

# Гибридные пассивно-активные миниатюрные системы электромагнитной защиты

В. Лучинин, д. т. н.<sup>1</sup>, О. Тестов<sup>2</sup>, К. Гареев, к. т. н.<sup>3</sup>,  
Д. Тестов<sup>4</sup>, И. Тестов<sup>5</sup>, И. Хмельницкий, к. х. н.<sup>6</sup>

УДК 537.877 | ВАК 2.2.2

Традиционный способ защиты электронных устройств от электромагнитных излучений – применение различных экранов, которые увеличивают габариты и массу изделий, оказывают негативное влияние на близко расположенные объекты, ограничивают возможность радиосвязи с защищаемым объектом. Перспективными подходами к решению задачи электромагнитной защиты являются формирование непосредственно на поверхности защищаемых объектов специальных покрытий, поглощающих энергию электромагнитных волн, а также применение миниатюрных электронных ограничителей мощности. В статье рассмотрены основные методы конформной интеграции систем электромагнитной защиты с электронными устройствами для обеспечения заданного уровня экранирования электромагнитных излучений, достижения эргономичности и маскируемости.

## ВВЕДЕНИЕ

Параметры электромагнитных излучений (плотность потока энергии, частота) могут принимать значения, приводящие к нежелательному воздействию на человека и к нарушениям в работе или деградации электронных устройств. Для предотвращения таких сбоев необходимо применять специальные меры, направленные на ограничение воздействия ЭМИ.

Проектирование и реализация электромагнитной защиты, в первую очередь, должны проводиться с учетом особенностей функционирования каждого объекта, находящегося в области его взаимодействия с ЭМИ, в том числе требований, соответствующих нормативных документов, которые для объектов техники аутентичны стандартам МЭК серии 61000 «Электромагнитная совместимость». Электромагнитная защита должна предотвращать негативное влияние на электронные изделия

преднамеренных энергетических и информационных воздействий ЭМИ [1].

Набор эффективных миниатюрных интегрируемых средств защиты электронных устройств от электромагнитных излучений (ЭМИ) ограничен и связан в основном с применением электромагнитных экранов (ЭМЭ) и поглотителей электромагнитных волн (ПЭВ), имеющих значительные массогабаритные показатели. ЭМЭ и ПЭВ можно классифицировать по различным признакам: принципу работы, применяемым материалам, частотному диапазону и другим параметрам, используемым в зависимости от условий, сформулированных при постановке задачи электромагнитной защиты. Пример возможной классификации ЭМЭ и ПЭВ, характеризующей их структуру, состав и взаимодействие с ЭМИ, представлен на рис. 1 [2].

Следует отметить, что ЭМЭ и ПЭВ существенно ухудшают эргономику и маскировку защищаемого объекта. В связи с развитием аддитивных технологий, применяемых при изготовлении изделий печатной электроники и фотоники, традиционные конструкции экранов становятся неприменимыми. Указанные недостатки отсутствуют в случае формирования эластичной конформной гибридной системы электромагнитной защиты (СЭЗ) непосредственно на поверхности защищаемых объектов. Для обеспечения конкурентных преимуществ электромагнитная защита, сохраняя эффективность выполнения

<sup>1</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», зав. кафедрой МНЭ, профессор, +7 921 902-36-37, cmid\_leti@mail.ru.

<sup>2</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», электроник I категории, +7 921 369-01-92, otestov@mail.ru.

<sup>3</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», доцент, +7 921 759-40-32, kggareev@yandex.ru.

<sup>4</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», аспирант, +7 952 391-60-94, dtestov@bk.com.

<sup>5</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», аспирант, +7 963 315-64-61, igortestov1999@mail.ru.

<sup>6</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ», доцент, +7 921 755-50-37, khmelnitskiy@gmail.com.

своей рабочей функции – отражения и поглощения энергии ЭМИ, должна отвечать требованиям миниатюрности, интегрируемости с электронным устройством (в том числе не ограничивать его работоспособность при необходимости изменения его формы или взаиморасположения отдельных элементов), а также конформности с его поверхностью.

В данной статье представлен обзор существующих и разрабатываемых авторами конструктивно-технологических решений, направленных на формирование современного подхода к созданию гибридных пассивно-активных миниатюрных систем электромагнитной защиты.

### КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАСИВНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЗАЩИТЫ

Композитные материалы используются для формирования электромагнитной защиты, обеспечивающей преимущественное поглощение энергии ЭМИ. По своему составу композитные материалы представляют собой диэлектрическую матрицу с внедренными в нее наполнителями. Количество электромагнитной энергии, поглощаемой композитным материалом, изменяется в зависимости от концентрации, формы и типа наполнителей.

В качестве наполнителей достаточно часто используются магнитные материалы – карбонильное железо и ферриты с высоким значением магнитной проницаемости  $\mu$

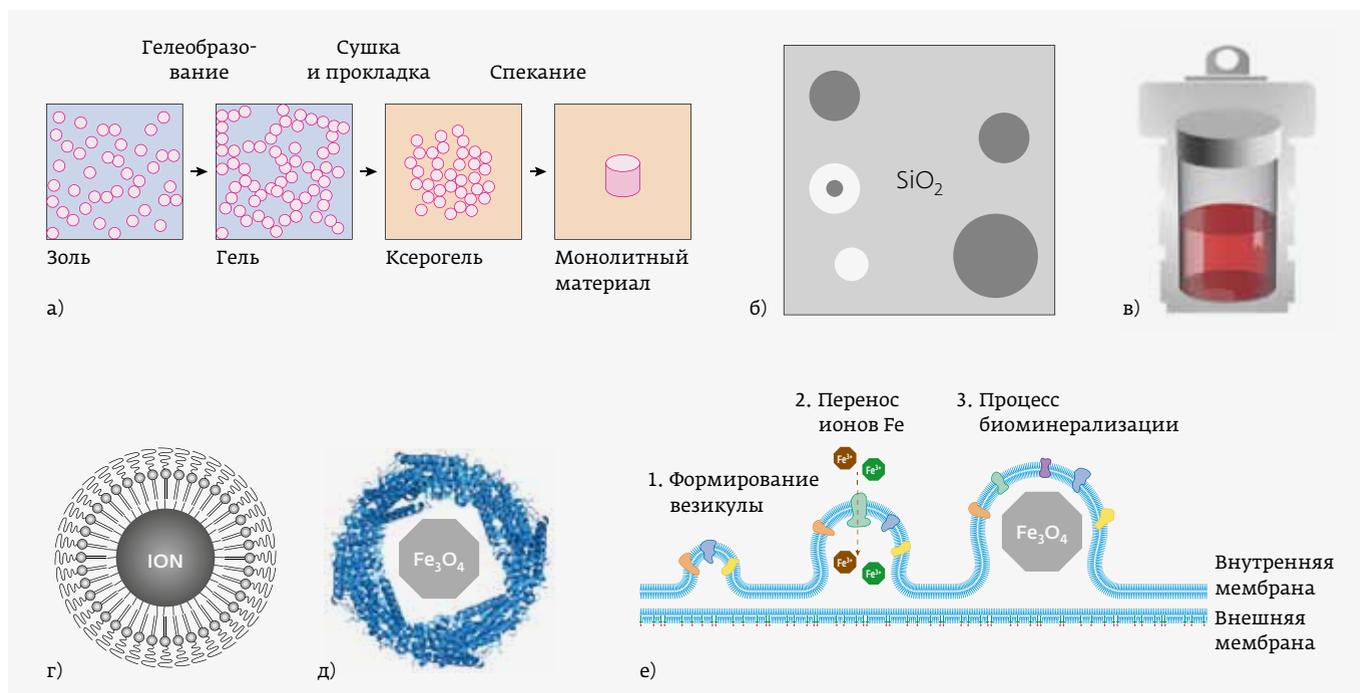
(например, марганец-цинковые ферриты, имеющие значение  $\mu = 6000$  и более), в которых потери связаны с инерционностью процессов перемагничивания и наличием ферро- или ферримагнитного резонанса. Технология производства таких наполнителей отработана и позволяет выпускать широкую номенклатуру различных марок. Теоретические расчеты и результаты экспериментальных исследований показывают, что создать эффективные ПЭВ можно только при высокой концентрации феррита в композите, что приводит к значительному увеличению его плотности [3]. Аналогичные выводы можно сделать и о возможности использования карбонильного железа, на поверхность частиц которого должен быть нанесен дополнительный защитный слой, предотвращающий их окисление.

