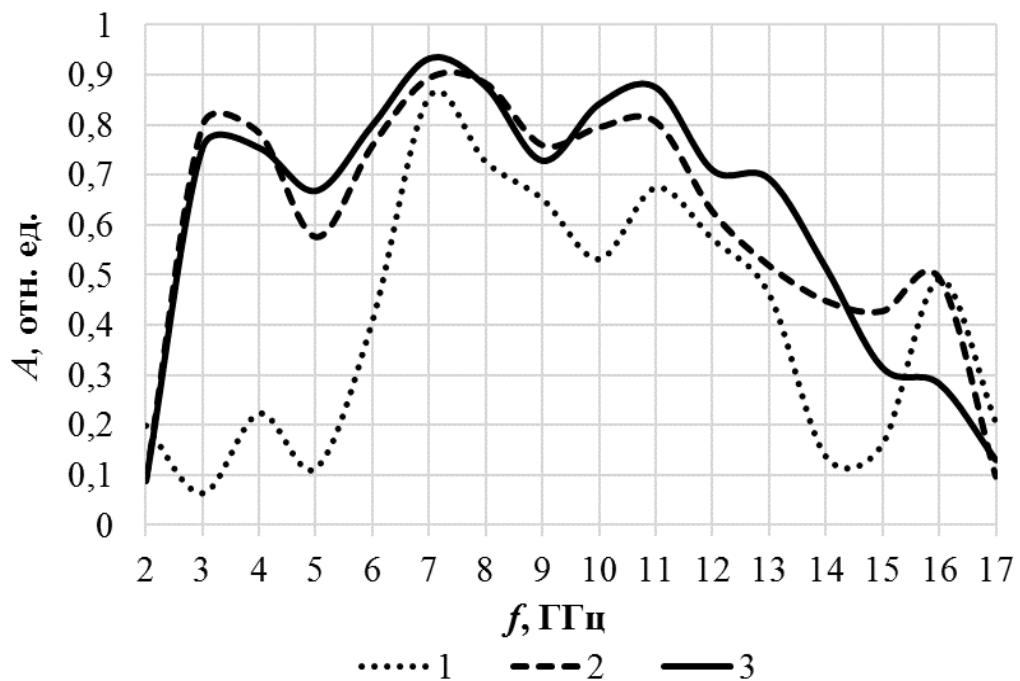


Рисунок 4.11 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией и содержащих алюминиевую стружку (диаметр элементов, сформированных из алюминиевой стружки – 3,0 см (кривая 1), 6,0 см (кривая 2), 9,0 см (кривая 3))

Из рисунка 4.11 видно, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц образцов четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией и содержащих алюминиевую стружку, изменяются в следующих пределах:

- от 0,08 отн. ед. до 0,85 отн. ед., если диаметр элементов, сформированных из обозначенной стружки, составляет 3,0 см;
- от 0,1 отн. ед. до 0,9 отн. ед., если диаметр элементов, сформированных из обозначенной стружки, составляет 6,0 см;
- от 0,1 отн. ед. до 0,94 отн. ед., если диаметр элементов, сформированных из обозначенной стружки, составляет 3,0 см.

Диапазоны ЭПП ЭМИ образцов четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией и содержащих алюминиевую стружку следующие:

- от 6,2 ГГц до 12,8 ГГц, если диаметр элементов, сформированных из обозначенной стружки, составляет 3,0 см;
- от 2,5 ГГц до 13,0 ГГц, если диаметр элементов, сформированных из обозначенной стружки, составляет 6,0 см;
- от 2,5 ГГц до 14,0 ГГц, если диаметр элементов, сформированных из обозначенной стружки, составляет 9,0 см.

Значения ширины ЭПП ЭМИ четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией и содержащих алюминиевую стружку, составляют ~ 69,0 %, ~ 136,0 % и ~ 140,0 %, если диаметр элементов, сформированных из обозначенной стружки и входящих в их структуру, составляет соответственно 3,0 см, 6,0 см и 9,0 см. Следовательно, эти экраны являются широкополосными частотно-селективными поглотителями ЭМИ. Таким образом, при увеличении с 3,0 до 6,0 или 9,0 см ширины элементов, сформированных из алюминиевой стружки и входящих в структуру четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией, можно обеспечить увеличение в 2,0 раза ширину их эффективной ширины полосы поглощения, что обусловлено увеличением в 2,0 или 4,5 раза количества содержащейся в этом слое алюминиевой стружки, обеспечивающей поглощение энергии ЭМИ [223].

Из рисунка 4.11 также видно, что характеристики поглощения ЭМИ в эффективных полосах поглощения рассматриваемых образцов электромагнитных экранов имеют максимумы. Характеристика поглощения ЭМИ в эффективной полосе поглощения образцов электромагнитных экранов, в структуру которых входят сформированные из алюминиевой стружки элементы, диаметр которых 3,0 см, имеет два максимума. Значения точек этих максимумов – 7,0 ГГц и 11,0 ГГц, значения этих максимумов – 0,85 отн. ед. и 0,68 отн. ед. соответственно. Характеристики поглощения ЭМИ в эффективной полосе поглощения образцов электромагнитных экранов, в структуру которых входят сформированные из алюминиевой стружки элементы, диаметр которых 6,0 и 9,0 см, имеют три максимума. Значения

точек максимума этих характеристик – 3,5 ГГц, 7,0 ГГц и 11,0 ГГц. Значения соответствующих этим точкам максимумов у характеристики поглощения ЭМИ образцов первых из вышеобозначенных образцов экранов – 0,82 отн. ед., 0,9 отн. ед., 0,8 отн. ед., а у характеристики поглощения ЭМИ образцов вторых из вышеобозначенных образцов экранов – 0,78 отн. ед., 0,94 отн. ед., 0,88 отн. ед. Максимумы характеристики поглощения ЭМИ изготовленных образцов обусловлены резонансным снижением коэффициента отражения ЭМИ последних на частотах, равных значениям точек максимума (рисунок 4.12).

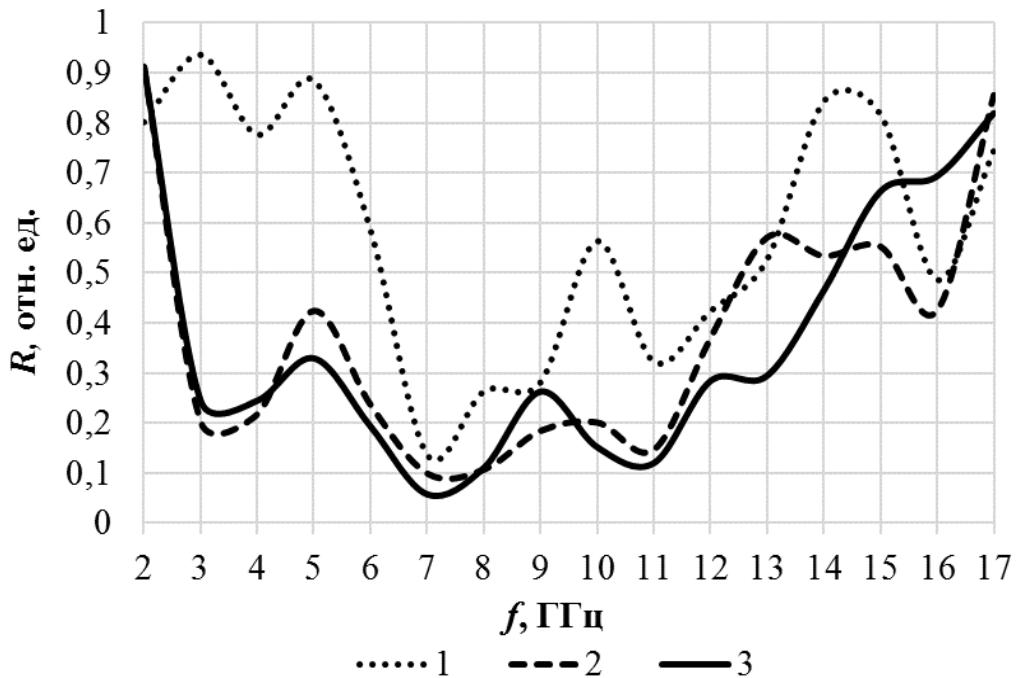


Рисунок 4.12 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией и содержащих алюминиевую стружку (диаметр элементов, сформированных из алюминиевой стружки – 3,0 см (кривая 1), 6,0 см (кривая 2), 9,0 см (кривая 3))

Из рисунка 4.12 видно, что образцы электромагнитных экранов, в структуру которых входят сформированные из алюминиевой стружки элементы, диаметр которых 3,0 см, обеспечивают резонансное снижение энергии отражаемого от них ЭМИ на частотах 7,0 ГГц и 11,0 ГГц, а образцы электромагнитных экранов, в структуру которых входят сформированные из алюминиевой стружки элементы, диаметр которых 6,0 и 9,0 см, обеспечивают резонансное снижение энергии отражаемого от них ЭМИ на частотах 3,5 ГГц, 7,0 ГГц и 11,0 ГГц. Это явление обусловлено тем, что перечисленным частотам соответствуют наибольшие значения разности между фазой ЭМИ, отраженного от поверхностей элементов из алюминиевой стружки, входящих в структуру второго слоя рассматриваемых экранов, и фазой ЭМИ, отраженного от поверхности фольгированной полимерной пленки, на основе которой сформирован четвертый слой этих экранов [224].

Среднее значение коэффициента поглощения ЭМИ в эффективной полосе поглощения образцов электромагнитных экранов, в структуру которых входят сформированные из алюминиевой стружки элементы, диаметр которых 3,0 см, составляет 0,64 отн. ед., а образцов поглотителей электромагнитных экранов, в структуру которых входят сформированные из алюминиевой стружки элементы, диаметр которых 6,0 и 9,0 см – 0,73 отн. ед. и 0,79 отн. ед. соответственно. Более низкие значения коэффициента поглощения ЭМИ третьих из обозначенных образцов экранов по сравнению с первым и вторым обозначенными образцами экранов обусловлено их более низкими значениями коэффициента отражения ЭМИ. Это связано со следующими особенностями.

1. Четырехслойные электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с разработанной технологией и содержащие алюминиевую стружку, могут быть условно разделены на элементарные многослойные ячейки, в структуру второго слоя каждой из которых входит один элемент из алюминиевой стружки и зазор между этим элементом и соседним к нему.

2. Эквивалентом элемента из алюминиевой стружки является совокупность катушек индуктивности, соединенных параллельно друг с другом (количество катушек индуктивности соответствует количеству стружки), эквивалентом зазора между этим элементом и соседним к нему является конденсатор, соединенный с указанными катушками последовательно [25, с. 66] (емкость конденсатора прямо пропорциональна отношению толщины элемента к расстоянию между этим элементом и соседним к нему [23]), а эквивалентом фрагмента фольгированного полимерного материала является резистор [23] (см. рисунок 4.13; использованный на рисунке 4.13 индекс «*n*» соответствует количеству алюминиевой стружки, содержащейся в сформированном из нее элементе, входящем в структуру второго слоя элементарной многослойной ячейки электромагнитного экрана).

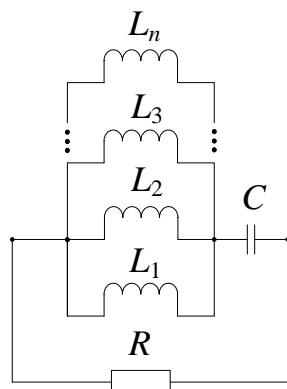


Рисунок 4.13 – Эквивалентная электрическая схема элементарной многослойной ячейки четырехслойного электромагнитного экрана СВЧ-диапазона, изготовленного в соответствии с разработанной технологией и содержащего алюминиевую стружку

3. Увеличение размера элемента из алюминиевой стружки, входящего в структуру второго слоя элементарной многослойной ячейки электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с разработанной технологией, обуславливает уменьшение суммарной емкости катушек индуктивности, соединенных параллельно друг с другом и входящих в эквивалентную электрическую схему этой ячейки ($L_{\text{сум}}$), что связано с увеличением количества алюминиевой стружки. Это видно из нижепредставленной формулы (4.5), используемой для расчета суммарной емкости катушек индуктивности, соединенных параллельно друг с другом:

$$\frac{1}{L_{\text{сум}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}. \quad (4.5)$$

4. Уменьшение суммарной емкости катушек индуктивности, входящих в эквивалентную электрическую схему элементарной многослойной ячейки электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с разработанной технологией, обуславливает уменьшение волнового сопротивления этой ячейки (Z_{in}), что видно из нижепредставленной формулы (4.6) [23]:

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{2\pi f L_{\text{сум}}} + \frac{1}{R}. \quad (4.6)$$

5. Уменьшение волнового сопротивления элементарной многослойной ячейки электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с разработанной технологией, обуславливает уменьшение волнового сопротивления этого экрана в целом, что в свою очередь обуславливает снижение значения его коэффициента отражения ЭМИ. Это видно из нижепредставленной формулы (4.7) [23]:

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} = 1 - \frac{2Z_0}{Z_{in} + Z_0}, \quad (4.7)$$

где Z_0 – волновое сопротивление воздуха.

Таким образом, при увеличении с 3,0 до 6,0 или 9,0 см ширины элементов, образующих второй слой четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией и содержащих алюминиевую стружку, можно обеспечить увеличение с двух до трех количества точек максимума их характеристик поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц, что обусловлено возникновением эффекта резонансного снижения энергии отражаемого от этих экранов ЭМИ на частоте 3,5 ГГц. Кроме того, при увеличении с 3,0 до 6,0 или 9,0 см

ширины элементов, образующих второй слой обозначенных экранов можно обеспечить увеличение соответственно на 0,09 отн. ед. или 0,15 отн. ед. среднего значения их коэффициента поглощения ЭМИ в эффективной полосе поглощения, что обусловлено снижением волнового сопротивления этих поглотителей за счет увеличения в 2,0 или 4,5 раза количества содержащейся в указанном слое алюминиевой стружки, эквивалентом которой является совокупность катушек индуктивности, соединенных параллельно друг с другом.

Следует отметить, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц четырехслойных электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией и содержащих алюминиевую стружку, на 0,05–0,4 отн. ед. выше, чем значения коэффициента поглощения ЭМИ в этом диапазоне частот электромагнитных экранов, изготовленных путем прессования двух одинаковых фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала и дальнейшего закрепления фрагмента фольгированной полимерной пленки на одной из поверхностей полученной в результате этого структуры (рисунок 4.14).

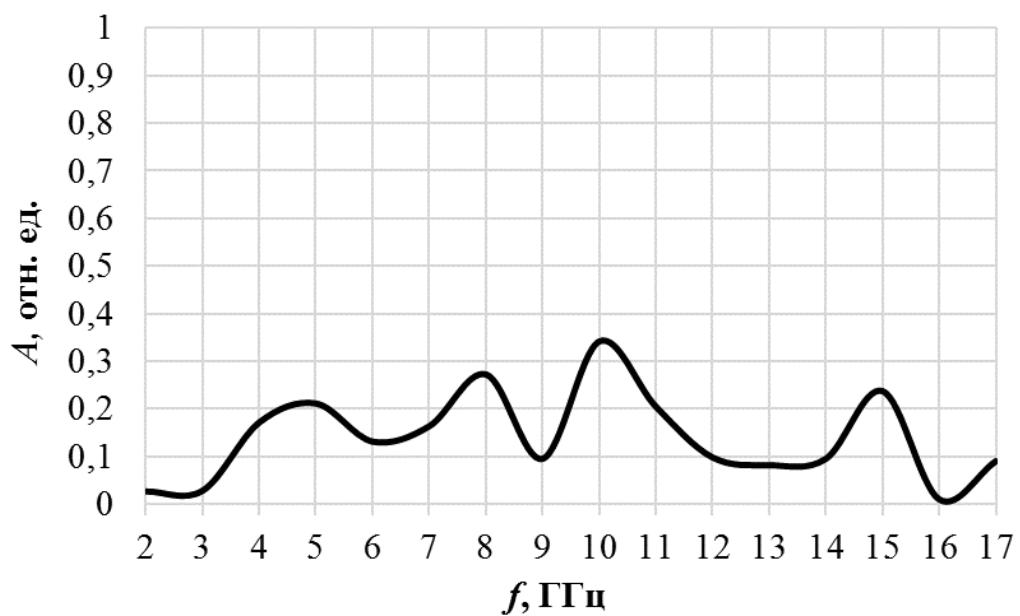


Рисунок 4.14 – Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образца поглотителя, содержащего два спрессованных фрагмента синтетического нетканого волокнистого материала и фрагмент фольгированной полимерной пленки

Следует отметить, что были проведены исследования, направленные на экспериментальное обоснование возможности изготовления широкополосных частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе алюминиевой стружки и гипсового связующего вещества. Результаты этих исследований представлены в работе [225]. На рисунке 4.15 представлена частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойных электромагнитных экранов, первый слой которых

сформирован из смеси взятых в равных объемных долях алюминиевой стружки и гипсового связующего вещества, а второй слой – из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки. Как видно из рисунка 6.28, диапазон ЭПП ЭМИ обозначенных экранов – 5,2–17,0 ГГц, т. е. ширина ЭПП ЭМИ таких экранов 106,3 %. Следовательно, такие экраны являются широкополосными частотно-селективными поглотителями ЭМИ.

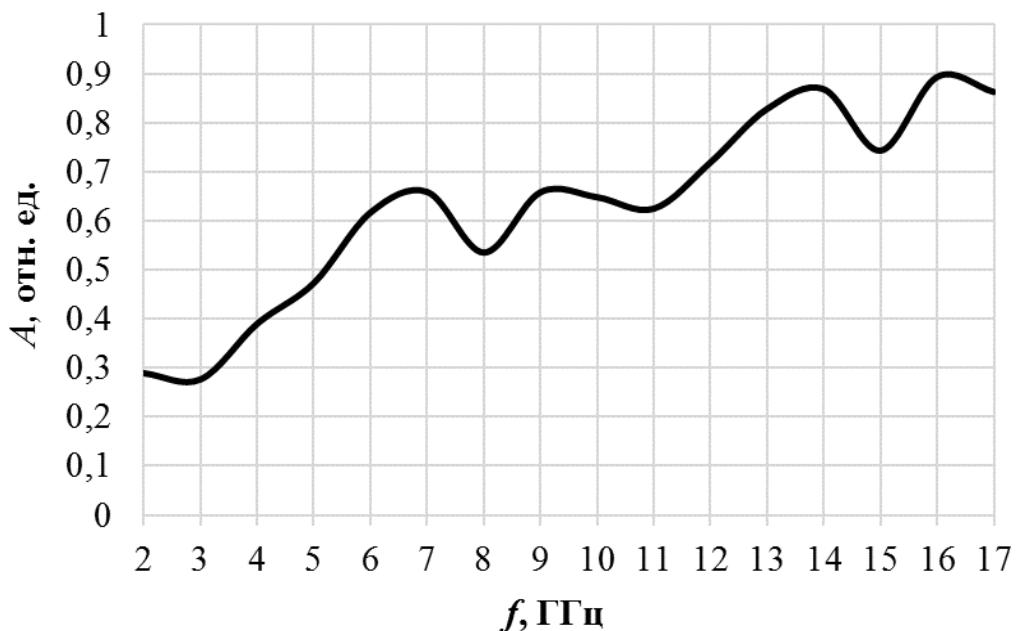


Рисунок 4.15 – Частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного из алюминиевой стружки, гипса и алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

4.5 Комбинированные экраны на основе модифицированного порошкообразного активированного древесного угля и алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

С учетом результатов исследования электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями, представленными в разделах 4.1–4.4 и статьях [226–230], разработаны технологии изготовления комбинированных электромагнитных экранов на основе модифицированных порошкообразного активированного древесного угля и алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки. Цель разработки таких технологий – усовершенствование способов расширения ЭПП ЭМИ электромагнитных экранов на основе модифицированного порошкообразного активированного древесного угля.

Разработанные технологии могут быть условно разделены на две группы:

1) технологии, в рамках которых не предполагается использование связующих веществ;

2) технологии, в рамках которых предполагается использование связующих веществ.

Общее количество разработанных технологий – 6 (по три в каждой из вышеобозначенных групп).

Первая из технологий первой группы (далее по тексту раздела – технология 1.1) включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого слоя электромагнитного экрана.

1.1. Откраивание от рулона синтетического нетканого волокнистого материала двух одинаковых фрагментов, длина, ширина и форма которых определяются требованиями к длине, ширине и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

1.2. Определение количества объемных спиралевидных элементов, которые должны быть сформированы на основе формулы (4.1) при условии, что диаметр этих элементов составляет 6,0 см, а шаг их размещения – 1,0 см.

1.3. Откраивание от рулона алюминиевой фольги одинаковых фрагментов прямоугольной формы для формирования объемных спиралевидных элементов с учетом следующих условий:

– длина и ширина каждого фрагмента – 20,0 см и 5,0 см соответственно;

– количество фрагментов должно быть эквивалентно значению, рассчитанному по формуле (4.1).

1.4. Формирование одинаковых объемных спиралевидных элементов из фрагментов алюминиевой фольги, полученных в результате реализации операции 1.3, с использованием пластины-трафарета, содержащей углубления, форма которых повторяет форму классической спирали Архимеда, диаметр которой – 6,0 см, расстояние между витками которой – 1,5 см, толщина витков которой – 0,3 см.