Современные технологические подходы к синтезу магнитных материалов и их композиций иллюстрирует рис. 2. Прецизионный управляемый синтез возможен с помощью различных технологий, включая золь-гель метод, биомиметический процесс, биоминерализацию магнитных нанокристаллов бактериальными магнетосомами и др.

Одной из принципиальных задач при создании ПЭВ является снижение их массы, что наряду с конформностью достигается использованием в качестве наполнителя частиц углерода различных модификаций. Для создания ПЭВ можно использовать, например, технический углерод, представляющий собой глобулы, состоящие



Рис. 1. Классификация ЭМЭ и ПЭВ по различным признакам [2]



**Рис. 2.** Некоторые современные подходы к получению магнитных материалов и композитов на их основе: а – золь-гель метод; б – синтез с использованием пористой матрицы из кремнезема; в – сольвотермальный метод; г – синтез в микроэмульсии; д – биомиметический синтез; е – биоминерализация в магнитотактической бактерии

из деградированных графитовых структур с размерами частиц, находящихся в пределах 13–120 нм [4]. Взаимодействие углерода с проходящей через него электромагнитной волной характеризуется, в основном, резистивными (омическими) потерями, при этом понижение сопротивления увеличивает коэффициент отражения ЭМИ, что недопустимо для нормального функционирования ПЭВ. В связи с этим наиболее перспективными представляются композитные материалы на основе проводящих полимеров, таких как полианилин, полипиррол, политиофен, полиэтиленгликоль и их производные [5].

Проводящие полимеры могут использоваться не только в качестве наполнителей, но и в качестве связующей матрицы. В этом случае изменять значение удельной электрической проводимости можно путем допирования. Такие материалы (без введения в их составы дополнительных наполнителей) при взаимодействии с ЭМИ характеризуются сочетанием как отражающих, так и поглощающих свойств [6].

### КОНФОРМНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ГИБКОЙ И ПРОФИЛИРОВАННОЙ ОСНОВАХ

Композиции на гибкой и профилированной основах могут использоваться для обеспечения электромагнитной защиты электронных устройств, имеющих достаточно развитую поверхность или изменяющих свою форму в процессе эксплуатации. Такая электромагнитная защита

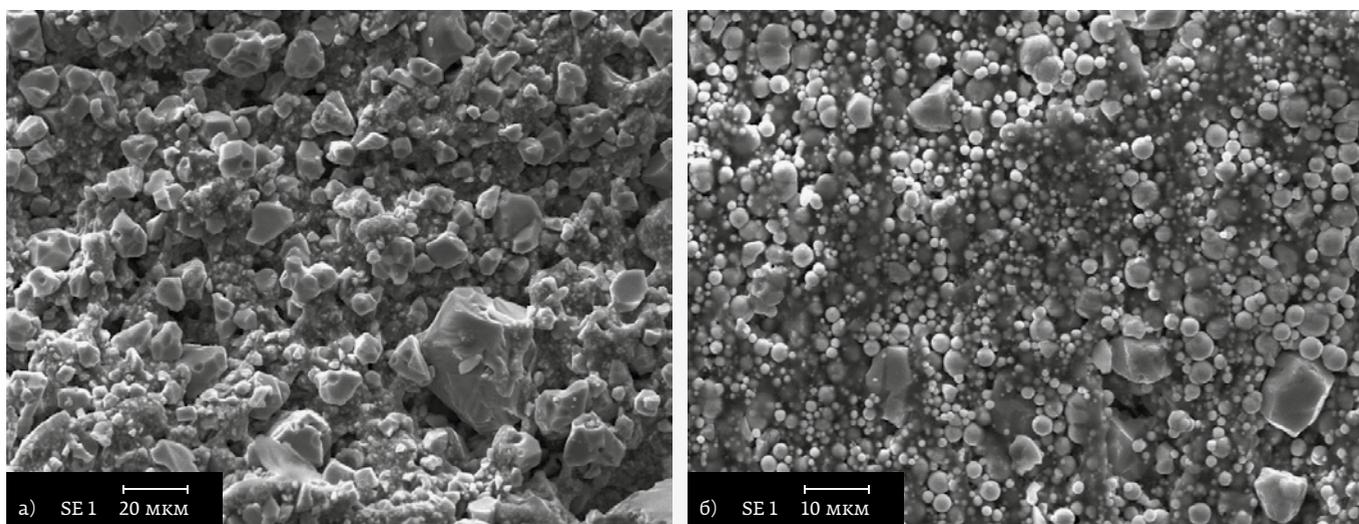
представляет собой конформные экраны на основе текстиля или гибких материалов.