1.5. Распределение объемных спиралевидных элементов, сформированных в результате реализации операции 1.4, с шагом 1,0 см на поверхности одного из фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала, откроенных в результате реализации операции 1.1.

1.6. Размещение второго из фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала, откроенных в результате реализации операции 1.1, поверх совокупности объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги, сформированной в результате реализации операции 1.5.

1.7. Термопрессование конструкции, полученной в результате реализации операций 1.1–1.6, при температуре $\sim 250,0^{\circ}\text{C}$ (т. е. при температуре, соответствующей температуре плавления синтетического нетканого волокнистого материала) в течение 10,0 мин.

2. Формирование второго слоя электромагнитного экрана.

2.1. Откраивание от рулона самоклеящейся полимерной пленки двух одинаковых фрагментов, габаритные размеры и форма которых определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

2.2. Получение порошкообразного активированного угля, пропитанного водным раствором электролита (хлорида кальция или натрия), с учетом следующих условий:

– для формирования $1,0 \text{ м}^2$ электромагнитного экрана нужно $850,0 \text{ мл}$ порошкообразного активированного древесного угля;

– объем водного раствора электролита для пропитывания частиц порошкообразного активированного древесного угля объемом $850,0 \text{ мл}$ – не менее $2000,0 \text{ мл}$.

2.2.1. Приготовление водного раствора электролита (концентрация – $35,0 \pm 1,0 \%$) в объеме, необходимом для изготовления электромагнитного экрана требуемого размера.

2.2.2. Погружение в пустую емкость частиц порошкообразного активированного древесного угля в объеме, необходимом для изготовления электромагнитного экрана требуемого размера.

2.2.3. Переливание приготовленного водного раствора электролита в емкость, в которую погружены частицы порошкообразного активированного древесного угля.

2.2.4. Смешивание перелитого водного раствора электролита и частиц порошкообразного активированного древесного угля.

2.2.5. Отделение из смеси, полученной в результате реализации операции 2.2.4, частиц порошкообразного активированного древесного угля, пропитанных водным раствором электролита.

2.3. Равномерное распределение слоем толщиной $0,3 \pm 0,1 \text{ см}$ частиц порошкообразного активированного угля, пропитанного водным раствором электролита, по поверхности клеевого слоя одного из фрагментов самоклеящейся полимерной пленки, откроенных в результате реализации операции 1.1, таким образом, чтобы по периметру этого фрагмента оставалось поле шириной $1,0 \pm 0,1 \text{ см}$, свободное от этих частиц порошкообразного активированного угля.

2.4. Размещение второго из фрагментов самоклеящейся полимерной пленки, откроенных в результате реализации операции 2.1, клеящейся стороной поверх слоя распределенных частиц порошкообразного активированного угля, пропитанного водным раствором электролита, на фрагменте, полученном в результате реализации операции 2.3, таким образом, чтобы границы этих фрагментов совпадали.

3. Формирование третьего слоя электромагнитного экрана путем откраивания от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки фрагмента, габаритные размеры и форма которых определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

4. Закрепление с помощью распыляемого клея на одной из поверхностей второго слоя, сформированного в результате реализации операции 2, первого слоя, сформированного в результате реализации

операции 1, а на другой поверхности второго слоя – третьего слоя, сформированного в результате реализации операции 3.

Вторая из технологий первой группы (далее по тексту раздела – технология 1.2) включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого слоя электромагнитного экрана.

1.1. Откраивание от рулона фольгированной полимерной пленки фрагментов с учетом следующих условий:

– длина каждого фрагмента равна длине изготавливаемого электромагнитного экрана;

– ширина каждого фрагмента – 10,0 см;

– количество фрагментов должно быть рассчитано на основе формулы (4.2).

1.2. Клеевое соединение двух противоположных краев большего размера у каждого из фрагментов, полученных в результате реализации операции 1.1.

1.3. Надрезание с шагом 0,9 см каждого из элементов, полученных в результате реализации операций 1.1, 1.2, с помощью измельчителя для бумаги.

1.4. Откраивание от рулона радиопрозрачной полимерной пленки (если изготавливаемый экран должен характеризоваться свойством гибкости) или от листа гофрокартона (если изготавливаемый экран должен характеризоваться свойством жесткости) фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

1.5. Закрепление совокупностей объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, полученных в результате реализации операций 1.3–1.4, на одной из поверхностей фрагмента, откроенного в результате реализации операции 1.4.

2. Формирование второго и третьего слоев электромагнитного экрана путем поочередной реализации операций 2 и 3 соответственно вышеописанной технологии 1.1.

3. Реализация операции 4 вышеописанной технологии 1.1.

Третья из технологий первой группы (далее по тексту раздела – технология 1.3) включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого слоя электромагнитного экрана.

1.1. Откраивание от рулона алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки одинаковых фрагментов для формирования объемных элементов в виде лент Мебиуса с учетом следующих условий:

– длина каждого фрагмента пленки – 5,0 см;

– ширина каждого фрагмента пленки – 0,5 см;

– количество фрагментов должно быть должно быть рассчитано на основе формулы (4.3) при условии, что шаг размещения обозначенных элементов 1,0 см.

1.2. Формирование объемных элементов в виде лент Мебиуса из фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, откроенных в ходе реализации операции 1.1.

1.3. Откраивание от рулона радиопрозрачной полимерной пленки (если изготавливаемый экран должен характеризоваться свойством гибкости) или от листа гофрокартона (если изготавливаемый экран должен характеризоваться свойством жесткости) фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

1.4. Закрепление с шагом 1,0 см объемных элементов в виде лент Мебиуса, сформированных в ходе реализации операции 1, на одной из поверхностей фрагмента, откроенного в ходе реализации операции 2, с учетом того, что указанные элементы должны быть расположены под углом 45° по отношению к поверхности указанного фрагмента.

2. Формирование второго и третьего слоев электромагнитного экрана путем поочередной реализации операций 2 и 3 соответственно вышеописанной технологии 1.1.

3. Реализация операции 4 вышеописанной технологии 1.1.

Первая из технологий второй группы (далее по тексту раздела – технология 2.1) включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого слоя электромагнитного экрана путем реализации операций 1.1–1.7 вышеописанной технологии 1.1 (при реализации операции 1.4 – выполнение откраивания от рулона радиопрозрачной полимерной пленки фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана).

2. Формирование второго слоя электромагнитного экрана.

2.1. Откраивание от рулона самоклеящейся полимерной пленки двух одинаковых фрагментов, габаритные размеры и форма которых определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана.

2.2. Получение порошкообразного активированного угля, пропитанного водным раствором электролита (хлорида кальция или магния), с учетом того, что для формирования слоя электромагнитного экрана площадью 1,0 м² нужно 1200,0 мл порошкообразного активированного древесного угля и не менее 2800,0 мл водного раствора электролита.

2.2.1. Приготовление водного раствора электролита (концентрация – 35,0±1,0 %) в объеме, необходимом для изготовления электромагнитного экрана требуемого размера.

2.2.2. Погружение в пустую емкость частиц порошкообразного активированного древесного угля в объеме, необходимом для изготовления электромагнитного экрана требуемого размера.

2.2.3. Переливание приготовленного водного раствора электролита в емкость, в которую погружены частицы порошкообразного активированного древесного угля.

2.2.4. Смешивание перелитого водного раствора электролита и частиц порошкообразного активированного древесного угля.

2.2.5. Отделение из смеси, полученной в результате реализации операции 1.2.4, частиц порошкообразного активированного древесного угля, пропитанных водным раствором электролита.

2.3. Смешивание порошкообразного активированного угля, пропитанного водным раствором электролита и полученного в результате реализации операции 1.2, с гипсом и водой в объемном соотношении 2:3:10.

2.4. Равномерное механическое нанесение слоем толщиной $0,5\pm0,1$ см смеси, полученной в результате реализации операции 2.3, на поверхность клеевого слоя одного из фрагментов самоклеящейся полимерной пленки, откроенных в результате реализации операции 2.1, таким образом, чтобы по периметру этого фрагмента оставалось поле шириной $1,0\pm0,1$ см, свободное от этой смеси.

2.5. Атмосферная сушка смеси, нанесенной в результате реализации операции 2.4.

2.6. Размещение второго из фрагментов самоклеящейся полимерной пленки, откроенных в результате реализации операции 2.1, клеящейся стороной поверх слоя смеси, высушенной в результате реализации операции 2.5.

3. Формирование третьего слоя электромагнитного экрана путем реализации операции 3 вышеописанной технологии 1.1.

4. Закрепление с помощью распыляемого клея на одной из поверхностей второго слоя, сформированного в результате реализации операции 2, первого слоя, сформированного в результате реализации операции 1, а на другой поверхности второго слоя – третьего слоя, сформированного в результате реализации операции 3.

Вторая из технологий второй группы (далее по тексту раздела – технология 2.2) включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого слоя электромагнитного экрана путем реализации операций 1.1–1.5 вышеописанной технологии 1.2 (при реализации операции 1.4 – выполнение откраивания от рулона радиопрозрачной полимерной пленки фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана).

2. Формирование второго слоя электромагнитного экрана путем реализации операций 2.1–2.6 вышеописанной технологии 2.1.

3. Формирование третьего слоя электромагнитного экрана путем реализации операции 3 вышеописанной технологии 1.1.

4. Реализация операции 4 вышеописанной технологии 2.1.

Третья из технологий второй группы (далее по тексту раздела – технология 2.3) включает в себя следующие операции.

1. Формирование первого слоя электромагнитного экрана путем реализации операций 1.1–1.4 вышеописанной технологии 1.3 ((при реализации операции 1.3 – выполнение откраивания от рулона радиопрозрачной полимерной пленки фрагмента, габаритные размеры и форма которого определяются требованиями к габаритным размерам и форме изготавливаемого электромагнитного экрана)).

2. Формирование второго слоя электромагнитного экрана путем реализации операций 2.1–2.6 вышеописанной технологии 2.1.

3. Формирование третьего слоя электромагнитного экрана путем реализации операции 3 вышеописанной технологии 1.1.

4. Реализация операции 4 вышеописанной технологии 2.1.

Таким образом, электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с вышепредставленными технологиями, являются трехслойными. Первый (наружный) слой этих экранов изготовлен на основе модифицированной алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, второй – на основе модифицированного порошкообразного активированного древесного угля, третий – на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки.

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1, 1.2 и 1.3 на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, представлены на рисунке 4.16.

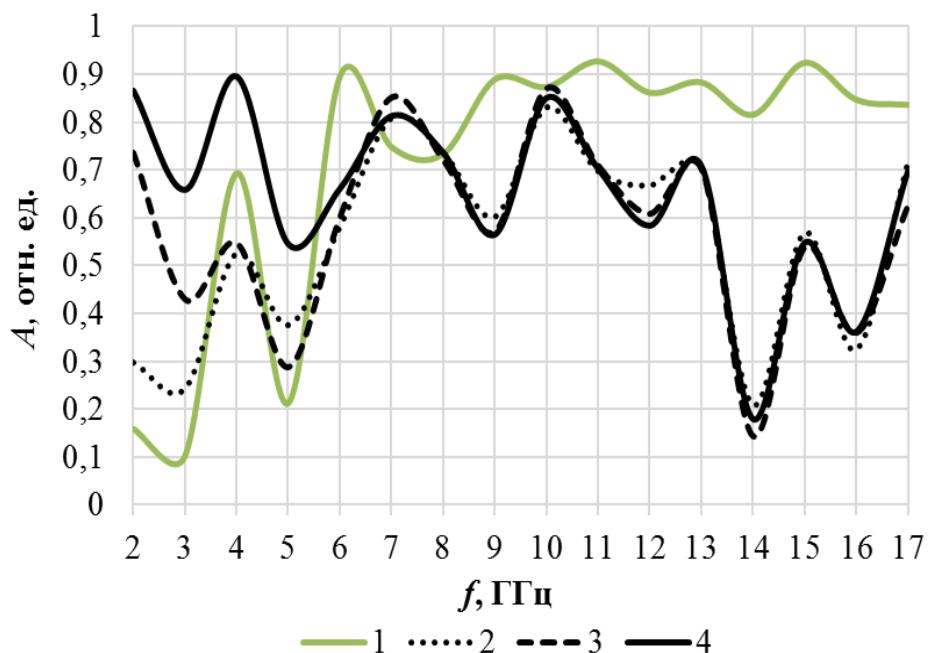


Рисунок 4.16 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция (кривая 1), и электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1, 1.2 и 1.3 на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция (кривые 2, 4 и 3 соответственно)

Как видно из рисунка 4.16, значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1, 1.2 и 1.3, изменяются в пределах от 0,25 отн. ед. до 0,8 отн. ед. Значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–5,0 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1 и 1.2, ниже соответственно на 0,05–0,4 отн. ед. и на 0,05–0,2 отн. ед., чем значения коэффициента поглощения ЭМИ в указанном диапазоне частот электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологией 1.3. Это обусловлено тем, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–5,0 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1 и 1.2, превышают соответственно на 0,05–0,55 отн. ед. и на 0,05–0,2 отн. ед. значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот (рисунок 4.17).

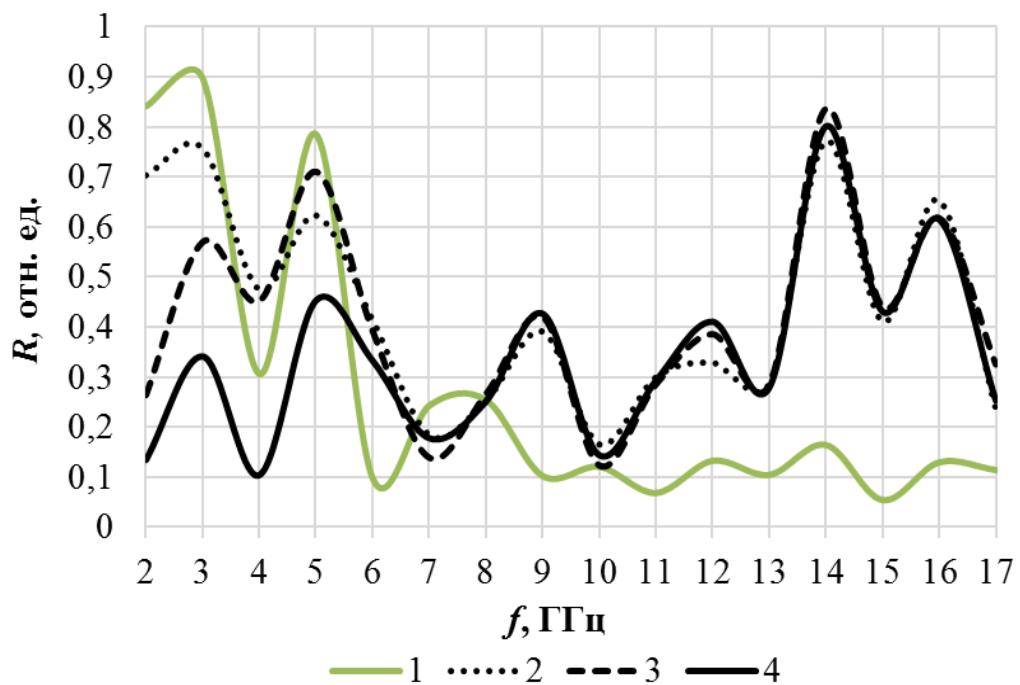


Рисунок 4.17 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция (кривая 1), и электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1, 1.2 и 1.3 на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция (кривые 2, 4 и 3 соответственно)

Кроме того, значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–5,5 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологией 1.3, превышают на 0,05–0,55 отн. ед. значения коэффициента поглощения ЭМИ в указанном диапазоне частот двухслойных

электромагнитных экранов, изготовленных на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция. Это обусловлено тем, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–5,5 ГГц вторых из вышеуказанных экранов превышают на 0,05–0,55 отн. ед. значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот первых из вышеуказанных экранов (см. рисунок 4.17).

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1, 1.2 и 1.3 на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида натрия, представлены на рисунке 4.18.

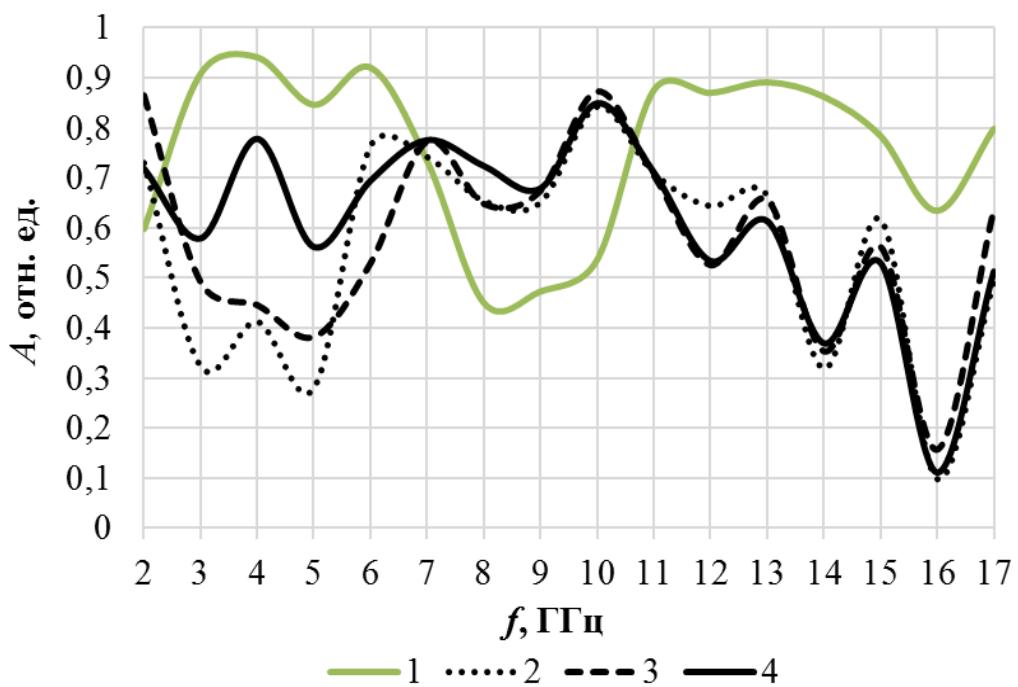


Рисунок 4.18 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с технологией, представленной на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида натрия (кривая 1), и электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1, 1.2 и 1.3 на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида натрия (кривые 2, 4 и 3 соответственно)

Как видно из рисунка 4.18, значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 7,0–10,5 ГГц обозначенных электромагнитных экранов превышают на 0,05–0,35 отн. ед. значения коэффициента поглощения ЭМИ в указанном диапазоне частот электромагнитных экранов, изготовленных на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида натрия. Это обусловлено тем, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 7,0–10,5 ГГц вторых

из вышеуказанных экранов превышают на 0,05–0,3 отн. ед. значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот первых из вышеуказанных экранов (рисунок 4.19).

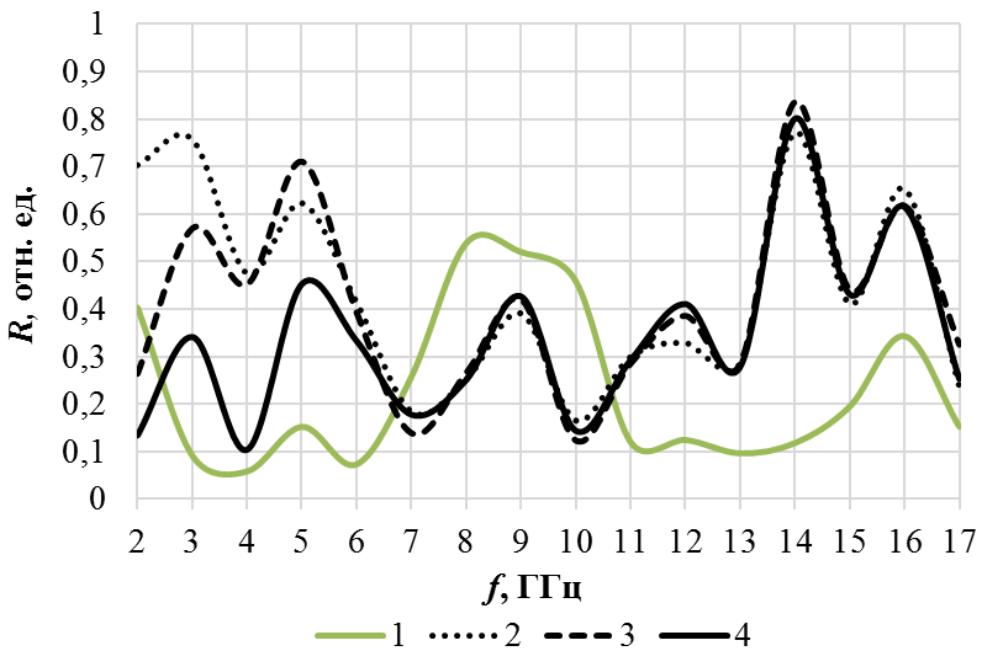


Рисунок 4.19 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида натрия (кривая 1), и электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1, 1.2 и 1.3 на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида натрия (кривые 2, 4 и 3 соответственно)

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 2.1, 2.2 и 2.3 на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, и гипсового связующего вещества представлены на рисунке 4.20. Как видно из рисунка 4.20, значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–10,5 ГГц обозначенных электромагнитных экранов превышают на 0,05–0,5 отн. ед. значения коэффициента поглощения ЭМИ в указанном диапазоне частот электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологией, представленной в подразделе 6.1.2, на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, и гипсового связующего вещества. Это обусловлено тем, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–10,5 ГГц вторых из вышеуказанных экранов превышают на 0,05–0,7 отн. ед. значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот первых из вышеуказанных экранов (рисунок 4.21).

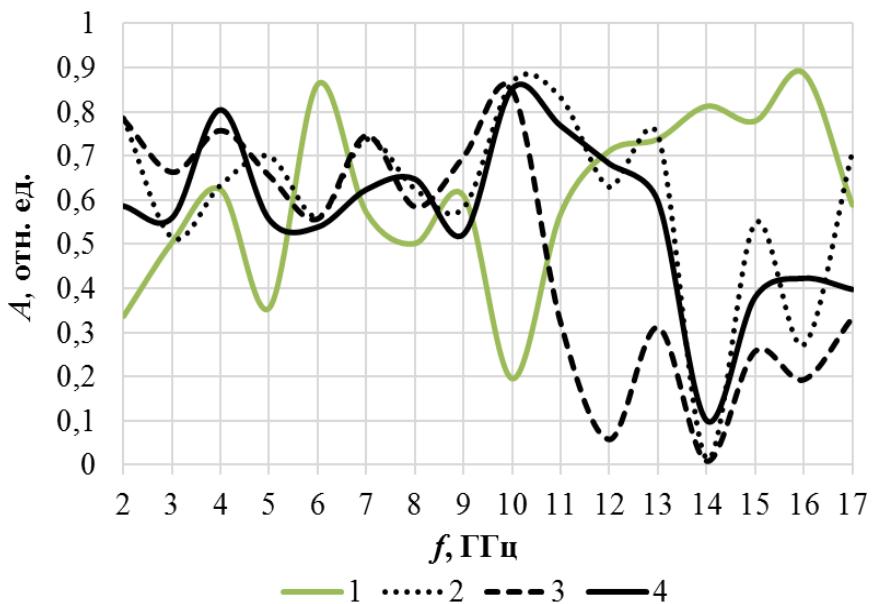


Рисунок 4.20 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, и гипсового связующего вещества (кривая 1), и электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 2.1, 2.2 и 2.3 (кривые 2, 4 и 3 соответственно)

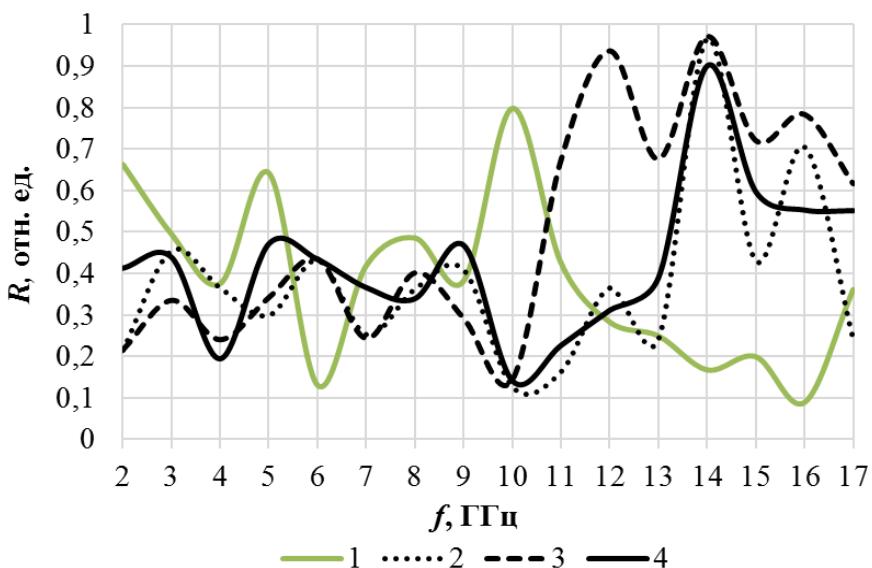


Рисунок 4.21 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, и гипсового связующего вещества (кривая 1), и электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 2.1, 2.2 и 2.3 (кривые 2, 4 и 3 соответственно)

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 2.1, 2.2 и 2.3 на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида магния, и гипсового связующего вещества представлены на рисунке 4.22.

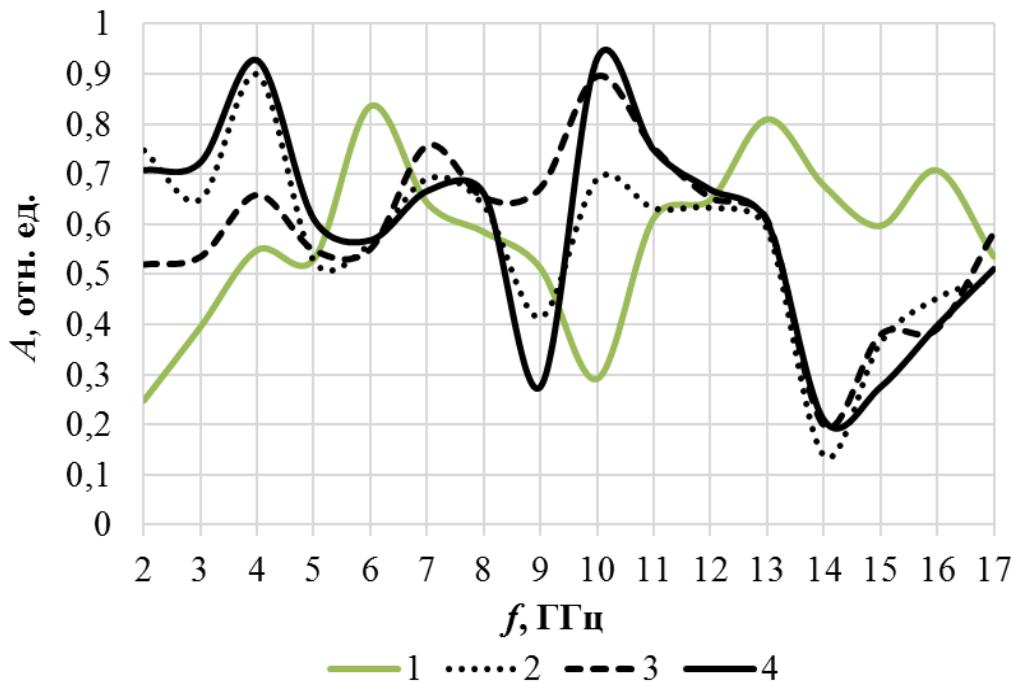


Рисунок 4.22 – Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида магния, и гипсового связующего вещества (кривая 1), и электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 2.1, 2.2 и 2.3 (кривые 2, 4 и 3 соответственно)

Как видно из рисунка 4.22, значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазонах частот 2,0–5,0 ГГц, 7,0–8,0 ГГц и 9,0–12,0 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 2.1 и 2.3, превышают на 0,05–0,65 отн. ед. значения коэффициента поглощения ЭМИ в указанных диапазонах частот электромагнитных экранов, изготовленных на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида магния, и гипсового связующего вещества. Из рисунка 4.22 также видно, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазонах частот 2,0–5,0 ГГц и 7,0–12,0 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологией 2.2, превышают на 0,05–0,6 отн. ед. значения коэффициента поглощения ЭМИ в указанных диапазонах частот электромагнитных экранов, изготовленных на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида магния, и гипсового связующего вещества. Это обусловлено тем, что значения коэффициента отражения ЭМИ

в диапазонах частот 2,0–5,0 ГГц, 7,0–8,0 ГГц и 9,0–12,0 ГГц вторых из вышеуказанных экранов превышают на 0,05–0,6 отн. ед. значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот первых из вышеуказанных экранов (рисунок 4.23).

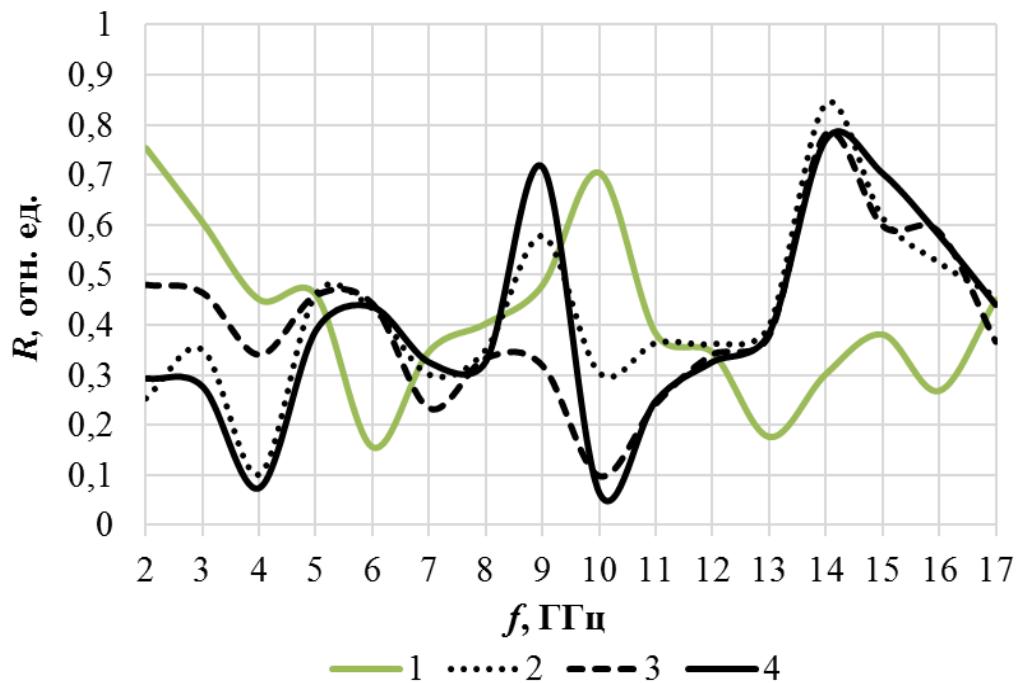


Рисунок 4.23 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц двухслойного электромагнитного экрана, изготовленного на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида магния, и гипсового связующего вещества (кривая 1), и электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с технологиями 1.1, 1.2 и 1.3 (кривые 2, 4 и 3 соответственно)

Большая часть электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с представленными в настоящем разделе технологиями, по сравнению с некомбинированными электромагнитными экранами, изготовленными на основе порошкообразных активированных древесных углей, пропитанных водными растворами электролитов (хлорида кальция, магния или натия), характеризуются более широкими ЭПП ЭМИ (таблица 4.5).

Стоимость материалов для изготовления 1,0 м² экранов в соответствии с технологией 1.1 составляет 70,0 белорусских рублей, технологиями 1.2 и 1.3 – 30,0 белорусских рублей, технологией 2.1 – 80,0 белорусских рублей, технологиями 2.2 и 2.3 – 40,0 белорусских рублей.

Таблица 4.5 – Характеристики электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с представленными технологиями

Краткое описание электромагнитных экранов	ЭПП ЭМИ	Ширина ЭПП, ГГц
1	2	3
Двухслойные экраны, изготовленные на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция	3,5–4,5 ГГц 5,5–17,0 ГГц	1,0 11,5
Двухслойные экраны, изготовленные на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида натрия	2,0–7,5 ГГц; 10,0–17,0 ГГц	5,5 7,0
Экраны, изготовленные в соответствии с представленными в настоящем разделе технологиями 1.1, 1.2 и 1.3 с использованием водного раствора хлорида кальция	5,5–13,5 ГГц	8,0
Экраны, изготовленные в соответствии с представленной в настоящем разделе технологией 1.1 с использованием водного раствора хлорида натрия	2,0–2,5 ГГц 5,5–13,5 ГГц	0,5 8,0
Экраны, изготовленные в соответствии с представленной в настоящем разделе технологией 1.2 с использованием водного раствора хлорида натрия	2,0–3,0 ГГц 6,0–13,5 ГГц	1,0 7,5
Экраны, изготовленные в соответствии с представленной в настоящем разделе технологией 1.3 с использованием водного раствора хлорида натрия	2,0–13,5 ГГц	11,5
Двухслойные экраны, изготовленные на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, и гипсового связующего вещества	3,5–9,0 ГГц 10,5–17,0 ГГц	5,5 6,5
Двухслойные экраны, изготовленные на основе порошкообразного активированного древесного угля, пропитанного водным раствором хлорида магния, и гипсового связующего вещества	3,0–4,5 ГГц 5,5–9,5 ГГц 11,0–17,0 ГГц	0,5 4,0 6,0
Экраны, изготовленные в соответствии с представленной в настоящем разделе технологией 2.1 с использованием водного раствора хлорида кальция	2,0–13,5 ГГц	11,5

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3
Экраны, изготовленные в соответствии с представленной в настоящем разделе технологией 2.2 с использованием водного раствора хлорида кальция	2,0–10,8 ГГц	8,8
Экраны, изготовленные в соответствии с представленной в настоящем разделе технологией 2.3 с использованием водного раствора хлорида кальция	2,0–13,2 ГГц	11,2
Экраны, изготовленные в соответствии с представленными в настоящем разделе технологиями 2.1 и 2.3 с использованием водного раствора хлорида магния	2,0–8,5 ГГц 9,5–13,0 ГГц	6,5 3,5
Экраны, изготовленные в соответствии с представленной в настоящем разделе технологией 2.2 с использованием водного раствора хлорида магния	2,0–13,2 ГГц	11,2

4.6 Оборудование и оснастка для изготовления экранов

Предложена установка для модификации порошкообразного активированного древесного угля (т. е. для получения угля, пропитанного водным раствором электролита, или угля, содержащего частицы мелкодисперсного материала, характеризующегося магнитными свойствами, или никельсодержащего угля). Эта установка включает в себя (рисунок 4.24):

- станину, изготовленную из деревянных брусков;
- емкость с крышкой, изготовленную из полипропилена (устанавливается на станину) и оснащенную сливным отверстием;
- тэн, изготовленный из нержавеющей стали;
- терморегулятор (устанавливается в трубку тэна);
- четырехлопастную мешалку (закрепляется на крышке емкости).

Для откравания фрагментов самоклеящейся полимерной пленки, фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала или фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки при изготовлении в соответствии с разработанными технологиями электромагнитных экранов предложено использовать станок для плазменной резки с числовым программным управлением (по ГОСТ 14792-80).



Рисунок 4.24 – Внешний вид сбоку предложенной и разработанной установки для модификации порошкообразного активированного древесного угля

Для формирования элементов из модифицированного порошкообразного активированного древесного угля на поверхности фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала при изготовлении в соответствии с разработанными технологиями электромагнитных экранов без использования связующих веществ предложено использовать трафареты, характеризующиеся следующими свойствами:

- ячейки трафарета характеризуются одинаковыми размером и формой и распределены с одинаковым шагом;
- шаг распределения ячеек трафарета (S) удовлетворяет условию (1.11);
- ячейки трафарета характеризуются круглой или квадратной формой;
- ширина ячеек трафарета (W) удовлетворяет условию (1.10).

Предложено применять весовой дозатор дискретного действия FZ-100 (производитель – компания «Hualian Machinery», Китайская Народная Республика) [231]:

- при распределении частиц модифицированного порошкообразного активированного древесного угля по поверхностям клеевых слоев фрагментов самоклеящейся полимерной пленки при изготовлении в соответствии с разработанными технологиями электромагнитных экранов без использования связующих веществ;
- для заполнения ячеек вышепредставленного трафарета модифицированным порошкообразным активированным древесным углем при изготовлении

в соответствии с разработанными технологиями электромагнитных экранов без использования связующих веществ.

Предложено применять штукатурную станцию ШС-4/6-4 (производитель – завод Ремстройдормаш, Российская Федерация) [232] для:

– нанесения смеси порошкообразного активированного угля, пропитанного водным раствором электролита, гипса и воды на поверхности фрагментов самоклеящейся полимерной пленки при изготовлении в соответствии с разработанными технологиями электромагнитных экранов с использованием гипсового связующего вещества;

– нанесения смеси порошкообразного алюмооксида или диоксида титана и огнезащитного состава или смеси сульфата бария и водного щелочного раствора силиката натрия на поверхности фрагментов крафт-бумаги пленки при изготовлении в соответствии с разработанными технологиями электромагнитных экранов с использованием гипсового связующего вещества и указанных смесей.

Предложено применять пневматический дозатор для вязких жидкостей типа ДПВЖ (производитель – ООО «Насосы Ампика», Российская Федерация) [233] при изготовлении гибких электромагнитных экранов с использованием дилатантного связующего вещества.

Для формирования одинаковых объемных спиралевидных элементов из фрагментов алюминиевой фольги при изготовлении в соответствии с разработанными технологиями электромагнитных экранов, содержащих такие элементы, предложено использовать пластину-трафарет с углублениями форма которых повторяет форму классической спирали Архимеда со следующими параметрами:

- диаметр – 6,0 см;
- расстояние между витками – 1,5 см;
- толщина витков – 0,3 см.

Обоснование перечисленных параметров представлено в разделе 3.1.

Для откравания фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки при изготовлении в соответствии с разработанными технологиями электромагнитных экранов, содержащих объемные элементы в виде лент Мебиуса, предложено использовать вместо станка для плазменной резки с числовым программным управлением (по ГОСТ 14792-80) измельчитель для бумаги с уровнем секретности Р1 или Р2 [234].

Для механической микрообработки поверхностей фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки при изготовлении электромагнитных экранов в соответствии технологией, представленной в разделе 4.4, предложено применять электрическую шлифовальную машинку с насадкой, в структуру которой входит шлифовальная бумага (например, шлифовальную машинку Rupes LE71TEC/STD (производитель – компания «RUPES», Италия) [235] или ее аналоги.

ГЛАВА 5

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ФОЛЬГИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ

С использованием электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, представляется целесообразным получать следующие изделия:

- чехлы для приборов электронной техники, чувствительных к воздействию ЭМИ СВЧ-диапазона и / или являющиеся источником такого излучения (рисунок 5.1);
- шторы для окон помещений, в которых расположены приборы электронной техники, чувствительные к воздействию ЭМИ СВЧ-диапазона и / или являющиеся источником такого излучения, либо ширмы, предназначенные для выделения зон в помещениях, в которых расположены указанные приборы (рисунок 5.2);
- одежда для персонала, работающего с источниками ЭМИ СВЧ-диапазона (рисунок 5.3).

На технологию изготовления электромагнитных экранов на основе объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки получен патент Республики Беларусь на изобретение [236].

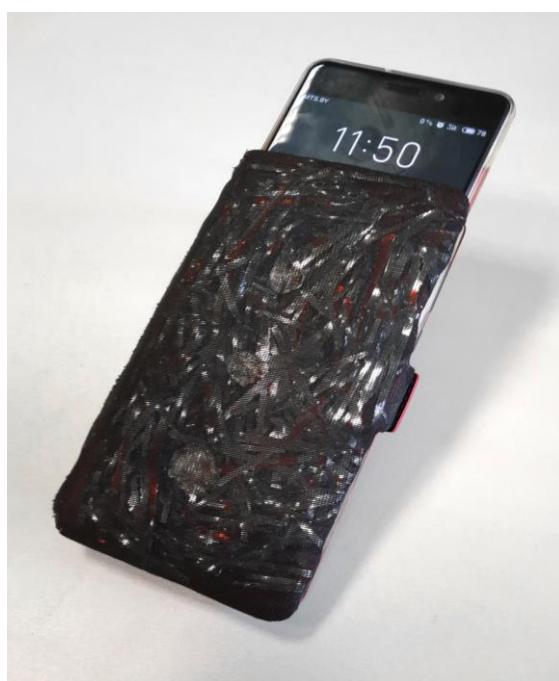


Рисунок 5.1 – Внешний вид чехла для мобильного телефона, полученного с использованием электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки [237]

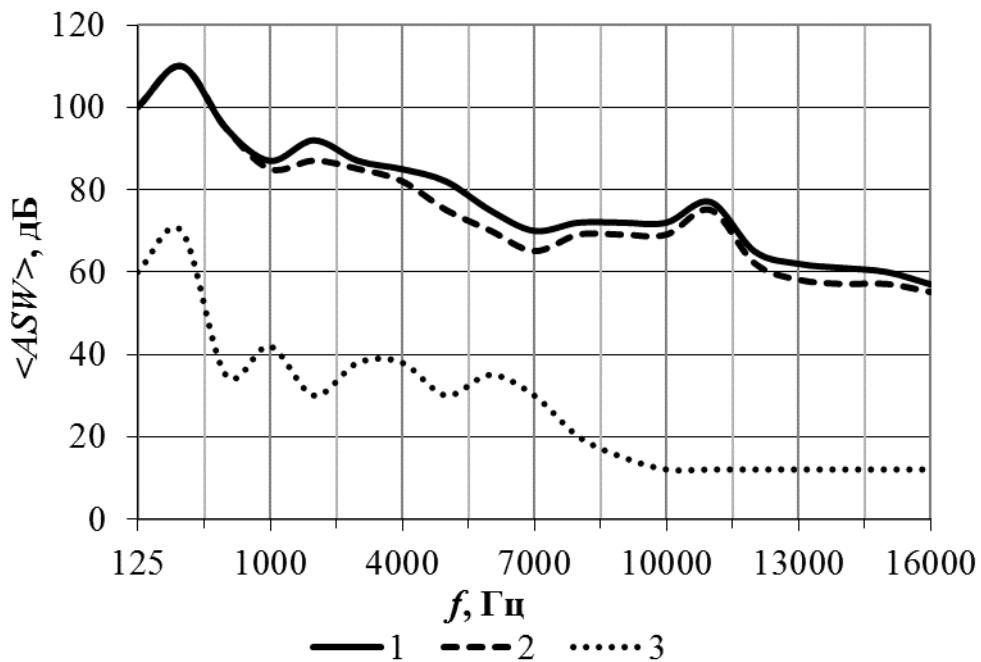


Рисунок 5.2 – Внешний вид шторы, полученной с использованием электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки [238]



Рисунок 5.3 – Внешний вид жилетки, полученной с использованием электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

Согласно методике, представленной в разделе 2.3, экспериментально установлено, что электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, не снижают амплитуду звуковых волн в диапазоне частот 125,0–1000,0 Гц и снижают не более чем на 5,0 дБ амплитуду звуковых волн в диапазоне частот 1000,0–16000,0 Гц (рисунок 5.4). В подписи к рисунку 5.4 под исходной звуковой волной понимается волна, амплитуда которой была зарегистрирована при условии, что между генератором сигналов и спектроанализатором не был установлен образец материала.