Принцип работы электромагнитной защиты на основе текстиля может быть основан на внедрении в ткань проводящих волокон (в качестве которых могут использоваться волокна на основе углерода или нити, изготовленные из металлов и проводящих полимеров).

Используя тонкую гибкую полимерную пленку, можно создать электромагнитную защиту путем нанесения на ее поверхность тонкой пленки материала, поглощающего энергию ЭМИ (в этом случае можно использовать покрытия на основе аморфного гидрогенизированного углерода с наночастицами никеля а-С:Н(Ni) и кобальта а-С:Н(Co)) или отражающего энергию ЭМИ [1, 2].

### КОНФОРМНЫЕ АДАПТИВНЫЕ ЭЛАСТИЧНЫЕ И ГЕЛЕОБРАЗНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

Использование пластмасс с магнитными и проводящими наполнителями для производства ПЭВ обусловлено возможностью применения стандартного промышленного оборудования. Такие технологии переработки пластмасс, как экструзия, каландрование, литье, обеспечивают низкие затраты при получении образцов, что открывает широкие возможности. Получаемые материалы состоят из диэлектрической связующей матрицы, выполненной из каучука, полиэтилена, полистирола, пластифицированного поливинилхлорида (ПВХ),



**Рис. 3.** Результаты исследований методом электронной микроскопии поверхности полимерных образцов с различными наполнителями: а - ферритом типа 2500НМС (толщина 1,6 мм); б - карбонильным железом типа Р10 и ферритом типа 2500НМС (массовые доли соответственно 74,7% и 13,6%, толщина 1,3 мм)

полиамида, полиолефина, эпоксидной фенольной, полиэфирной смолы или другого аналогичного материала, в котором равномерно распределены частицы или волокна магнитных и / или проводящих материалов (например, металлов, сплавов, ферритов, углеродных материалов различного типа).

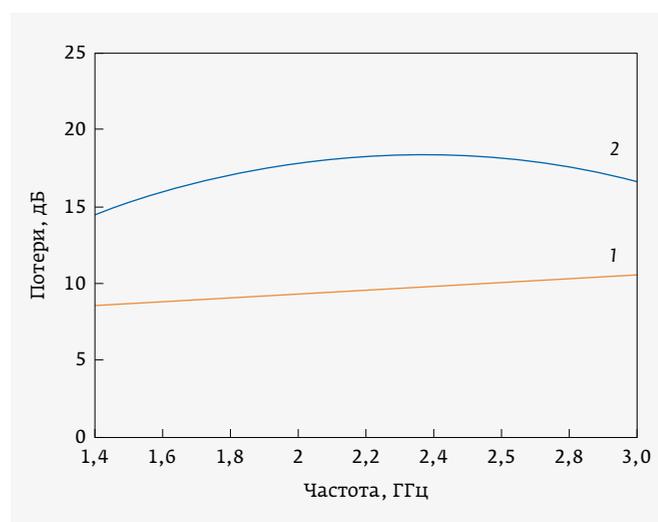
В рамках исследований, проведенных СПбГЭТУ «ЛЭТИ» методом каландрования (при температуре вальцов 60 °С) были получены образцы эластичных композитов. Равномерность распределения вкраплений феррита по объему достигалась путем многократного прокатывания получаемого материала. Полимерная матрица изготавливалась из полиизопренового каучука и ПВХ с добавками хлорированного полиэтилена. Полиизопреновый каучук по сравнению с ПВХ позволил получить более эластичные материалы при меньшей стойкости к повышенной температуре. В качестве наполнителей использовались марганец-цинковые ферриты (500НМС, 2500НМС), карбонильное железо (Р20, Р100 по ГОСТ 13610-79), аморфные сплавы с высоким содержанием кобальта (АМАГ72, АМАГ200). На рис. 3 представлены структурно-морфологические характеристики полученных образцов.