1 – исходная звуковая волна; 2 – звуковая волна, прошедшая через электромагнитный экран, изготовленный в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки; 3 – звуковая волна, прошедшая через лист пенополистерола толщиной 6,0 см

Рисунок 5.4 – Частотные зависимости амплитуды звуковых волн

Значения коэффициента звукоизоляции, характерные для электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Значения коэффициента звукоизоляции, характерные для электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями

f , Гц	SIC , дБ	f , Гц	SIC , дБ
125,0	0,0	8000,0	3,0
250,0	0,0	9000,0	3,0
500,0	0,0	10000,0	3,0
1000,0	2,0	11000,0	2,0
2000,0	5,0	12000,0	3,0
3000,0	2,0	13000,0	4,0
4000,0	3,0	14000,0	4,0
5000,0	7,0	15000,0	3,0
6000,0	5,0	16000,0	2,0
7000,0	5,0		

Так как основная часть энергии спектра речевых сигналов сосредоточена в диапазоне частот 125,0–2500,0 Гц, то можно заключить, что электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, не оказывают существенного влияния на разборчивость таких сигналов, что обусловлено воздухопроницаемостью указанных экранов. Таким образом, пользователь мобильного телефона, помещенного в чехол, представленный на рисунке 5.1, не будет испытывать в процессе разговора дискомфорт, вызванный плохой разборчивостью сигналов, формируемых динамиком такого телефона [239, 240].

С использованием электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями на основе фольгированной полимерной пленки, представляется целесообразным получать контейнеры, предназначенные для хранения и транспортировки приборов электронной техники, чувствительных к воздействию ЭМИ СВЧ-диапазона.

В соответствии методикой, представленной в разделе 2.2, исследованы закономерности взаимодействия ЭМИ ИК-диапазона с образцами электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, и электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью [241]. Результат такого исследования представлен на рисунке 5.5.

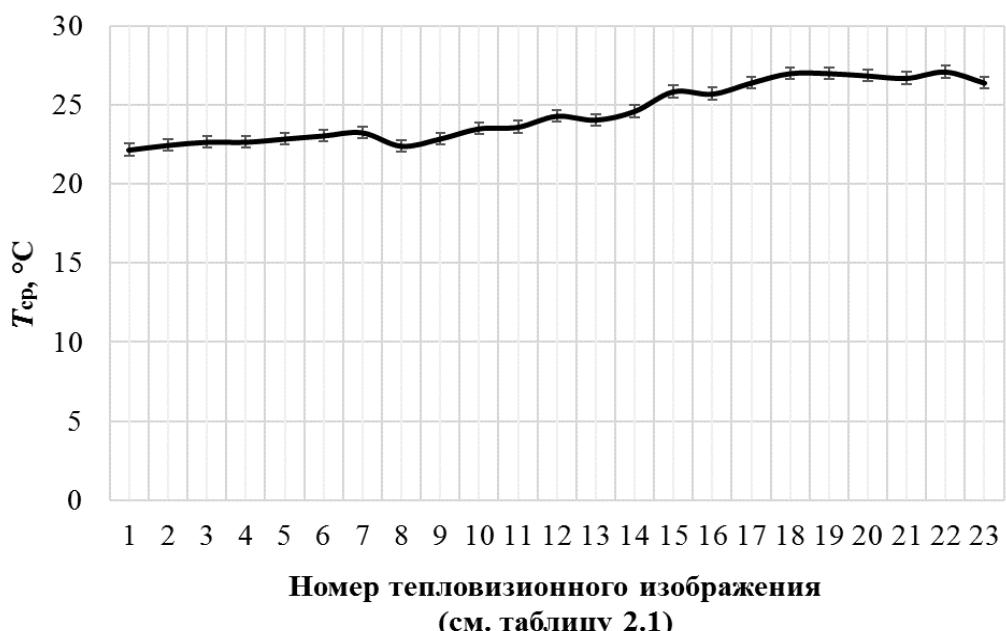


Рисунок 5.5 – Изменение во времени среднего значения температуры обратных поверхностей образцов электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями с использованием алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

Из рисунка 5.5 видно, что температура обратных поверхностей образцов электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями с использованием алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, увеличивается с $22,0 \pm 2,0$ °C до $26,0 \pm 2,0$ °C при условии, что на лицевые поверхности этих образцов воздействует ЭМИ ИК-диапазона, температура поверхности источника которого составляет $70,0 \pm 2,0$ °C (при условии, что температура воздуха в помещении – $21,0 \pm 1,0$ °C).

Таким образом, обозначенные экраны представляются перспективными для использования при решении задач, связанных с обеспечением защиты приборов электронной техники от воздействия не только СВЧ-, но и тепловых помех, в связи с чем можно заключить, что они являются многофункциональными [242–247].

Выполнены исследования, направленные на экспериментальное обоснование возможности использования электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, для:

– защиты речевой информации от перехвата по прямому акустическому каналу, реализуемого с помощью закладных устройств, устанавливаемых внутри помещений, в пределах которых циркулирует речевая информация, распространение и / или предоставление которой ограничено [248];

– защиты речевой информации от перехвата по параметрическому каналу, реализуемого путем воздействия электромагнитным излучением радиочастотного диапазона на вспомогательные технические средства и системы, характеризующиеся «микрофонным эффектом» и расположенные внутри помещений, в пределах которых циркулирует речевая информация, распространение и / или предоставление которой ограничено [249, 250].

Актуальность проведения таких исследований обусловлена рядом причин.

1. В настоящее время перехват информации, распространение и / или предоставление которой ограничено, чаще всего реализуется по акустическим техническим каналам утечки в связи с тем, что речевые сигналы чаще, чем электромагнитные волны, являются носителями такой информации [251].

2. Процесс перехвата речевой информации, реализуемый с помощью закладных устройств или путем воздействия электромагнитным излучением радиочастотного диапазона на вспомогательные технические средства и системы, характеризуется большей скрытностью по сравнению с процессом перехвата аналогичной информации по акустическим техническим каналам других разновидностей. Это связано с тем, что:

– закладные устройства по сравнению с другими специальными техническими средствами, предназначенными для негласного получения информации, характеризуются миниатюрными размерами и могут быть скрытно установлены в помещении, в пределах которого циркулирует

речевая информация, распространение и / или предоставление которой ограничено [252];

– воздействие электромагнитным излучением радиочастотного диапазона на вспомогательные технические средства и системы, характеризующиеся «микрофонным эффектом» и расположенные внутри помещений, в пределах которых циркулирует речевая информация, распространение и / или предоставление которой ограничено, может быть реализовано за границами контролируемой зоны [253].

На рисунках 5.6–5.10 представлены частотные характеристики сигналов, переизлученных имитаторами №№ 1–5 вследствие воздействия на них короткими радиоимпульсами, сформированными с помощью автономного генераторно-приемного блока комплекса и подключенной к нему антенны широкополосной приемо-передающей.

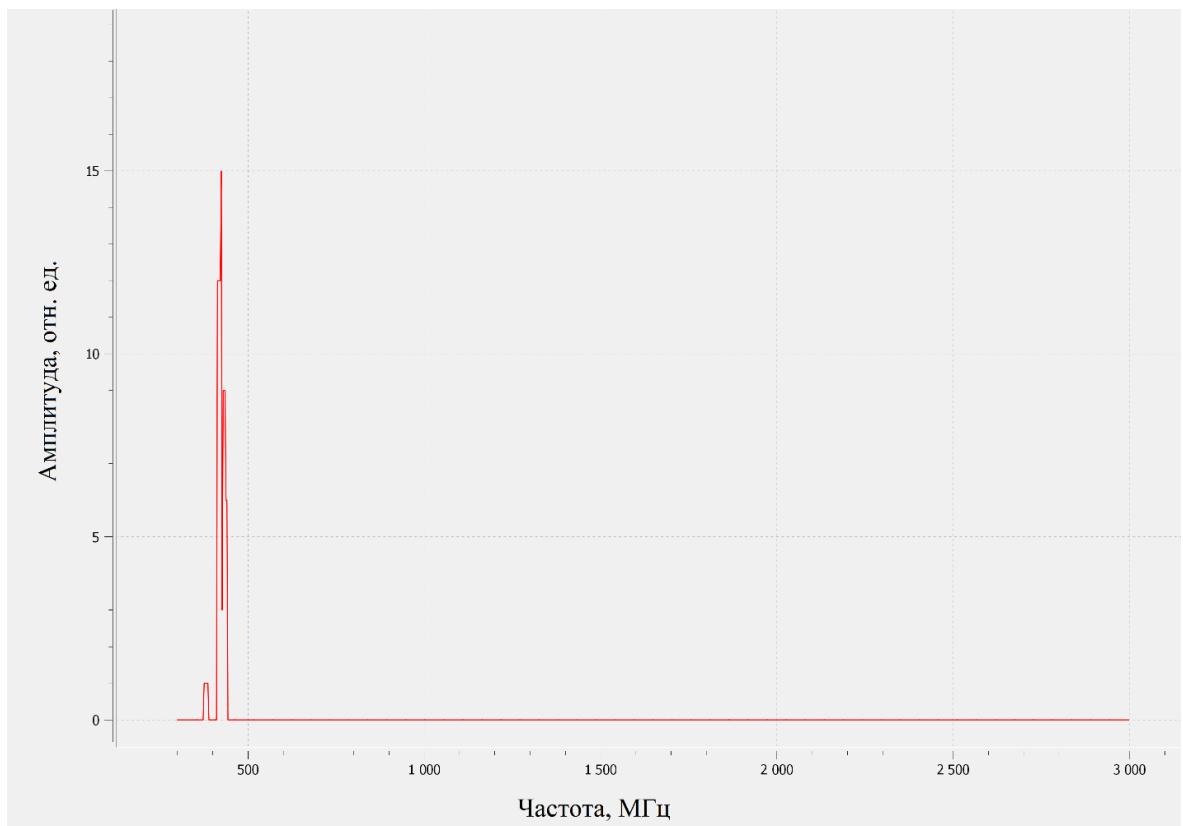


Рисунок 5.6 – Частотная характеристика сигнала, переизлученного имитатором № 1

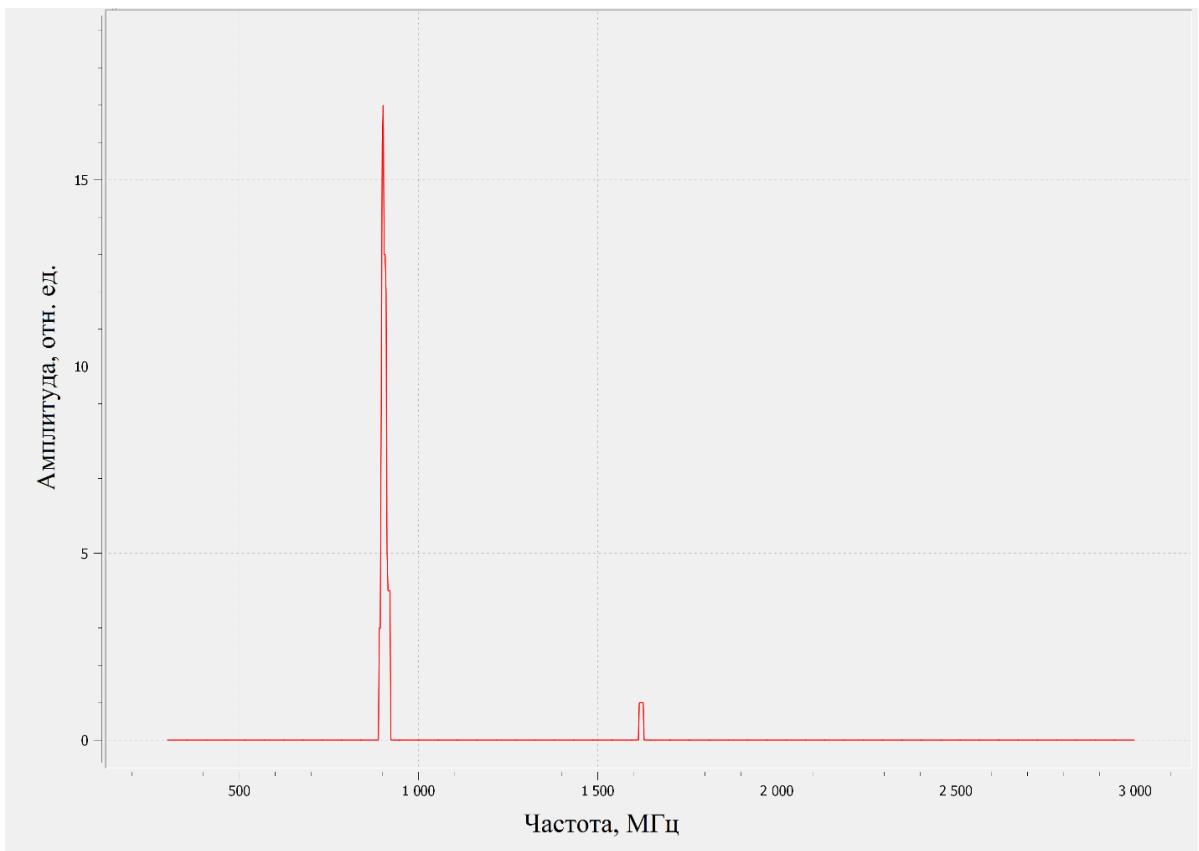


Рисунок 5.7 – Частотная характеристика сигнала, передизлученного имитатором № 2

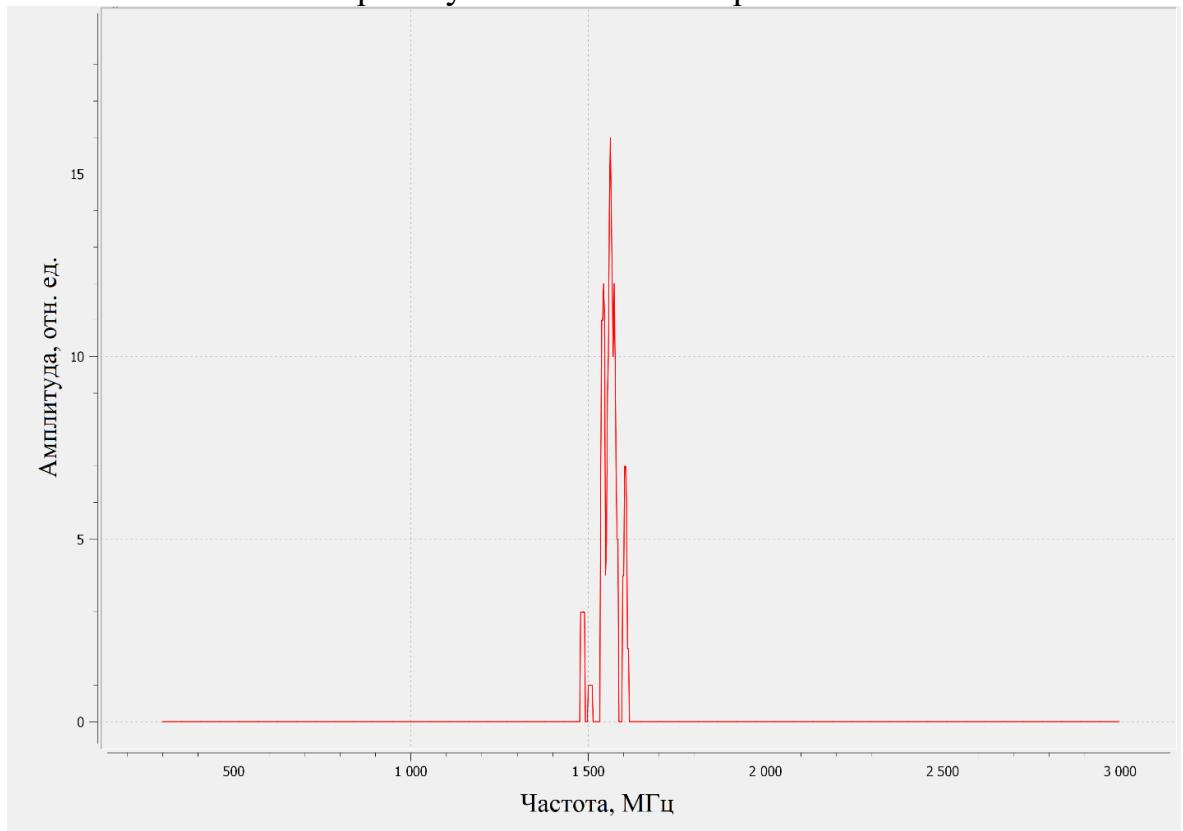


Рисунок 5.8 – Частотная характеристика сигнала, передизлученного имитатором № 3

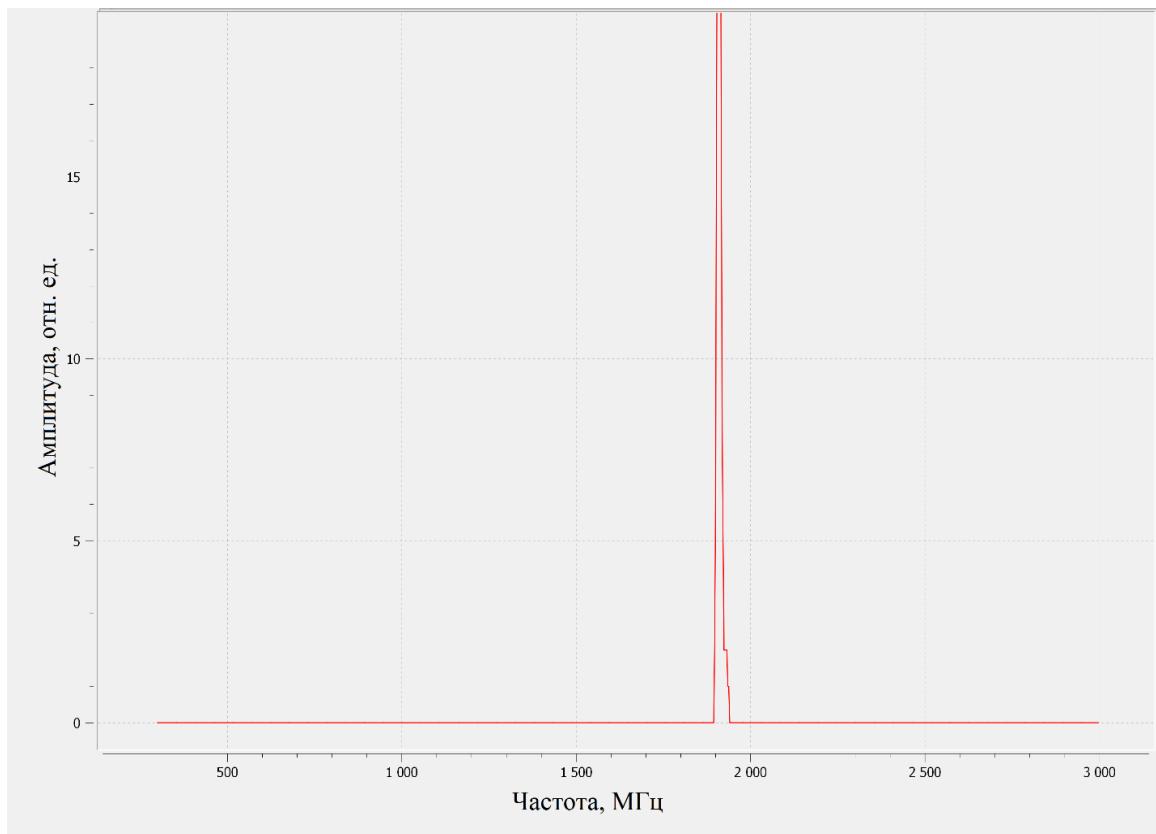


Рисунок 5.9 – Частотная характеристика сигнала, переизлученного имитатором № 4

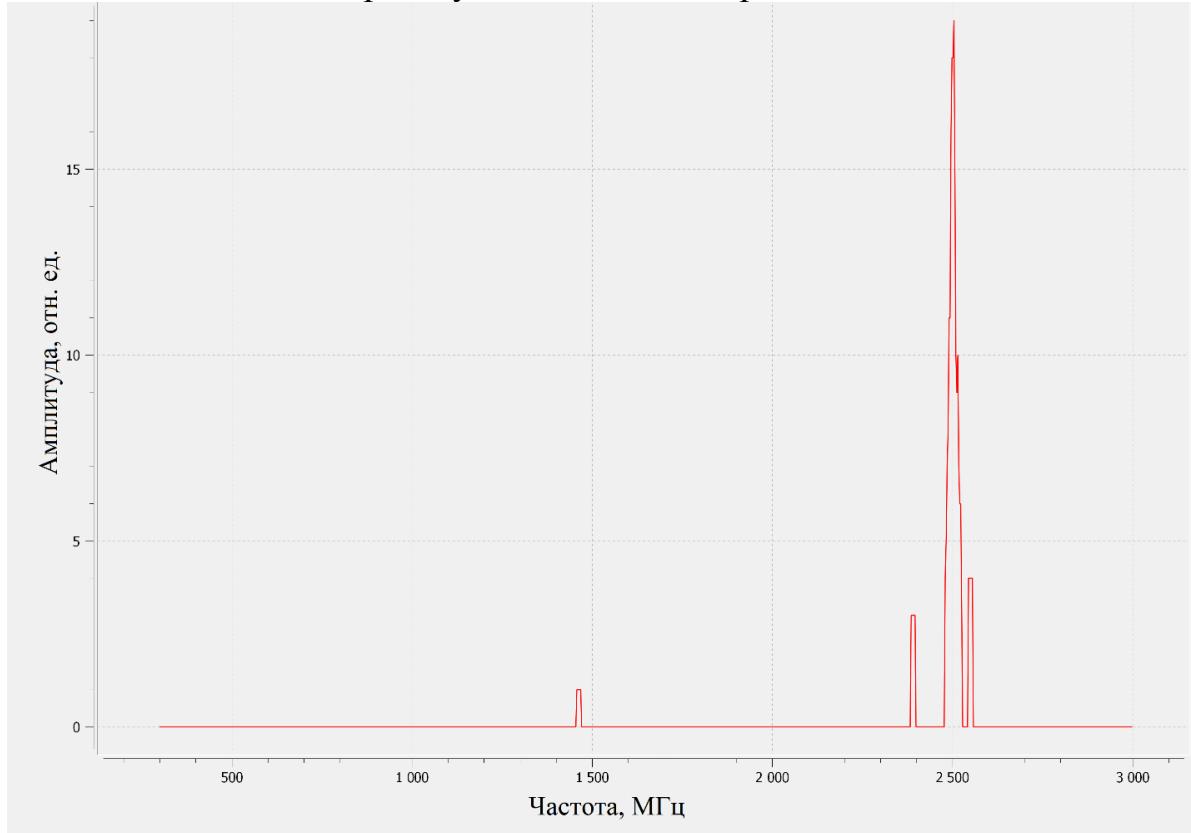


Рисунок 5.10 – Частотная характеристика сигнала, переизлученного имитатором № 5

На рисунке 5.11 представлена частотная характеристика сигнала, переизлученного каждым из указанных имитаторов, зарегистрированного в условиях, при которых поверх них расположен электромагнитный экран, изготовленный в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки.

На основе результатов сравнительного анализа характеристик, представленных на рисунках 5.6–5.10 и характеристики, представленной на рисунке 5.11 установлено, что электромагнитный экран, изготовленный в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, обеспечивает снижение уровня сигнала, переизлучаемого имитатором специального технического средства, предназначенного для негласного получения информации, вследствие воздействия на него короткими радиоимпульсами, до уровней, при которых этот сигнал не может быть зарегистрирован приемной антенной.

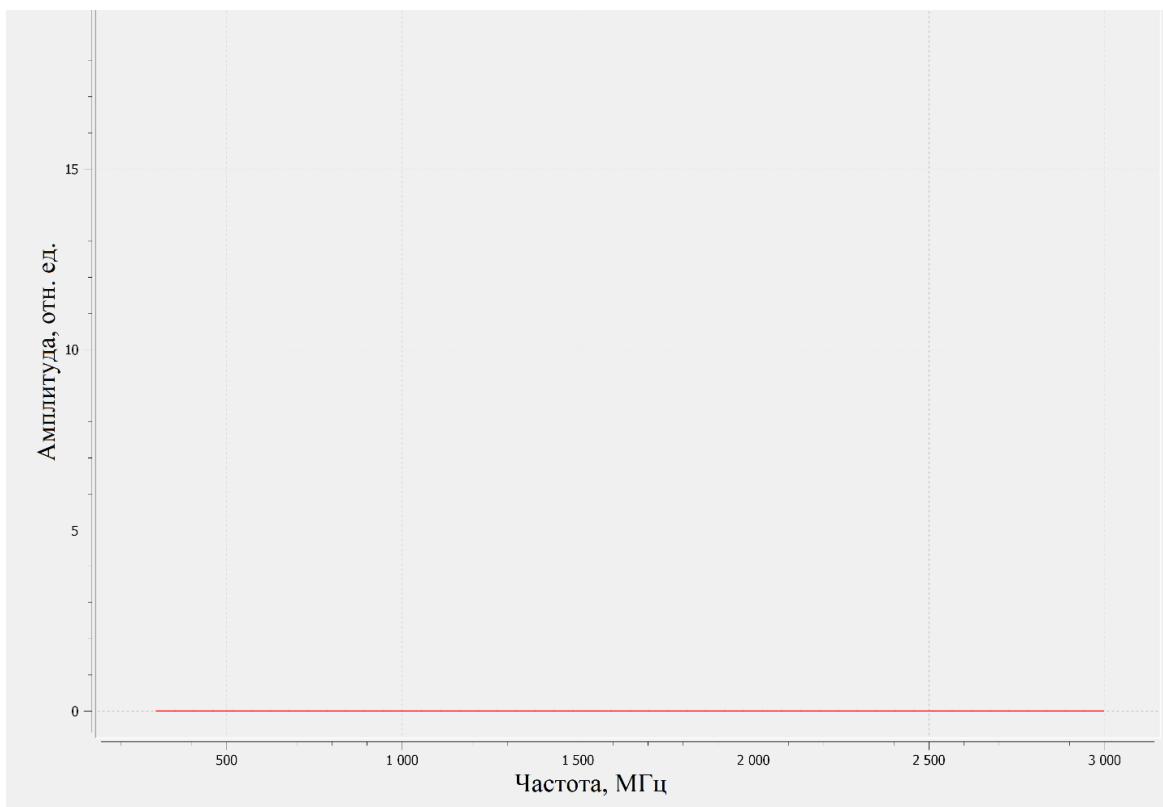


Рисунок 4.35 – Частотная характеристика сигнала, переизлученного имитаторами № 1–5, поверх которых размещен электромагнитный экран, изготовленный в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки

Таким образом, электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с разработанными технологиями на основе элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, могут быть использованы не только для защиты приборов электронной техники от воздействия ЭМИ СВЧ-диапазона, но и для защиты информации

от перехвата по прямому акустическому (с помощью закладных устройств) и параметрическому каналам. Для достижения обозначенной цели такие экраны следует закреплять на стенах помещений, в которых проводятся переговоры, предметом которых является информация распространение и (или) предоставление которого ограничено [254–256].

Таким образом, частотно-селективные электромагнитные экраны, изготовленные в соответствии с представленными технологиями, применимы в следующих областях:

- изготовление СВЧ-измерительных систем;
- создание экранированных помещений;
- обеспечение адаптивного экранирования электромагнитных помех;
- производство изделий для защиты человека от воздействия ЭМИ СВЧ-диапазона.

Исходя из данных, представленных в таблице 1.4 можно заключить, что указанные экраны применимы в рамках большой части областей применения частотно-селективных электромагнитных экранов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены закономерности изменения характеристик поглощения ЭМИ в СВЧ-диапазоне алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки в зависимости от способов модификации ее физико-химических свойств. В частности, определено, что в результате модификации алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки путем закрепления на ее поверхности с шагом 1,0 см объемных элементов в виде классических спиралей Архимеда диаметром 6,0–12,0 см, сформированных из алюминиевой фольги, можно обеспечить увеличение с 2,0 до 7,5–11,5 ГГц ширины ее ЭПП ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц и с 0,59 до 0,75–0,84 отн. ед. (в зависимости от диаметра обозначенных объемных элементов) максимального значения ее коэффициента поглощения ЭМИ в указанном диапазоне частот, что обусловлено снижением с 0,4–0,78 отн. ед. до 0,15–0,71 отн. ед. значений ее коэффициента отражения ЭМИ в этом диапазоне частот.

С учетом обозначенных закономерностей разработана технология изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, которая состоит в термопрессовании конструкции в виде двух фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала, между которыми упорядочено распределены объемные элементы в виде классических спиралей Архимеда, сформированные из алюминиевой фольги, и дальнейшем закреплении фрагмента алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки на одной из наружных поверхностей структуры, полученной в результате реализации обозначенных операций. Ширина ЭПП ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией, равна 12,0 ГГц (диапазон ЭПП ЭМИ – 5,0–17,0 ГГц) и превышает на 10,8–11,9 ГГц ширину ЭПП ЭМИ их аналогов. Максимальное значение коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП таких экранов составляет 0,88 отн. ед.

Определено, что в результате модификации поверхности алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки путем закрепления на ее поверхности групп объемных петлевидных элементов шириной 0,3–0,9 см, сформированных из аналогичной пленки, или путем закрепления на ее поверхности с шагом 1,0–1,5 см объемных элементов в виде лент Мёбиуса, сформированных из аналогичной пленки, можно обеспечить увеличение с 2,0 ГГц до соответственно 13,0 ГГц или 15,0 ГГц ширины ее ЭПП ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц (диапазон ЭПП ЭМИ – соответственно 4,0–17,0 ГГц или 2,0–17,0 ГГц) и увеличение с 0,59 отн. ед. до 0,95 отн. ед. максимального значения ее коэффициента поглощения ЭМИ в указанном диапазоне частот, что обусловлено снижением с 0,38–0,78 отн. ед. до соответственно 0,04–0,48 отн. ед. или 0,04–0,38 отн. ед. значений ее коэффициента отражения ЭМИ в этом диапазоне частот. С учетом обозначенных закономерностей разработана технология изготовления частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, которая

состоит в или в закреплении групп объемных петлевидных элементов шириной 0,3–0,9 см, сформированных из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки или в закреплении с шагом 1,0–1,5 см объемных элементов в виде лент Мёбиуса, сформированных из указанной пленки, на поверхности фрагмента аналогичной пленки или на лицевой поверхности листа гофрокартона, на обратной поверхности которого закреплен фрагмент алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки. Ширина ЭПП ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями, характеризуются шириной ЭПП ЭМИ, равна 13,0 ГГц или 15,0 ГГц в зависимости от типа элементов, с использованием которых они изготовлены и превышает соответственно на 4,0–12,8 ГГц или 6,0–14,8 ГГц ЭПП ЭМИ их аналогов. Максимальное значение коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП таких экранов составляет 0,95 отн. ед.

Определено, что в результате модификации алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки путем формирования на ее поверхности неровностей, среднее значение размеров которых составляет 80,0 мкм, 50,0 мкм или 20,0 мкм, можно обеспечить увеличение с 0,5 ГГц до соответственно 6,0 ГГц, 8,0 ГГц или 10,5 ГГц ширины ЭПП ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц такой пленки и с 0,55 отн. ед. до соответственно 0,92 отн. ед., 0,93 отн. ед. или 0,95 отн. ед. значений ее коэффициента поглощения ЭМИ в указанном диапазоне частот, что обусловлено снижением с 0,42–0,98 отн. ед. до соответственно 0,07–0,79 отн. ед., 0,04–0,88 отн. ед. или 0,04–0,68 отн. ед. значений ее коэффициента отражения ЭМИ в этом диапазоне частот. С учетом обозначенных закономерностей разработаны технологии изготовления двух- и четырехслойных частотно-селективных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона. Разработанная технология изготовления двухслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона состоит в закреплении на поверхности фрагмента алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки аналогичного фрагмента с механически обработанной поверхностью, среднее значение неровностей которой составляет 80,0 мкм, 50,0 мкм или 20,0 мкм, в зависимости от того, какими граничными значениями ЭПП ЭМИ должны характеризоваться изготавливаемые экраны. Разработанная технология изготовления четырехслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона состоит в термопрессовании конструкции в виде двух одинаковых фрагментов синтетического нетканого волокнистого материала, между которыми упорядочено распределены пластинчатые элементы, сформированные из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью, среднее значение неровностей которой составляет 80,0 мкм, и дальнейшем закреплении фрагмента алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки на одной из наружных поверхностей структуры, полученной в результате реализации обозначенных операций.

Ширина ЭПП ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц двухслойных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией, равна 6,0 ГГц, 8,0 ГГц или 11,5 ГГц в зависимости от среднего значения неровностей механически обработанной поверхности фрагментов алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, использованных для их изготовления. Значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 4,0–8,0 ГГц у таких экранов изменяются в пределах от 0,5 отн. ед. до 0,95 отн. ед. и превышают на 0,05–0,9 отн. ед. значения коэффициента поглощения ЭМИ в указанном диапазоне частот их аналогов. Ширина ЭПП ЭМИ четырехслойных экранов, изготовленных в соответствии с разработанной технологией равной 11,3 ГГц и на 3,3–10,3 ГГц превышает ширину ЭПП ЭМИ их аналогов. Максимальное значение коэффициента поглощения ЭМИ в ЭПП таких экранов составляет 0,95 отн. ед.

Следует отметить, что в структуру каждого из электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с разработанными технологиями, входит фрагмент алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки (крепится на обратные поверхности таких экранов), в связи с чем они обеспечивают снижение энергии ЭМИ ИК-диапазона. Экспериментально установлено, что если на лицевые поверхности обозначенных экранов воздействует ЭМИ ИК-диапазона, температура источника которого составляет $70,0 \pm 2,0$ °C, то температура их обратных поверхностей составляет $26,0 - 28,0 \pm 2,0$ °C (при условии, что температура воздуха в помещении – $21,0 \pm 1,0$ °C).

Изготовленные в соответствии с разработанными технологиями электромагнитные экраны на основе объемных спиралевидных элементов из алюминиевой фольги, электромагнитные экраны на основе объемных петлевидных элементов из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, электромагнитные экраны на основе объемных элементов в виде лент Мебиуса из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки, электромагнитные экраны, в структуру которых входят пластинчатые элементы круглой формы на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью, или на основе порошкообразного активированного древесного угля и водных растворов электролитов, или на основе порошкообразного активированного древесного угля, содержащего частицы мелкодисперсного материала, характеризующегося магнитными свойствами, а также комбинированные электромагнитные экраны на основе модифицированных порошкообразного активированного древесного угля и алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки представляют собой широкополосные комбинированные среды, обеспечивающие резонансное поглощение энергии взаимодействующего с ними ЭМИ.

Изготовленные в соответствии с разработанными технологиями электромагнитные экраны на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью,

электромагнитные экраны на основе порошкообразного активированного древесного угля и водных растворов электролитов, самоклеящейся полимерной пленки или связующих веществ, электромагнитные экраны на основе никельсодержащего порошкообразного активированного древесного угля представляют собой широкополосные среды со слоистой структурой, обеспечивающие резонансное поглощение энергии взаимодействующего с ними ЭМИ.

Частотно-селективные электромагнитные экраны СВЧ-диапазона, изготовленные в соответствии с разработанной технологией на основе сформированных из алюминиевой фольги объемных элементов в виде классических спиралей Архимеда, и частотно-селективные электромагнитные экраны СВЧ-диапазона, изготовленные в соответствии с разработанной технологией на основе сформированных из алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки объемных петлевидных элементов или объемных элементов в виде лент Мебиуса, могут быть применены для создания ширм, предназначенных для выделения зон в помещениях, в которых расположены приборы электронной техники, чувствительные к воздействию ЭМИ СВЧ- и/или ИК-диапазона и/или являющихся источниками такого излучения, чехлов для таких приборов, одежды для персонала, работающего с источниками ЭМИ СВЧ-диапазона.

Кроме того, такие экраны представляются перспективными для использования в целях решения задачи защиты информации от утечки по прямому акустическому и параметрическому каналам, что является еще одним подтверждением их многофункциональности.

Частотно-селективные электромагнитные экраны СВЧ-диапазона, изготовленные в соответствии с разработанной технологией на основе алюминийсодержащей фольгированной полимерной пленки с механически обработанной поверхностью, могут быть применены для создания контейнеров, предназначенных для хранения приборов электронной техники, чувствительных к воздействию электромагнитного излучения СВЧ- и/или ИК-диапазона и/или являющихся источниками такого излучения.

Частотно-селективные электромагнитные экраны СВЧ-диапазона, изготовленные в соответствии с разработанными технологиями без использования связующих веществ, в том числе и комбинированные электромагнитные экраны, характеризуются свойством гибкости, в связи с чем могут быть применены для создания ширм для выделения экранированных зон в помещениях, в которых расположены приборы электронной техники, чувствительные к воздействию электромагнитного излучения СВЧ- и/или ИК-диапазона и/или являющихся источниками такого излучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Hasegawa, M. Dual-polarized Reflector Backed Dipole Antenna Using Frequency Selective Reflector / M. Hasegawa, K. Cho // Proceedings of 2018 International Symposium on Antennas and Propagation. – South Korea, Busan, 23–26 October 2018. – Article ID: 8627574.
- 2 Kapoor, A. Slotted Wideband Frequency Selective Reflectors for Sub-6 GHz 5G Devices / A. Kapoor, R. Mishra, P. Kumar // Proceedings of IEEE 2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems. – India, Greater Noida, 19–20 February 2021. – P. 786–791.
- 3 Band-Notched Frequency-Selective Absorber with Linear Polarization Rotation Function / X. Jin, X. Kong, X. Wang [et al.] // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2022. – Vol. 32, iss. 7. – Article ID: e23175.
- 4 Dual-Polarized Frequency Selective Absorber with In-Band Reflection Response / Z. Li, G. Zhang, S. Yang [et al.] // Microwave and Optical Technology Letters. – 2022. – Vol. 64, iss. 10. – P. 1740–1745.
- 5 Semenikhina, D. V. Effect of Frequency Selective Shield of Semielliptical Shape on the Characteristics of Antenna Array / D. V. Semenikhina, A. I. Semenikhin, Y. V. Yukhanov // Proceedings of the International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications. – 2015. – DOI: 10.2991/cisia-15.2015.28.
- 6 Singh, A. Quad-Band FSS for Electromagnetic Shielding / A. Singh, C. Singh // International Journal of Computer Communication and Informatics. – 2021. – Vol. 3, iss. 1. – P. 1–14.
- 7 Данильчев, И. Ю. Компьютерная модель расчета частотно-селективной поверхности методом эквивалентных электрических схем / И. Ю. Данильчев // Политехнический молодежный журнал. – 2021. – № 5 (58). – DOI: 10.18698/2541-8009-2021-5-700.
- 8 Frequency Selective Smart Shield Design for Wireless Signals / M. W. B. Silva, C. C. M. Junqueira, A. E. Culhaoglu, E. Kemptner // 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – 2015. – INSPEC Accession Number: 15416344.
- 9 Frequency Selective Surfaces for Electromagnetic Shielding of Pocket-Sized Transceivers / M. Koohestani, R. Perdriau, M. Ramdani, J. Carlsson/ / IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2020. – Vol. 62, iss. 6. – P. 2785–2792.
- 10 Design and Characterisation of Frequency Selective Conductive Materials for Electromagnetic Fields Control / I. V. Konoplev, D. W. Posthuma De Boer, C. M. Warsop, M. John // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – DOI:10.1038/s41598-020-76447-x.

11 Mayouf, A. T. A Dual Stopband Frequency Selective Surface for Mobile Shielding Applications / A. T. Mayouf, K. H. Sayidmarie, Y. E. Mohammed Ali // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1152. – Paper ID: 012008.

12 Khoshnati, A. Suppression of Radiated Electromagnetic Emissions Using Absorbing Frequency Selective Surfaces / A. Khoshnati, R. Abhari // 2017 IEEE 26th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems. – 2017. – INSPEC Accession Number: 17669454. DOI: 10.1109/EPEPS.2017.8329705.

13 Perotoni, M. B. Design, Prototyping and Measurement of a Cascaded 6-GHz Frequency Selective Surface Array / M. B. Perotoni, L. A. Andrade, C. Junqueira // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2016. – Vol. 8, no. 2. – P. 137–142.

14 Frequency-Selective and Tunable Electromagnetic Shielding Effectiveness via the Sandwich Structure of Silicone Rubber/Graphene Composite / G. Wang, X. Liao, J. Yang [et al.] // Composites Science and Technology. – 2019. – Vol. 184. – Article ID: 107847.