На основании полученных данных были сделаны выводы о размерах частиц наполнителя (<50 мкм), равномерности их распределения по объему образца, отсутствию или наличию агломератов частиц.

Исследования полученных образцов показали возможность их использования для создания ПЭВ, эффективность применения которых существенно повышается при формировании многослойных структур. На рис. 4 показаны частотные зависимости потерь энергии ЭМИ, полученные для образца на основе ПВХ и частиц АМАГ72

(массовая доля 78%) толщиной 2 мм и четырехслойного материала средней толщиной 2,2 мм, состоящего из четырех склеенных слоев (каждый толщиной 0,5 мм) полиизопренового каучука с распределенными частицами АМАГ72 и технического углерода.

Высокие значения потерь энергии ЭМИ показывают перспективность применения ПЭВ, изготовленных в виде одного или нескольких листов толщиной от 0,5 до 5 мм

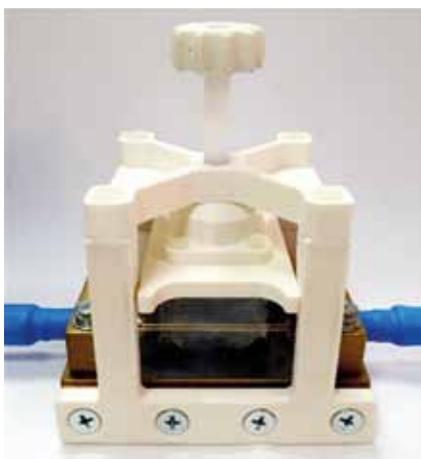


**Рис. 4.** Частотные зависимости потерь ЭМИ в диапазоне от 0,8 до 3,0 ГГц для образцов: 1 - на основе ПВХ и частиц АМАГ72 (массовая доля 78%) толщиной 2 мм; 2 - на основе четырех склеенных слоев (каждый толщиной 0,5 мм) полиизопренового каучука с распределенными частицами АМАГ72 и технического углерода



**Рис. 5.** Образец ПЭВ на основе геля: а – внешний вид; б – структура

(и более), сохраняющих свою форму или имеющих возможность ее изменения в некоторых пределах. ПЭВ такого типа устанавливаются на защищаемый объект или окружающую его стенку корпуса. Кроме этого, такие ПЭВ могут заливаться в формы с предварительно установленными в них объектами, которые после затвердевания материала будут полностью окружены радиозащитным материалом [2].



**Рис. 6.** Измерительное оборудование: а – стенд на основе рупорных антенн; б – ячейка на основе копланарной линии передачи

Другой вариант, в рамках которого оперативно и конформно можно защитить объект от воздействия ЭМИ, основан на заполнении окружающего его объема материалом на основе жидкости или геля. Такое техническое решение перспективно для объектов сложной конфигурации или изменяющих свою форму.

Защитные свойства жидких и гелеобразных материалов изучались путем исследования образцов на водной основе. Вода является сильнополярным диэлектриком, значения ее удельного электрического сопротивления варьируется в интервале от  $10^3$  до  $10^5$  Ом·м. Прохождение ЭМИ через воду сопровождается потерями при протекании электрического тока, поляризационными и релаксационными потерями [7], которые возрастают при увеличении частоты [8].

Образцы на основе геля изготавливались путем механического смешивания полиметилсилоксана полигидрата (ПП) и наполнителей (рис. 5), которые при прохождении через них ЭМИ, обеспечивают различные типы потерь энергии; технический углерод (по ГОСТ 7885-86), в основном, за счет резистивных потерь, феррит ЗСЧ – магнитных, карбонильное железо и АМАГ172, как за счет резистивных, так и за счет магнитных потерь. Характеристики некоторых типов наполнителей приведены в табл. 1.