15 Frequency Shielding with FSS for 5G Applications / V. Lavanya, R. Ramya, V. Geetha, K. Vasudevan // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 7, iss. 6. – P. 4811–4814.

16 Frequency Selective Surfaces for Electromagnetic Shielding of Pocket-Sized Transceivers / M. Koohestani, R. Perdriau, M. Ramdani, J. Carlsson // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2020. – Vol. 99. – DOI: 10.1109/TEMC.2020.2999635.

17 Polarization Insensitive and Transparent Frequency Selective Surface for Dual Band GSM Shielding / Y. Yang, W. Li, K. N. Salama, Atif Shamim // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2021. – Vol. 69, iss. 5. – P. 2779–2789.

18 Frequency Selective Surface for Ultra-Wide Band Filtering and Shielding / A. De Sabata, L. Matekovits, A. Buta [et al.] // Sensors (Basel). – 2022. – Vol. 22, iss. 5. Article ID: 1896.

19 Frequency-Adjustable Electromagnetic Interference Shielding Performance of Sandwich-Structured Conductive Polymer Composites by Selective Foaming and Tunable Filler Dispersion / P. Song, X. Liao, F. Zou [et al.]. – 2022. – Composites Communications. – Vol. 34. – Article ID: 101264.

20 Naseer, N. An electromagnetic Shield Design Using Frequency Selective Surfaces on a Textile Substrate / N. Naseer, B. Saka // Flexible and Printed Electronics. – 2022. – Vol. 7, no. 3. – Article number: 035001. – DOI: 10.1088/2058-8585/ac7bc3.

21 Кисель, В. Н. Моделирование управляемой частотно-избирательной поверхности / В. Н. Кисель // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 5. – <http://jre.cplire.ru/jre/may16/1/text.html>.

- 22 Anwar, R. S. Frequency Selective Surfaces: A Review / R. S. Anwar, L. Mao, H. Ning // Applied Sciences. – 2018. Vol. 8, no. 9. 1689.
- 23 Doken, B. An Easily Optimizable Frequency Selective Absorber Design for X-Band / B. Doken // Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering. – 2022. – Vol. 22. – P. 136–141.
- 24 Chou, H.-H. Ultrathin Narrowband Frequency Selective Surface with High Angular and Polarization Stability at X-Band Frequencies / H.-H. Chou, G.-J. Ke // Microwave and Optical Technology Letters. – 2022. – Vol. 64, iss. 2. – P. 452–457.
- 25 Бей, Н. А. Антенные систем спутниковой связи и навигации / Н. А. Бей, В. А. Вечтомов, В. Н. Зимин. – М. : Рудомино, 2010. – 220 с.
- 26 A Comparison of Airflow and Shielding Effectiveness of Perforated Enclosure Panels / T. Jackman, W. Ju, F. Gisin [et al.] // IEEE International. – 1999. – P. 583–585.
- 27 Кириленко, А. А. Резонансные свойства перфорированного экрана с двумя запредельными круглыми отверстиями различного диаметра в периодической ячейке / А. А. Кириленко, А. О. Перов, С. Л. Сенкевич // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 45–57.
- 28 Орлов, Е. Е. Расчет замкнутых электромагнитных экранов с апертурами методом минимальных автономных блоков / Е. Е. Орлов, С. В. Малый / СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (Крымико'2017) : труды 27-й Международной крымской конф., Севастополь, 10–16 сент. 2017 г. / ГАОУВО «Севастопольский государственный университет». – Севастополь, 2017. – Т. 3. – С. 799–802.
- 29 Иванов, А. А. Методы, программы и устройство для оценки эффективности экранирования типовых экранирующих конструкций радиоэлектронных средств: дис. ... канд. техн. наук : 2.2.13 / А. А. Иванов. – Томск, 2021. – 182 л.
- 30 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 1–5. Общие положения. Воздействия электромагнитные большой мощности (ЭМБМ) на системы гражданского назначения : ГОСТ IEC/TR 61000-1-5–2017. – Введ. 01.12.2018. – М. : Стандартинформ, 2020. – 37 с.
- 31 Design of Miniaturised-Element FSS Based on 2.5-Dimensional Closed-Loop Hilbert Fractal / S. Khajevandi, H. Oraizi, A. Amini, M. Poordaraee // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2019. – Vol. 13, iss. 6. – P. 742–747.
- 32 Kaushik, P. Review on Design of Frequency Selective Surfaces / P. Kaushik, T. Sikka // International Journal of All Research Education and Scientific Methods. – 2020. – Vol. 8, iss. 5. – P. 75–85.
- 33 Гринев, А. Ю. Теоретическое и экспериментальное исследование частотно-селективных структур для снижения рассеивающих свойств

фазированной антенной решетки / А. Ю. Гринев, А. П. Волков // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 6. – С. 549–557.

34 Belov, P. A. Resonant Reflection From Dipole Arrays Located Very Near To Conducting Planes / P. A. Belov, S. A. Tretyakov // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2022. – Vol. 16, no. 1. – P. 129–143.

35 Распространение радиоволн / О. И. Яковлев, В. П. Якубов, В. П. Урядов, Д. Г. Павельев. – М. : ЛЕНАНД, 2009. – 496 с

36 Chakraborty, Soma. A Review on the Pursuit of an Optimal Microwave Absorber / Soma Chakraborty, Soumik Chakraborty // Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics. – 2021. – Vol. 34, no 4. – P. 631–645.

37 Ultra-wideband Frequency Selective Surface for Communication Applications / S. Habib, G. I. Kiani, M. F. Uddin Butt [et al.] // Computers, Materials & Continua. – 2022. – Vol. 70, no. 3. – P. 6177–6187.

38 Braz, E. C. Multiband Frequency Selective Surfaces with a Modified Multifractal Cantor Geometry / E. C. Braz, A. L. Pereira de Siqueira Campos // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2014. – Vol. 13, iss. 2. – DOI: 10.1590/S2179-10742014000200001.

39 Karami, M. A Broadband Frequency Selective Surface Absorber Using Nonuniform Circular Metallic Patches / M. Karami, R. A. Sadeghzadeh, M. Sharifi // 2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). – 2015. – DOI: 10.1109/lapc.2015.7365995

40 Gradient Structure Design of Flexible Waterborne Polyurethane Conductive Films for Ultraefficient Electromagnetic Shielding with Low Reflection Characteristic / Y. Xu, Y. Yang, D.-X. Yan [et al.] // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018. – Vol. 10, iss. 22. – P. 19143–19152.

41 Gradient Structure Silicone Rubber Composites for Selective Electromagnetic Interference Shielding Enhancement and Low Reflection / J. Yang, Y. Chen, B. Wang [et al.] // Composites Science and Technology. – 2022. – Vol. 229. – Article ID: 109688.

42 Analysis of Shielding Effectiveness of Perforated Shields with Multiple Rectangular Apertures / S. Suresh, M. Loknath, A. K. Patnaik [et al.] // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2014. – Vol. 3, iss. 9. – P. 8047–8051.

43 Kevin, M. D. Development of Prototype Light-Weight, Carbon Nanotube Based, Broad Band Electromagnetic Shielded Coaxial Cables : Dissertation the Degree of Doctor of Engineering / M. D. Kevin ; The School of Engineering of the University of Dayton. – Dayton, 2020. – 221 p.

44 Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. – М. : Наука, 1973. – 343 с.

45 Бабенко, А. Н. Электромагнитные поля и волны / А. Н. Бабенко, А. Н. Громыко. – Йошкар-Ола : МарГТУ, 2003. – 370 с.

46 Novikova, Yu. A. Overview of Unmanaged and Controllable Frequency-Selective Surfaces / Yu. A. Novikova // 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.

47 Study of the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Perforated Rectangular Enclosure with External Waveguide Based on Equivalent Circuit Method / H. Puyu, Z. Yu, Y. Jinpeng, S. Xiaoying // Electromagnetics. – 2018. – Vol. 38, iss. 4. – P. 236–248.

48 Briki, I. Shielding Effectiveness of Perforated Screens Through an Inverse Problem-Based Resolution / I. Briki, L. Pichon, J. Ben Hadj Slama // IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. – Vol. 52, iss.3. – P. 8000604.

49 Перфорация листового металла. Перфорирование отверстий в листовом металле [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://market.severstal.com/ru/ru/t/23001>. – Дата доступа: 22.03.2023.

50 Пробивка отверстий в металлических листах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://market.severstal.com/ru/ru/t/29034>. – Дата доступа: 22.03.2023.

51 Archambeault, B. Shielding of Air Vent Holes / B. Archambeault // IEEE. – 2007. – P. 102–103.

52 Бородин, М. А. Оценка точности итерационного алгоритма вычисления поля, рассеянного шероховатой поверхностью / М. А. Бородин, В. В. Леонтьев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 3. – С. 54–60.

53 Optimum Design of Bi-Layer Perforated Electromagnetic Shield / J. Tewary, D. Mandal, K. Kola, V. P. Roy // IOSR Journal of Electrical and Electronics. – 2016. – Vol. 11, iss. 3. – P. 65–70.

54 Cellular Structures from Perforated Metallic Tape and its Application for Electromagnetic Shielding Solutions / V. Mironovs, I. Boiko, T. Koppel, M. Lisicins // Agronomy Research. – 2014. – Vol. 12 (1). – P. 279–284.

55 Conversion of Polymer and Perforated Metallic Residues into New Value-Added Composite Building Materials / M. Lisicins, V. Lapkovskis, A. Shishkin [et al.] // Energy Procedia. – 2015. Vol. 72. – P. 148–155.

56 Absorption-Dominant, Low Reflection EMI Shielding Materials with Integrated Metal Mesh/TPU/CIP Composite / S. H. Ryu, Y. K. Han, S. J. Kwon [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 428. – Paper ID: 131167.

57 Lai, W. Electromagnetic Wave Absorption Properties of Structural Conductive ABS Fabricated by Fused Deposition Modeling / W. Lai, Y. Wang, J. He // Polymers. – 2020. – Vol. 12 (6). – 1217.

58 Optimum Design of Thin Wideband Multilayer Electromagnetic Shield Using Evolutionary Algorithms / K.S. Kola, D. Mandal, J. Tewary [et al.] // Advanced Electromagnetics. – 2017. – Vol. 6, no. 2. – P. 59–63.

59 Patent EP3554204A4, IPC H05K9/0084 (2006.1). Electromagnetic Shielding Material Using Perforated Metal Thin Sheet, and Manufacturing Method Therefor : № EP18871727.6A : filing date 16.08.2018 : publ. date 19.08.2020 / Kwak Kyu-beom ; applicant Clean & Science Co Ltd. – URL: <https://patents.google.com/patent/EP3554204A4/en> (date of access: 07.03.2025).

60 Мироньев, А. С. Метаматериал из кольцевых проводников для радиодиапазона : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.03 / Мироньев Александр Сергеевич ; Томск. гос. ун-т. – Томск, 2018. – 151 с.

61 Optically Transparent Broadband Microwave Absorber by Graphene and Metallic Rings / L. Ma, H. Xu, Z. Lu, J. Tan // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2022. – Vol. 14, no. 15. – P. 17727–17738.

62 Fully Conformal Square-Patch Frequency-Selective Surface Toward Wearable Electromagnetic Shielding / P. Gurrala, S. Oren, P. Liu [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2017. – Vol. 16. – P. 2602–2605.

63 Equivalent Circuit Model for the Frequency Selective Surface Embedded in a Layer with Constant Conductivity / M. Z. Joozdani, M. K. Amirhosseini // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2017. – Vol. 65, iss. 2. – P. 705–712.

64 Joozdani, M. Z. Equivalent Circuit Model for Frequency-Selective Surfaces Embedded Within a Thick Plasma Layer / M. Z. Joozdani, M. K. Amirhosseini, A. Abdolali // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2015. – P. 1–9. – DOI: 10.1109/TPS.2015.2468056.

65 A Thin Electromagnetic Absorber for Wide Incidence Angles and Both Polarizations / O. Luukkonen, F. Costa, C. R. Simovski; [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2009. – Vol. 57, no. 10. – P. 3119–3125.

66 Ray, R. Investigation on Multiple Resonant Frequency and Size Reduction of Slot Loaded Square Patch Frequency Selective Surface / R. Ray, M. Pal, A. Kumar Saha // International Journal for Science and Advance Research in Technology. – 2018. – Vol. 4, iss. 1. – 725–726.

67 A Novel Method for Extracting Equivalent Circuit Parameters of Circular Patch and Ring Frequency Selective Surfaces / Y. Yi, F. Liang, Z.-Z. Yang, B.-Z. Wang // 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Chengdu, China, 07–11 May 2018. – P. 1–3.

68 Textile Frequency Selective Surface / M. Ghebrebrhan [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2017. – Vol. 27, iss. 11. – P. 989–991.

69 Лерер, А. М. Поляризационные эффекты и резонансное поглощение при дифракции терагерцовых волн на графеновых поверхностях / А. М. Лерер, Г. С. Макеева // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125, вып. 6. – С. 838–843.

70 Smart Graphene-Based Frequency Selective Surface Designed to Act as Single or Dual Band Device with Reconfigurable Operation Bands / R. M. S. de Oliveira, R. R. Paiva, N. R. N. M. Rodrigues, M. R. E. Filho // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2019. – Vol. 18, iss. 4. – P. 452–481.

71 Design of Frequency Selective Surfaces with Koch Fractal Elements / R. M. S. Cruz, P. H. da Fonseca Silva, P. F. da Silva [et al.] // Proceedings of the International Workshop on Telecommunications. – 2009. – P. 76–80.

72 Campos, A. L. P. S. Design of Miniaturized Frequency Selective Surfaces Using Minkowski Island Fractal / A. L. P. S. Campos, E. E. C. de Oliveira // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2010. – Vol. 9, no. 1. – P. 43–49.

73 Sugumaran, B. Design and Analysis of Fractal Based Monopole Antenna Backed with Modified Jerusalem Cross Frequency Selective Surface for Wireless Personal Area Communications / B. Sugumaran, R. Balasubramanian // Mobile Networks and Applications. – 2020. – Vol. 25. – P. 2092–2101.

74 Composites with Koch Fractal Activated Carbon Fiber Felt Screens for Strong Microwave Absorption / S. Xia, B. Yao, Q. Chen [et al.] // Composites Part B. – 2016. Vol. 15. – P. 1–7. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.08.031.

75 Simple, Compact, and Multiband Frequency Selective Surfaces Using Dissimilar Sierpinski Fractal Elements / C. de Lucena Nobrega, M. R. da Silva, P. H. da Fonseca Silva [et al.] // International Journal of Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 614780. – DOI: 10.1155/2015/614780.

76 Costa, F. Analysis and Design of Ultra Thin Electromagnetic Absorbers Comprising Resistively Loaded High Impedance Surfaces / F. Costa, A. Monorchio, G. Manara // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58, no. 5. – P. 1551–1558.

77 Xu, Y. Design of Multilayer Frequency-Selective Surfaces by Equivalent Circuit Method and Basic Building Blocks / Y. Xu, M. He // International Journal of Antennas and Propagation. – 2019. – Article ID: 9582564.

78 Shukla, R. A Miniaturized Low-Profile Multilayer Frequency-Selective Surface Insensitive to Surrounding Dielectric Materials / R. Shukla, G. Tiwari // International Conference on Intelligent Computing and Smart Communication. – 2019. – DOI: 10.1007/978-981-15-0633-8_54.

79 Printed Frequency Selective Surfaces on Textiles / W. G. Whittow, Y. Li, R. Torah [et al.] // Electronics Letters. – 2014. – Vol. 50. – P. 916–917.

80 Resistively Loaded Ultra-Thin FSS Absorbers for Radio-Frequency Enhancement of Spacecraft Thermal Blankets / G. G. Machado, R. Cahill, V. Fusco, G. Conway // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2019. – Vol. 13, iss. 11. – P. 1928–1933.

81 A Miniaturized Frequency Selective Surface Based on Square Loop Aperture Element / W. Li, C. Wang, Y. Zhang, Y. Li // International Journal of Antennas and Propagation. – 2014. – Vol. 2014. – Article ID: 701279.

82 Paper-Based Uniplanar Ultra-Wideband Frequency-Selective Surface Design / H. J. Kim, S. S. Cho, O. B. Kwon [et al.] // Electronics Letters. – 2019. – Vol. 55, iss. 9. – P. 506–508.

83 Miniaturized and Flexible FSS based EM Shields for Conformal Applications / M. Bilal, R. Saleem, Q. H. Abbasi [et al.] // Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2020. – Vol. 62 (5). – P. 1703–1710.

84 Design of Multiband Frequency Selective Surface Using Fractal Elements / X. Rong, Z. H. Cheng, Z. Z. Yuan, W. Wen // 2008 Asia-Pacific Microwave Conference. – Macau, 16–20 December 2008. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/APMC.2008.4958588.

85 A New Miniaturized Fractal Frequency Selective Surface with Excellent Angular Stability / J. Xue, S. Gong, P.-F. Zhang, W.-T. Wang, F. Zhang // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2010. – Vol. 13. – P. 131–138.

86 Multiband FSS with Fractal Characteristic Based on Jerusalem Cross Geometry / H. V. H. Silva Filho, C. P. N. Silva, M. R. T. de Oliveira [et al.] // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2017. – Vol. 16, no. 4. – P. 932–941.

87 Метаповерхность на основе одновитковых планарных спиралей со свойством не отражающего поглотителя в СВЧ диапазоне / И. А. Фаняев, А. Л. Самофалов, И. В. Семченко [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 3 (60). – С. 38–43.

88 Microwave Polarization Converter Consisting of Rectangular Omega Resonators Located on a Dielectric Substrate / I. Semchenko, S. Khakhomov, M. Podalov, A. Samofalov // 2021 Fifteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials), New York 20–24 September 2021. – P. 386–388.

89 Frequency Shielding with FSS for 5G Applications / V. Lavanya, R. Ramya, V. Geetha, Dr. K. Vasudevan // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 7, iss. 6. – P. 4811–4814.

90 Polarization Insensitive and Transparent Frequency Selective Surface for Dual Band GSM Shielding / Y. Yang, W. Li, K. N. Salama, A. Shamim // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2021. – Vol. 69, iss. 5. – P. 2779–2789.

91 Kapoor, A. Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications / A. Kapoor, R. Mishra, P. Kumar // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 61. – 4263–4293.

- 92 Comparative Study of Square and Circular Loop Frequency Selective Surfaces for Millimeter-Wave Imaging Diagnostics Systems / W. Mohyuddin, D. H. Kim, H. C. Choi, K. W. Kim // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – Article ID: 3079.
- 93 Kanth, V. K. A Novel Faraday-Cage Inspired FSS Shield for Stable Resonance Performance Characteristics / V. K. Kanth, S. Raghavan // International Journal of Electronics Letters. – 2018. – DOI: 10.1080/21681724.2018.1545926.
- 94 Convolved FSS Structure for Shielding Application in X-Band Frequency Response / D. Kanchana, S. Radha, B. S. Sreeja, E. Manikandan // IETE Journal of Research. – 2019. – DOI: 10.1080/03772063.2019.1691062.
- 95 A Miniaturized and Polarization Independent Electromagnetic Shield for C and X-Band Applications / M. Bilal, R. Saleem, A. Jabbar, M. F. Shafique // Wireless Personal Communications. – 2021. – Vol. 117. – P. 405–416.
- 96 Hashemi, S. Room Shielding with Frequency-Selective Surfaces for Electromagnetic Health Application / S. Hashemi, A. Abdolali // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2016. – DOI: 10.1017/S1759078716000015.
- 97 A Miniaturized Low-Profile Multilayer Frequency-Selective Surface Insensitive to Surrounding Dielectric Materials / M. N. Hussein, J. Zhou, Y. Huang [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2017. – Vol. 65, n. 12. – P. 4851–4860.
- 98 Sampath, S. S. A Single-Layer UWB Frequency-Selective Surface with Band-Stop Response / S. S. Sampath, R. Sivasamy // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2018. – DOI: 10.1109/TEMC.2018.2886285.
- 99 Tayde, Y. Polarization-Insensitive Broadband Multi-layered Absorber Using Screen Printed Patterns of Resistive Ink / Y. Tayde // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2018. – DOI: 10.1109/LAWP.2018.2879274.
- 100 Azemi, S. N. A Reconfigurable FSS Using a Spring Resonator Element / S. N. Azemi, K. Ghorbani, W. S. T. Rowe // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2013. – Vol. 12. – P. 781–784.
- 101 Design and Fabrication of a Reconfigurable and Flexible Frequency Selective Surface with a Buckling Dipole via Mechanical Stretching / X. Fan [et al.] // Soft Science. – 2021. – Vol. 1, iss. 13. – DOI: 10.20517/ss.2021.18.
- 102 3D Flexible Frequency Selective Surface with Stable Electromagnetic Transmission Properties / X. Fan, Z. Pan, S. Chen [et al.] // Advanced Materials Technologies. – 2022. – Vol. 7, iss. 7. – Article number: 2101316. – DOI: 10.1002/admt.202101316.
- 103 Максимова, А. Г. Широкополосная поглощающая метаповерхность на основе воды / А. Г. Максимова, М. А. Одит // Матер. VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург, 3–6 июня 2019 г. – С. 514–518.