ПП, как и любой другой гидрогель, теряет свои свойства по мере испарения воды. Экспериментально было установлено, что предельная массовая доля воды не должна быть менее ~82% от ее исходного значения. С целью увеличения времени жизни образцов, изготовленных на основе гелей и жидкостей, осуществлялась их герметизация в полимерную оболочку.

Функциональные свойства образцов, частотные зависимости коэффициента передачи  $S_{21}$ , исследовались в двух диапазонах: от 2 до 5 ГГц и от 0,05 до 2,00 ГГц и, что связано с использованием различных методов измерений, соответственно, при помощи рупорных антенн и на основе копланарной линии передачи (рис. 6).

Исследования частотных зависимостей  $S_{21}$  проводились при варьировании типа наполнителей и концентрации наполнителей (массовая доля), изменении толщины материала, содержащего частицы феррита типа ЗСЧ, (массовая доля – 33%), времени, прошедшего с момента изготовления образца, различных типов технического углерода. Характерные

результаты исследования приведены на рис. 7.

Проведенные исследования показали, что внедрение в гель наполнителей с высокими магнитными или проводящими свойствами таких типов, как АМАГ172, Т900, Р-10, позволяет существенно изменить значения  $S_{21}$ . Для лучших образцов (на основе АМАГ172) значения  $S_{21}$  в частотном диапазоне от 2 до 5 ГГц уменьшается от -13,5 дБ до -26,0 дБ.

Влияние ЭМИ на жидкие среды исследовалось на примере магнитной жидкости на водной основе, содержащей частицы  $Fe_3O_4-SiO_2$  сферической формы размерами менее 100 нм, созданной по разработанной авторами технологии (патент РФ № 2639709) [9]. Исследования показали, что при толщине слоя магнитной жидкости, равной 6 мм, коэффициент поглощения электромагнитного излучения частотой свыше 7 ГГц составляет не менее 90%, что может быть востребовано при защите технических систем от воздействия ЭМИ, а также в области медицины при проведении локальной гипертермии [6].

На основании результатов проведенных исследований был получен патент на изобретение РФ № 2688894 [10].

### КОНФОРМНЫЕ МИКРО- И НАНОСЛОЕВЫЕ МУЛЬТИКОМПОЗИЦИИ НА ТВЕРДЫХ И ГИБКИХ СУБСТРАТАХ

подавляющее большинство задач защиты от распространяющегося по эфиру ЭМИ решается путем использования ЭМЭ на основе материалов высокой проводимости; чем выше удельная электрическая проводимость материала, тем меньшей толщины слой требуется для затухания энергии проходящего через него ЭМИ. К ним относятся металлы и сплавы, характеризующиеся значением удельного объемного электрического сопротивления  $\rho_v < 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  [11].

Практически всегда к перечню основных конкурентных преимуществ любой технической продукции относится превосходство по массогабаритным параметрам. С точки зрения применения металлических ЭМЭ снижение массогабаритных показателей связано с необходимостью решения двух основных задач:

- определения минимальной толщины слоя металлизации, при котором выполняются заданные требования, предъявляемые к значению уровня электромагнитного экранирования SE, определяемого значением  $S_{21}$ ;

Таблица 1. Характеристики наполнителей

Наименование	Тип	Средний размер частиц, мкм	Уд. сопротивление материала, Ом·см	Магнитная проницаемость
Технический углерод	П234	0,02	5-5 000	1
	П324	0,03	5-5 000	1
	П514	0,05	5-5 000	1
	Т900	0,09	5-5 000	1
Никелевый феррит-шпинель	ЗСЧ	<300,00	$\sim 10^6$	$10^2-10^3$
Аморфный сплав	АМАГ172	10-100	$\sim 10^{-6}$	70 000
Карбонильное железо	Р10	3,50	$\sim 10^{-7}$	13-15

- обеспечения конформности с поверхностью экранируемого объекта.