104 Karacan, N. An All-Dielectric Microwave Absorber Composed of a Dielectric Hollow Cylinder Filled by Chemical Liquids and its Application on Sensing / N. Karacan, E. Ekmekci // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Vol. 314. – Article number: 112235. – DOI: 10.1016/j.sna.2020.112235.

105 A Novel 4-DOF Wide-Range Tunable Frequency Selective Surface Using an Origami “Eggbox” Structure / Y. Cu, R. Bahr, S. V. Rijs, M. Tentzeris // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2021. – Vol. 13. – P. 727–733.

106 An Improved Fabrication Technique for the 3-D Frequency Selective Surface based on Water Transfer Printing Technology / M. Harnois, M. Himdi, W. Y. Yong [et al.] // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – Article number: 1714. – DOI: 10.1038/s41598-020-58657-5.

107 Sanz-Izquierdo, B. 3-D Printing of Elements in Frequency Selective Arrays / B. Sanz-Izquierdo, E. A. Parker // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2014. – Vol. 62, no. 12. – P. 6060–6066.

108 Constructing Repairable Meta-Structures of Ultra-Broad-Band Electromagnetic Absorption from Three-Dimensional Printed Patterned Shells / W.-L. Song, Z. Zhou, L.-C. Wang [et al.] // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2017. – Vol. 9, no. 49. – P. 43179–43187.

109 3D-printed Carbon Fiber/Polyamide-Based Flexible Honeycomb Structural Absorber for Multifunctional Broadband Microwave Absorption / P. Gong, L. Hao, Y. Li [et al.] // Carbon. – 2021. – Vol. 185. – P. 272–281.

110 Broadband Mechanical Metamaterial Absorber Enabled by Fused Filament Fabrication 3D Printing / D. D. Lin, J. Park, J. Lee [et al.] // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 55. – Article number: 102856. – DOI: 10.1016/j.addma.2022.102856.

111 Electromagnetic Wave Absorption and Compressive Behavior of a Three-Dimensional Metamaterial Absorber Based on 3D Printed Honeycomb / W. Jiang, L. Yan, H. Ma [et al.] // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – Article number: 4817. – DOI: 10.1038/s41598-018-23286-6.

112 From Materials to Components: 3D-Printed Architected Honeycombs Toward High-Performance and Tunable Electromagnetic Interference Shielding / Q. Lv, X. Tao, S. Shi [et al.] // Composites Part B: Engineering. – 2022. – Vol. 230. – Article number: 109500. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109500.

113 3D Inductive Frequency Selective Structures Using Additive Manufacturing and Low-Cost Metallization / J. A. Vásquez-Peralvo, A. Tamayo-Domínguez, G. Pérez-Palomino [et al.] // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – Article number: 552. – DOI: 10.3390/s22020552.

114 Stretchable Tunable Frequency Selective Fabrics and Their Electromagnetic Response Mechanism / H. Cheng, Y. Zhang, H. Zhang [et al.] // Textile Research Journal. – 2015. – Vol. 86, iss. 7. – P. 776–784.

115 Realization of Planar Frequency Selective Fabrics and Analysis of Transmission Characteristics / F. Guan, H. Xiao, M. Shi [et al.] // Textile Research Journal. – 2016. – Vol. 87, iss. 11. – P. 1360–1366.

116 Origami Tunable Frequency Selective Fabric and its Tuning Mechanism / J. Chen, H. Zhang, H. Ji [et al.] // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2023. – Vol. 164. – Article number: 107257. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107257.

117 A Review of Metal Oxide-Related Microwave Absorbing Materials from the Dimension and Morphology Perspective / T. Hou, B. Wang, Z. Jia [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2019. – Vol. 30. – P. 10961–10984.

118 Double Layer Microwave Absorber Based on Cu Dispersed SiC Composites / S. Singh, A. Sinha, R. H. Zunke [et al.] // Advanced Powder Technology. – 2018. – Vol. 29, iss. 9. – P. 2019–2026.

119 Multimaterial 3D-Printing of Graphene/Li_{0.35}Zn_{0.3}Fe_{2.35}O₄ and Graphene / Carbonyl Iron Composites With Superior Microwave Absorption Properties and Adjustable Bandwidth / Y. Zuo, X. Su, X. Li [et al.] // Carbon. – 2020. – Vol. 167. – P. 62–74.

120 Double-Layer Absorbers Based on Hierarchical MXene Composites for Microwave Absorption Through Optimal Combination / P. Liu, S. Chen, M. Yao [et al.] // Journal of Materials Research. – 2020. – DOI: 10.1557/jmr.2020.122.

121 Fe₂O₃-Decoration and Multilayer Structure Design of Ti₃C₂ MXene Materials Toward Strong and Broadband Absorption of Electromagnetic Waves in the X-band Region / J. Su, X. Zhao, W. Zhou [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2021. – Vol. 32. – P. 25919–25932.

122 Microwave Absorption Properties of Double-Layer Structured Basalt Fiber/Resin Composites Containing Carbon Black and Nano-Fe₃O₄ / T. Si, X. Shuai, C. Ma [et al.] // Composite Interfaces. – 2023. – Vol. 30, iss. 9. – P. 959–981.

123 Kumar A. Design of Two-layer Microwave Absorber at X-bandusing Genetic Algorithm / A. Kumar, S. Singh // Materials of 2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems. – 2016. – P. 503–506.

124 Microwave Absorption Performance of Single-Layer and Multi-Layer Structures Prepared by CNTs/Fe₃O₄ Nonwoven Materials / R. Zhan, J. Zhang, Q. Gao [et al.] // Crystals. – 2021. – Vol. 11, iss. 8. – Article number: 1000. – DOI: 10.3390/cryst11081000.

125 A Review of Graphene-Based Broad Bandwidth Microwave Absorbing Textile-Based Composites in the Low-Frequency Range / W. Aiqiong, J. Li, M. Chen, X. Zhao [et al.] // Journal of Industrial Textiles. – 2022. – Vol. 52. – DOI: 10.1177/15280837221133113.

126 Thin Broadband Microwave Absorber with Conductive and Magnetic Materials Coated on a Glass Fabric / Y.-W. Nam, J.-H. Choi, J.-M. Huh [et al.] // Journal of Composite Materials. – 2017. – Vol. 52, iss. 10. – P. 1413–1420.

127 Ranking Broadband Microwave Absorption Performance of Multilayered Polymer Nanocomposites Containing Carbon and Metallic Nanofillers / Y. Danlee, F. Mederos-Henry, S. Hermans [et al.] // Frontiers in Materials. – 2020. – Vol. 7. – Article number: 214. – DOI: 10.3389/fmats.2020.00214.

128 Achieving Superior GHz-Absorption Performance in VB-Group Laminated VS_2 Microwave Absorber with Dielectric and Magnetic Synergy Effects / Z. Zhou, X. Yang, D. Zhang [et al.] // Advanced Composites and Hybrid Materials. – 2022. – Vol. 5. – P. 2317–2327.

129 Design and Advanced Manufacturing of Electromagnetic Interference Shielding Materials / J. Liu, M.-Y. Yu, Z.-Z. Yu, V. Nicolosi // Materials Today. – 2023. – Vol. 66. – P. 245–272.

130 Pattanayak, S. S. Microwave Absorption Performance Enhancement of Corn Husk-Based Microwave Absorber / S. S. Pattanayak, S. H. Laskar, S. Sahoo // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2021. – Vol. 32. – P. 1150–1160.

131 Pattanayak, S. S. Microwave Absorption Efficiency of Double-Layer Corn Husk-Based Microwave Absorber / S. S. Pattanayak, S. H. Laskar, S. Sahoo // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2022. – Vol. 33. – P. 5149–5160.

132 Broadband Microwave Absorbing Composites with a Multi-Scale Layered Structure Based on Reduced Graphene Oxide Film as the Frequency Selective Surface / F. Ye, C. Song, Q. Zhou [et al.] // Materials. – 2018. – Vol. 11, iss. 9. – Article number: 1771. – DOI: 10.3390/ma11091771.

133 A Frequency Selective Surface Loaded Two-Layer Composite for Tunable Microwave Absorption / Y. Zhao, Q. Wang, Y. Sun [et al.] // Materials Research Express. – 2022. – Vol. 9. – Article number: 066301. – DOI: 10.1088/2053-1591/ac74a6.

134 Microwave Absorption Properties of FSS-Impacted Composites as a Broadband Microwave Absorber / R. Panwar, S. Puthucher, D. Singh [et al.] // Advanced Composite Materials. – 2016. – Vol. 26, iss. 2. – P. 99–113.

135 Study on Frequency Selective / Absorption / Reflection Multilayer Composite Flexible Electromagnetic Wave Absorbing Fabric / H. Zhang, J. Chen, Y. Wang [et al.] // Textile Research Journal. – 2021. – Vol. 91, iss. 15–16. – P. 1752–1762.

136 Microwave Metamaterial Absorber for Non-Destructive Sensing Applications of Grain / Y. Zhang, J. Zhao, J. Cao, B. Mao // Sensors. – 2018. – Vol. 18, iss. 6. – Article number: 1912. – DOI: 10.3390/s18061912.

137 Microwave Metamaterial Absorbers with Controllable Luminescence Features / W. Chen, J. Zhan, Y. Zhou [et al.] // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2021. – Vol. 13, iss. 45. – P. 54497–54502.

138 An Angle-Stable Ultra-Wideband Single-Layer Frequency Selective Surface Absorber / C. Zhang, S. Liu, H. Ni [et al.] // Electronics. – 2023. – Vol. 12, iss. 18. – Article number: 3776. – DOI: 10.3390/electronics12183776.

139 Youssef, D. Double Layer-Resistive FSS Ultra Wideband Absorber with Improved Thickness to Bandwidth Ratio / D. Youssef, A. Shaker, K. R. Mahmoud // 2019 7th International Japan-Africa Conference on Electronics, Communications, and Computations. – 2019. – P. 140–143.

140 A Ultra-Wideband Thin Microwave Absorber Using Inkjet-Printed Frequency-Selective Surfaces Combining Carbon Nanotubes and Magnetic Nanoparticles / R. Jaiswar, F. Mederos-Henry, V. Dupont [et al.] // Applied Physics A. – 2019. – Vol. 125, no. 7. Article number: 473. – DOI: 10.1007/s00339-019-2764-9.

141 Multilayer Transparent Bendable Broadband Microwave Absorber Covering the Frequency Band Near 5 GHz / S. Lai, Y. Guo, G. Liu, Y. Liu // Optical Materials Express. – 2022. – Vol. 12, iss. 11. – P. 4444–4455.

142 Liu, T. Ultrawide Bandwidth Electromagnetic Wave Absorbers Composed of Double-Layer Frequency Selective Surfaces with Different Patterns / T. Liu, S.-S. Kim // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – Article number: 13889. – DOI: 10.1038/s41598-018-32181-z.

143 Слепенков, Д. В. Создание трехпикового поглотителя в диапазоне 1–6 ГГц / Д. В. Слепенков // Актуальные вопросы физики и техники : X Республикаанская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов сборник материалов, г. Гомель, 22 апреля 2021 г. : в 2 ч. / М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол. : Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – Ч. 1. – С.191–194.

144 Modeling of a Three-Peak Absorber in the 9–13 GHz Range / D. Slepiankou, A. Balmakou, S. Khakhomov, I. Semchenko // Inter-Academia 2021 : the 19th International Conference on Global Research and Education, Gomel, 20–22 October 2021 / F. Skorina Gomel State University Gomel ; editorial board: S. A. Khakhomov (Chief editor) [et al.]. – Gomel, 2021 – P. 110–113.

145 Design, Preparation and Electromagnetic Characteristics Analysis of Single, Double and Three-Layer Cross-Shaped Frequency Selective Fabrics / F. Guan, K. Xue, D. Li [et al.] // Textile Research Journal. – 2022. – Vol. 92, iss. 11–12. – P. 1966–1976.

- 146 Analysis of Electromagnetic Transmission Characteristics of Square Loop Frequency Selective Fabrics with Different Layers / F. Guan, D. Li, J. Li [et al.] // Textile Research Journal. – 2022. – Vol. 92, iss. 21–22. – P. 4288–4297.
- 147 Ren, J. 3D-Printed Low-Cost Dielectric-Resonator-Based Ultra-Broadband Microwave Absorber Using Carbon-Loaded Acrylonitrile Butadiene Styrene Polymer / J. Ren, J. Y. Yin // Materials. – 2018. – Vol. 11, iss. 7. – Article number: 1249. – DOI: 10.3390/ma11071249.
- 148 Wide-Angle Microwave Absorption Properties of Multilayer Metamaterial Fabricated by 3D Printing / D. Yang, Y. Yin, Z. Zhang [et al.] // Materials Letters. – 2020. – Article number: 128571. – DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128571.
- 149 A 3D-Printed Lightweight Broadband Electromagnetic Absorbing Metastructure with Preserved High-Temperature Mechanical Property / Z. Yang, Q. Liang, Y. Duan [et al.] // Composite Structures. – 2021. – Vol. 274. – Article number: 114330. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114.
- 150 Enhanced Microwave Absorption of Rice Husk-Based Pyramidal Microwave Absorber with Different Lossy Base Layer / L. Y. Seng, S. P. Jack, Y. K. Yeow [et al.] // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2020. – Vol. 14, iss. 3. – P. 215–222.
- 151 Biswas, A. An Ultra-Wideband Origami Microwave Absorber / A. Biswas, C. L. Zekios, S. V. Georgakopoulos // 2021 IEEE 21st Annual Wireless and Microwave Technology Conference. – 2021. – DOI: 10.1109/wamicon47156.2021.944.
- 152 Ultra-Wideband Microwave Absorber by Connecting Multiple Absorption Bands of Two Different-Sized Hyperbolic Metamaterial Waveguide Arrays / X. Yin, C. Long, J. Li [et al.] // Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5, iss. 1. – Article number: 15367. – DOI: 10.1038/srep15367.
- 153 Flexible Thin Broadband Microwave Absorber Based on a Pyramidal Periodic Structure of Lossy Composite / Y. Huang, X. Yuan, C. Wang [et al.]. – 2018. – Vol. 43, iss. 12. – Article number: 2764. – DOI: 10.1364/ol.43.002764.
- 154 Wideband Metal-Dielectric Multilayer Microwave Absorber Based on a Single Step FDM Process / X. Lleshi, R. Grelot, T. Q. Van Hoang [et al.] // 2019 49th European Microwave Conference (EuMC). – 2019. – DOI: 10.23919/eumc.2019.8910777.
- 155 A Review: Advancement in Metamaterial Based RF and Microwave Absorbers / S. Jorwal, A. Dubey, R. Gupta [et al.] // Sensors and Actuators A: Physical. – 2023. – Vol. 354. – Article number: 114283. – DOI: 10.1016/j.sna.2023.114283.
- 156 Decoupling and Cloaking of Interleaved Phased Antenna Arrays Using Elliptical Metasurfaces / H. Mehrpour Bernety, A. B. Yakovlev, H. G. Skinner [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68, iss. 6. – P. 4997–5002.

157 High-Sensitivity Microwave Sensor for Liquid Characterization Using a Complementary Circular Spiral Resonator / X. Zhang, C. Ruan, T. Haq, K. Chen. – 2019. – Sensors. – Vol. 19. – Article number: 787. – DOI: 10.3390/s19040787.

158 Research on a High-Sensitivity Asymmetric Metamaterial Structure and its Application as Microwave Sensor / Y. Cao, C. Ruan, K. Chen, X. Zhang // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – Article number: 1255. – DOI: 10.1038/s41598-022-05255-2.

159 Abdolrazzaghi, M. Techniques to Improve the Performance of Planar Microwave Sensors: A Review and Recent Developments / M. Abdolrazzaghi, V. Nayyeri, F. Martin // Sensors (Basel). – 2022. – Vol. 22, iss. 18. – Article number: 6946. – DOI: 10.3390/s22186946.

160 Jiang, Z. H. Dispersion Engineering of Metasurfaces for Dual-Frequency Quasi-Three-Dimensional Cloaking of Microwave Radiators / Z. H. Jiang, D. H. Werner // Optics Express. – 2016. – Vol. 24, iss. 9. – 9629–9644.

161 A Review on Metamaterial Absorbers: Microwave to Optical / Y. I. Abdulkarim, A. Mohanty, O. P. Acharya [et al.] // Frontiers in Physics. – 2022. – Vol. 10. – DOI: 10.3389/fphy.2022.893791.

162 Main Properties of Al₂O₃ Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering of an Al₂O₃ Ceramic Target at Different Radio-Frequency Power and Argon Pressure and Their Passivation Effect on p-Type c-Si Wafers / J. A. García-Valenzuela, R. Rivera, A. B. Morales-Vilches [et al.] // Thin Solid Films. – 2016. – Vol. 619. – P. 288–296.

163 Low-Cost Nanostructured Coating of Anodic Aluminium Oxide Synthesized in Sulphuric Acid as Electrolyte / F. A. Bruera, G. R. Kramer, M. L. Vera, A. E. Ares // Coatings. – 2021. – Vol. 11. – Article number: 309. – DOI: 10.3390/coatings11030309.

164 Какие частоты выделены сотовым операторам в Беларуси. – URL: <https://www.mpt.gov.by/ru/faq/kakie-chastoty-vydeleny-sotovym-operatoram-v-belarusi> (дата обращения: 07.05.2023).

165 Technology Brief 3: Microwave Ovens URL: <https://em.eecs.umich.edu/pdf/tb3.pdf> (date of access: 07.05.2023).

166 The Procedure for Using Radio Frequency Wi-Fi Channels. – URL: https://belgie.by/en/kontrol_res_i_vchu/pirk_wi-fi/ (date of access: 07.05.2023).

167 Умные счетчики: какие бывают и зачем нужны. – URL: <https://www.saures.ru/blog/umnye-schetchiki/umnye-schetchiki-2020> (дата обращения: 07.05.2023).

168 Microwave – HISTORY.PHYSIO. – URL: <https://history.physio/microwave/> (date of access: 07.05.2023).

169 Патент RU 2735496C1, МПК A61N5/00 (2006.01). СВЧ-устройство для деструкции патологически измененных тканей организма : № 2020116254 : заявлено 18.05.2020 : опубл. 03.11.2020/ Тома А. И., Ёлкин В. А., Комаров В. В., Дорохов Д. С., Тома И. А., Алтухов П. Л. ; заявитель : Тома А. И. – 14 с.

- 170 Ильичев, В. А. От «Ревеня» до «Примы». Из истории развития радиолокационных станций / В. А. Ильичев, А. Н. Заруцкий // Военно-исторический журнал. – 2023. – № 8. – С. 82–87.
- 171 Стенд для оценки температуры поверхности фрагментов природных сред и их имитаторов / В. В. Лобунов, А. И. Кухаренко, Т. В. Борбелько, Л. М. Лыньков // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, №2. – С. 145–151.
- 172 Прудник, А. М. Экспресс-методика оценки звукоизолирующих свойств конструкций для средств защиты информации / А. М. Прудник, С. Н. Петров, Л. М. Лыньков // Управление защищкой информации. – 2009. – Т. 13, № 1. – С. 67–70.
- 173 ГЛЮИ.464425.001 РЭ. Локатор для обнаружения устройств несанкционированного съема информации ЛВ-2Р. Руководство по эксплуатации. – Минск: БГУИР, 2016. – 34 с.
- 174 Catalkaya, I. An Optimized Microwave Absorber Geometry Based on Wedge Absorber / I. Catalkaya, S. Kent // ACES Journal. – 2017. – Vol. 32, no. 7. – P. 621–627.
- 175 Chena, T.-K., Transmission Line Analysis of the Archimedean Spiral Antenna in Free Space. Journal of Electromagnetic Waves and Applications / T.-K. Chena, G. H. Huff. – 2014. – Vol. 28, iss. 10. – P. 1175–1193.
- 176 Rohde, U. L. Möbius Strips and Metamaterial Symmetry: Theory and Applications / U. L. Rohde, A. Poddar // Microwave Journal. – 2014. – Vol. 57, no. 11. – P. 76–88.
- 177 Hamilton, J. K. Absorption Modes of Möbius Strip Resonators / J. K. Hamilton, I. R. Hooper, C. R. Lawrence // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Article number: 9045. – DOI: 10.1038/s41598-021-88280-x.
- 178 Split Ring Antennas and Their Application for Antenna Miniaturization / Y. Liu, L. Shafai, D. Isleifson, C. Shafai // Sensors. – 2023. – Vol. 23, iss. 2. – Article number: 846. – DOI: 10.3390/s23020846.
- 179 Потапов, А. А. Многократное рассеяние волн во фрактальных дискретных случайно-неоднородных средах // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2018. – № 1. – С. 3–21.
- 180 Grinchik, N. Electrodynamics of Inhomogeneous (Laminated, Angular) Structures. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications / N. Grinchik. – 2014. – Vol. 6. – P. 57–105.
- 181 Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля : ГОСТ 3647-80 ; введ. 01.01.82. – М. : НПК Издательство стандартов, 1982. – 19 с.
- 182 Mathematical Model for Study Characteristics of Ultra-High Frequency Selective Electromagnetic Shields Based on Circular Helical Elements / O. Boiprav,

V. Bogush, S. A. Abdaljlil, A. Zerek // 2023 IEEE AFRICON Conference. Nairobi, 20–22 September 2023. – DOI: 10.1109/AFRICON55910.2023.10293605.

183 Wheeler, H. A. Simple Inductance Formulas for Radio Coils / H. A. Wheeler // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. – 1928. – Vol. 16, iss. 10. – P. 1398–1400.

184 Калашников С. Г. Электричество: 6-е изд. / С. Г. Калашников. – М. : ФИЗМАЛИТ, 2003. – 624 с.

185 Цицикян, Г. Н. Коэффициенты взаимной индукции и самоиндукции однослойных и двухслойных катушек / Г. Н. Цицикян, М. Ю. Антипов, С. Н. Кунаев // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2022. – Т. 1, № 399. – С. 130–135.

186 Бизюк, А. Н. Имитационное моделирование текстильных армирующих материалов / А. Н. Бизюк, Н. Н. Ясинская // Материалы докладов 50-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной Году науки : в 2 т. / Учреждение образования «Витебский государственный технический университет». – Витебск, 2017. – Т. 2. – С. 3–5.

187 Лушин, Е. В. Способы измерения индуктивности / Е. В. Лушин, А. Н. Долгов // Приволжский научный вестник. – 2013. – № 12 (28). – С. 36–40.

188 Regularities of Nanofocusing of the Electromagnetic Field of a Fractal Rough Surface / N. N. Grinchik, G. M. Zayats, O. V. Boiprav, K. V. Dobrego [et al.] // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. – 2019. – № 11(08). – P. 117–133.

189 Modeling the Interaction of Solit-Like Pulse Signals with Electromagnetic Shields in the Form of Heterogeneous Media / M. A. Aliseyko, O. V. Boiprav, N. N. Grinchik, A. V. Tarasevich // Edelweiss Chemical Science Journal. – 2020. – Vol. 3, iss. 1. – P. 1–5. – DOI: 10.33805/2641-7383.115.

190 Boiprav, O. V. Improved Technology of Frequency-Selective UHF Electromagnetic Shields Containing Helical Elements / O. V. Boiprav, N. V. Bogush // Modern Electronic Materials. – 2022. – Vol. 8, no. 4. – P. 157–164.

191 Triple-Band Polarization-Insensitive Wide-Angle Ultra-Thin Planar Spiral Metamaterial Absorber / X. Huang, H. Yang, S. Yu; [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 113. – Article number: 213516. – DOI: 10.1063/1.4809655.

192 Zhong, S. Ultrathin and Lightweight Microwave Absorbers Made of Mu-Near-Zero Metamaterials / S. Zhong, S. He // Scientific Reports. – 2013. – Vol. 3. – Article number: 2083.

193 Quad Band Metamaterial Absorber Based on Asymmetric Circular Split Ring Resonator for Multiband Microwave Applications / M. Moniruzzaman, M. T. Islam, G. Muhammad [et al.] // Results in Physics. – 2020. – Vol. 19. – Article number: 103467. – DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103467.

- 194 Mishra, R. K. Design, Simulation, and Fabrication of High-Bandwidth Metamaterial Microwave Absorber (MMA) in X-band for EMI Shielding and Stealth Capability / R. K. Mishra, S. Datar // Journal of Electronic Materials. – 2023. – Vol. 52. – P. 2626–2644.
- 195 Boiprav, O. V. Lightweight Microwave Absorbers with Loop-Like Surface Irregularities Based on Foiled Materials for Anechoic Chambers / O. V. Boiprav, V. A. Bogush // Momento. – 2024. – No. 69. – P. 1–16.
- 196 Boiprav, O. V. Microwave Absorbers Based on Möbius Strip Resonators / O. V. Boiprav, V. A. Bogush, V. S. Chelyadinsky // European Journal of Materials Science and Engineering. – 2024. – Vol. 9, iss. 1. – P. 53–64.
- 197 A Microstrip Metamaterial Split Ring Resonator / V. Sharma, S. S. Pattnaik, T. Garg, S. Devi // International Journal of the Physical Sciences. – 2011. – Vol. 6(4). – P. 660–663.
- 198 Ramachandran, T. A Compact Square-Shaped Left-Handed Passive Metamaterial with Optimized Quintuple Resonance Frequencies for Satellite Applications / T. Ramachandran, M. R. I. Faruque, M. T. Islam // Chinese Journal of Physics. – 2020. – Vol. 67. – P. 360–375.
- 199 Ramachandran, T. Symmetric Square Shaped Metamaterial Structure with Quintuple Resonance Frequencies for S, C, X and Ku Band Applications / T. Ramachandran, M. R. I. Faruque, M. T. Islam // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Article number: 4270. – DOI: 10.1038/s41598-021-83715-x.
- 200 Triple-Band Square Split-Ring Resonator Metamaterial Absorber Design with High Effective Medium Ratio for 5G Sub-6 GHz Applications / M. L. Hakim, M. T. Islam, T. Alam [et al.] // Nanomaterials (Basel). – 2023 – Vol. 13 (2). – Article number: 222. – DOI: 10.3390/nano13020222.
- 201 Flexible Double-Layered Microwave Absorbers Based on Foiled Materials with Mechanically Treated Surface / O. Boiprav, M. Hasanov, V. Bogush, L. Lynkou // New Materials, Compounds and Applications. – 2023. – Vol. 7, no. 2. – P. 100–110.
- 202 Electromagnetic Radiation Shields Based on Anodic Aluminum Oxide / O. V. Boiprav, L. M. Lynkou, N. I. Mukhurov, E. A. A. Al-Mashat // Doklady BSUIR. – 2018. – № 7 (117). – P. 159–161.
- 203 Экранирующие электромагнитное излучение комбинированные конструкции на основе фольгированного алюминия с анодным нанопористым оксидом / Л. М. Лыньков, О. В. Бойправ, Н. И. Мухуров [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : матер. 13-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 16–18 мая 2018 г. ; редкол. А. Ф. Ильющенко [и др.]. – С. 323–325.
- 204 Электромагнитные экраны на основе анодного оксида алюминия для пассивных технических систем защиты информации / Л. М. Лыньков, О. В. Бойправ, Н. И. Мухуров, Е. А. А. Аль-Машат // Комплексная защита

информации : матер. XXIII науч.-практ. конф. Сузdalь, 22–24 мая 2018 г. ; редкол. О. В. Храмов [и др.]. – С. 179–181.

205 Electromagnetic Shielding Material Based on Porous Alumina Membranes Filled with Nickel and Carbon-Containing Needle-Punched Textile / H. Abdulhadi, E. Belousova, O. Boiprav [et al.] // Functional Materials and Nanotechnologies-2020 (FM&NT 2020) : Proceedings of International Scientific Conference, Vilnus, 23–26 November 2020. – P. 103.

206 Патент BY 11818 , МПК H 01Q 17/00 (2006.01). Электромагнитный экран на основе анодного оксида алюминия : № и 20180076 : заявлено 19.03.2018 : опубл. 30.10.2018 / Лыньков Л. М., Бойправ О. В., Мухуров Н. И. : заявитель учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – 3 с.

207 Boiprav, O. Flexible Wideband Microwave Absorbers with Frequency Selective Surface Based on Mechanically Treated Foiled Polymer Film / O. Boiprav, S. A. Abdaljlil, V. Bogush // Proceedings of 2024 IEEE 4th International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, MI-STA 2024. Tripoli, 19–21 May 2024. – Tripoli : IEEE, 2024. – P. 393–397.

208 Гибкие многослойные поглотители электромагнитного излучения с упорядоченно-структурированным промежуточным слоем на основе алюминиевой стружки / О. В. Бойправ, В. С. Челядинский, Л. М. Лыньков, М. В. Тумилович // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 2 (59). – С. 16–21.

209 Design and Manufacture of Electromagnetic Absorber Composed of Boric Acid-Incorporated Wastepaper Composites / A. I. Kaya, A. Cifci, F. Kirdiogullari [et al.] // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 2022. – Vol. 30, no. 3. – Article 23.

210 A Low-Cost Lightweight Microwave Absorber: Silicon Carbide Synthesized from Tissue / R. Tan, J. Zhou, Z. Yao [et al.] // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47, iss. 2. – P. 2077–2085.

211 Product Design from Waste: A Novel Eco-Efficient Pyramidal Microwave Absorber Using Rice Husks and Medium Density Fibreboard Residues / C. F. Jung, D. A. de Jesus Pacheco, F. Sporket [et al.] // Waste Management. – 2021. – Vol. 119. – P. 91–100.

212 Pattanayak, S. S. Design From Waste: an Eco-Efficient Microwave Absorber Using Dried Banana Leaves and Charcoal Based Composite / S. S. Pattanayak, S. H. Laskar, S. Sahoo// Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2022. – Vol. 33, no. 19. – P. 13398–13407.

213 Bin Lailan, N. H. H. Electromagnetic Wave Absorbing Performance of Activated Carbon Based Agricultural Waste – A Review / N. H. H. bin Lailan,

F. M. Idris // Proceeding Insan Junior Researchers International Conference 2021 (iJURECON 2021), Malaysia, 15–17 October 2021. – P. 95–98.

214 Microwave Absorption Property of Coffee Waste Bio-Carbon Modified by Industrial Waste MnFe₂O₄ Particles / H. Ali, W. Ding, M. A. Aslam [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9, iss. 6. – P. 12869–12879.

215 Malek, F. Pyramidal Microwave Absorber Design From Waste Material Using Rice Husk and Rubber Tire Dust / F. Malek, H. Nornikman, O. Nadiah // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. – 2015. – Vol. 4, no. 1. – P. 23–30.

216 Kumar Dash, A. Development of Microwave Absorbing Material with Organic Waste based Epoxy Blended Composite / A. Kumar Dash, G. Nath // Indian Journal of Pure & Applied Physics. – 2022. – Vol. 60. – P. 482–488.

217 Gupta, S. Agricultural Waste Based-Coco Peat and Coconut Shell Activated Carbon Microwave Absorber / S. Gupta, G. Deep // 2016 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), India, 5–9 December 2016. – P. 1–4, doi: 10.1109/IMaRC.2016.7939621.

218 Microwave Absorption Ability of Steel Slag and Road Performance of Asphalt Mixtures Incorporating Steel Slag / B. Lou, Z. Liu, A. Sha [et al.] // Materials. – 2020. – Vol. 13, no. 3. – Article 663.

219 Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов / М. Р. Н. Неамах, О. В. Бойправ, Т. В. Борботько, В. Б. Соколов [и др.] ; под редакцией Л. М. Лынькова. – Минск : Бестпринт, 2013. – 182 с.

220 Glass Foam Composites Based on Tire's Waste for Microwave Absorption Application / Y. Lamri, R. Benzerga, A. Ayadi [et al.] // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2020. – Vol. 537. – Article 120017.

221 An Ecofriendly, Cost-Effective, Lightweight Microwave Absorber Based on Waste Toner / H. Habib, Y. Atassi, A. Salloum [et al.] // Journal of Electronic Materials. – 2021. – vol. 50. – P. 2049–2056.

222 Development of E-Waste Based Composite Microwave Absorbing Material / A. Verma, N. Narang, D. Singh, G. D. Varma / Defence Science Journal. – 2021. – Vol. 71, no. 3. – P. 365–371.

223 Broadband Reflectionless Metasheets: Frequency-Selective Transmission and Perfect Absorption / V. S. Asadchy, I. A. Faniaye, Y. Ra'di [et al.] // Physical Review X. – 2015. – Vol. 5, iss. 3. – Article 031005.

224 Gaoui, B. Enhancement of the Shielding Effectiveness of Multilayer Materials by Gradient Thickness in the Stacked Layers / B. Gaoui, A. Hadjadj, M. Kiouss // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2017. – Vol. 28. – P. 11292–11299.

225 Boiprav, O. Microwave Absorbers Based on Aluminum Shavings / O. Boiprav, S. A. Abdaljlil, A. Zerek, V. Chelyadinsky // Proceedings of IEEE 3rd International Conference on Signal, Control and Communication, SCC 2023. Tunisia, 1–3 December 2023. – Tunisia : IEEE, 2023. – DOI: 10.1109/SCC59637.2023.10527652.

226 Бойправ, О. В. Гетерогенные радиопоглощающие композиционные материалы на основе порошкообразных углей для защиты приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех / О. В. Бойправ, Е. С. Белоусова, Д. В. Бордиловская // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 360–369.

227 Charcoal-Containing Building Materials for Electromagnetic Radiation Shielding / O. V. Boiprav, E. S. Belousova, E. S. Ahmetdinova, N. V. Bogush // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – Vol. 117, no. 1. – Article number: 11709. – DOI: 10.34910/MCE.117.9.

228 Boiprav, O. V. Electromagnetic Radiation Reflection, Transmission and Absorption Characteristics of Microwave Absorbers Based on Dilatant Liquids and Powdered Activated Wood Charcoal / O. V. Boiprav, V. A. Bogush, L.M. Lynkou // Materials Physics and Mechanics. – 2024. – Vol. 51, iss. 6. – P. 127–134.

229 Boiprav, O. V. Advanced Layered Flexible Radio-Absorbing Materials Based on Powdered Charcoal / O. V. Boiprav, V. A. Bogush // Inorganic Materials: Applied Research. – 2024. – Vol. 15, no. 2. – P. 280–288.

230 Бойправ, О. В. Характеристики отражения, передачи и поглощения электромагнитного излучения углесодержащих материалов, пропитанных водными растворами хлоридов / О. В. Бойправ, Е. С. Белоусова, В. С. Мокеров // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 215–224.

231 Дозатор весовой FZ-100. – URL: <https://www.ipack.by/katalog-produktsii/dozatory/fz-100> (дата обращения: 15.10.2024).

232 Штукатурная станция УППР | Завод Ремстройдормаш. – URL: <http://www.remstroy.info/en/node/110> (дата обращения: 15.10.2024).

233 Дозатор пневматический типа ДПВЖ: продажа, цена в Минске. – URL: <https://ampika.by/p180098527-dozator-pnevmaticheskij-tipa.html> (дата обращения: 15.10.2024).

234 Что означают уровни секретности шредеров?. – URL: https://fellowes.ru/resursy/unichtozhiteli_dokumentov_resursi/cto_oznachayut_urovni_sekretnosti_shrederov/ (дата обращения: 15.10.2024).

235 Шлифовальная машинка Rupes LE71TEC/STD. – URL: <https://colorformula.by/product/shlifovalnaya-mashinka-rupes-le71tec-std> (дата обращения: 15.10.2024).

236 Патент BY 24441, МПК H 01Q 17/00 (2006.01), B 32B 7/03 (2006.01). Способ изготовления широкополосного поглотителя электромагнитного

излучения СВЧ-диапазона с упорядоченно-структурированным поверхностным слоем и широкополосный поглотитель электромагнитного излучения, изготовленный этим способом : № а 20230113 : заявлено 12.05.2023 : опубл. 20.11.2024 / Бойправ О. В., Богуш В. А., Лыньков Л. М. ; заявитель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – 4 с.

237 Патент ВY 12457, МПК Н 01Q 17/00 (2006.01). Устройство для защиты человека от воздействия электромагнитного излучения мобильного телефона : № и 20200126 : заявлено 19.05.2020 : опубл. 30.12.2020 / Лыньков Л. М., Богуш В. А., Бойправ О. В. ; заявитель учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – 3 с.

238 Патент ВY 23305, МПК Н 01Q 17/00 (2006.01). Способ изготовления эластичного электромагнитного экрана и электромагнитный экран, изготовленный этим способом : № а 20190068 : заявлено 12.03.2019 ; опубл. 28.02.2021 / Лыньков Л. М., Богуш В. А., Бойправ О. В. ; заявитель учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». – 4 с.

239 Электромагнитные и звукоизоляционные свойства комбинированных конструкций экранов на основе иглопробивного материала и фрагментов алюминиевой фольги / Х. Д. А. Абдулхади, Е. А. А. Аль-Машатт, О. В. Бойправ [и др.] // Доклады БГУИР. – 2020. – 18(1). – С. 89–95.

240 Эластичные электромагнитные экраны на основе комбинированных металлокодержащих элементов / О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков, Е. А. А. Аль-Машатт, Х. Д. А. Абдулхади // Комплексная защита информации : матер. XXIII науч.-практ. конф. Сузdalь, 22–24 мая 2018 г. ; редкол. О. В. Храмов [и др.]. – С. 312–315.

241 Исследование взаимодействия электромагнитного излучения инфракрасного диапазона длин волн с радиопоглотителями на основе металлокодержащих элементов / О. В. Бойправ, В. В. Лобунов, Л. М. Лыньков, Е. А. А. Аль-Машатт // Авиационные материалы и технологии. – 2020. – № 2 (59). – С. 89–94.

242 Бойправ, О. В. Гибкие радиопоглощающие структуры на основе фольгированных материалов / О. В. Бойправ, Н. В. Богуш, Л. М. Лыньков // Приборостроение-2021 : матер. 14-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–19 ноября 2021 г. ; редкол. О. К. Гусев [и др.]. – С. 254–256.

243 Бойправ, О. В. Гибкие электромагнитные экраны на основе алюминиевых фольгированных материалов для защиты средств обработки информации от помех / О. В. Бойправ, Н. В. Богуш, Л. М. Лыньков, М. В. Павленок // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики : электронный сборник

статей I Международной научно-практической конференции. Новополоцк, 27–28 окт. 2022 г. ; редкол. : Ю. Я. Романовский [и др.]. – С. 314–319.

244 Бойправ, О. В. Гибкие слоистые радиопоглотители на основе фольгированных материалов / О. В. Бойправ, Н. В. Богуш, М. В. Павлёнок // Приборостроение-2022 : материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 16–18 нояб. 2022 г. / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – С. 219–221.

245 Исследования и разработки в области создания материалов, технологий и средств обеспечения безопасности / В. А. Богуш, Л. М. Лыньков, Н. В. Насонова [и др.] // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 2. – С. 42–54.

246 Boiprav, O. Improved Technique for Manufacturing of the Elasctic Air-Permeable Electromagnetic Radiation Absorbers Based on Foil / O. Boiprav, S. A. Abdaljlil, A. Zerek // Proceedings of 2023 IEEE 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, MI-STA 2023. Benghazi, 21–23 May 2023. – Benghazi : IEEE, 2023. – P. 501–509.

247 Поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе алюминийсодержащих фольгированных материалов / О. В. Бойправ, Н. А. Василенков, С. С. Грабчиков [и др.] // Электромагнитная совместимость : сборник докладов XIII Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 6–7 июня 2024 г. – С. 50–62.

248 Корнишин, П. Н. Информационная безопасность / П. Н. Корнишин, С. С. Костерин. – Владивосток, 2003. – 155 с.

249 Зайчук, А. В. Основные пути утечки информации и несанкционированного доступа в корпоративных сетях / А. В. Зайчук // Защита информации. – 2004. – № 4. – С. 19–24.

250 Хорев А. А. Технические каналы утечки акустической (речевой) информации / А. А. Хорев // Специальная техника. – 2009. – № 5. – С. 12–26.

251 Хорев, А. А. Техническая защита информации. Т. 1. Технические каналы утечки информации / А. А. Хорев. – М.: НПЦ «Аналитика», 2008. – 436 с.

252 Хорев, А. А. Классификация электронных устройств перехвата информации / А. А. Хорев // Спецтехника и связь. – 2009. – С. 46–49.

253 Алексеев, В. В. Классификация акустических каналов утечки информации в помещениях офисного типа / В. В. Алексеев, А. В. Яковлев, М. В. Моисеева // Материалы международной конференции «Информатика: проблемы, методы, технологии», Воронеж, 11–12 февраля 2021 г. – С. 665–668.

254 Экспериментальное обоснование возможности использования эластичных и воздухопроницаемых электромагнитных экранов на основе фольгированных материалов для защиты речевой информации от перехвата / О. В. Бойправ, А. В. Потапович, В. А. Богуш, Л. М. Лыньков // Безопасность информационных технологий. – 2021. – Т. 28, № 2. – С. 44–53.

255 Электромагнитные экраны на основе трикотажных и фольгированных материалов для технических средств защиты информации / Л. М. Лыньков, О. В. Бойправ, Н. И. Мухуров, Е. А. А. Аль-Машатт // Комплексная защита информации : матер. XXIV науч.-практ. конф. Витебск, 21–23 мая 2019 г. ; редкол. В. В. Гайдукевич [и др.]. – С. 78–80.

256 Эластичные конструкции электромагнитных экранов для защиты информации от перехвата по комплексируемым техническим каналам утечки / Л. М. Лыньков, В. А. Богуш, О. В. Бойправ [и др.] // Комплексная защита информации : матер. XXV науч.-практ. конф., Россия, 15–17 сентября 2020 г. ; редкол. О. В. Храмов [и др.]. – С. 197–199.

Научное издание

БОЙПРАВ Ольга Владимировна

**АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИЕ
ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ
ДЛЯ СВЧ-УСТРОЙСТВ**

ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК **X.X. XXXXX**

КОРРЕКТОР **X.X. XXXXX**

Подписано в печать 24.06.2025. Формат 60×84 ¼.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура «Century Schoolbook».

Усл. печ. л. 11,86. Уч. изд. л. 10,1.

Тираж 50 экз. Заказ 246.

Издатель и полиграфическое исполнение: УП «Бестпринт»

Лицензия ЛИ № 02330/0494371 от 16.03.2009. Лицензия ЛП № 02330/0494175 от 03.04.2009.

220026, Минск, ул. Филатова, 9