Следует отметить, что для ЭМЭ значение толщины  $l$  может быть меньше значения глубины проникновения  $\delta$  в том случае, если уменьшение энергии ЭМИ достаточно для обеспечения работоспособности защищаемой системы. Таким образом, становится актуальной задача исследования частотных зависимостей  $S_{21}$ . Из традиционных металлических материалов наиболее технологичны и дешевы медь, алюминий, цинк и никель. На их поверхности образуется оксидная пленка, удовлетворяющая условию

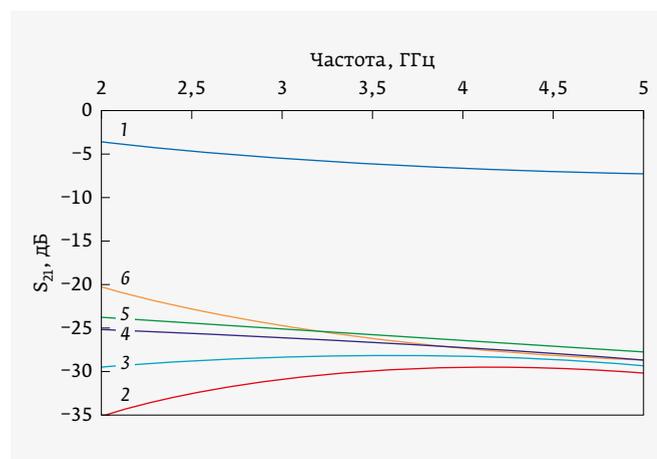


Рис. 7. Частотные зависимости  $S_{21}$  в диапазоне частот от 2 до 5 ГГц, полученные при изменении времени эксплуатации образцов ПЭВ на основе гелей: 1 – ячейка без образца; 2 – 60% Р-10 после изготовления; 3 – 60% Р-10 через 1 сутки; 4 – через 3 суток; 5 – через 7 суток; 6 – через 260 суток

сплошности Пиллинга и Бедворса [12], обеспечивающая защиту металла от коррозии. Однако для никеля толщина и скорость роста оксидной пленки имеют наименьшие значения. Кроме этого, работа любой электронной системы сопровождается тепловыделением, поэтому коэффициенты теплового расширения  $\alpha$  металла и его оксидной пленки должны, по возможности, иметь наименьшие различия. Для никеля и его оксида в нормальных климатических условиях  $\alpha$  имеет значения соответственно 12,6 и  $12,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , что обеспечивает лучший результат по сравнению с другими рассматриваемыми металлами [13]. Следует также отметить, что никель относится к магнитным материалам, следовательно, проходящее через его пленку ЭМИ будет терять свою энергию, в том числе, за счет магнитных потерь, поэтому для проведения исследований был выбран никель.

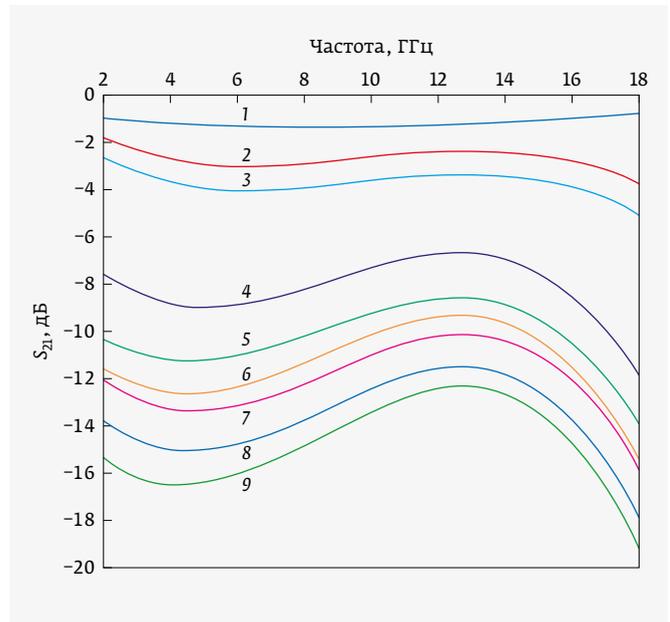
Тонкие пленки формировались методом магнетронного распыления никеля марки НПОЭ<sub>ВИ</sub> [14] на подложках из стекла и кремния. Для каждого из полученных образцов определялись толщины, удельное электрическое сопротивление и частотные зависимости  $S_{21}$  в диапазоне от 2 до 18 ГГц (при помощи портативного закрытого стенда на основе измерительных рупоров) (рис. 8).

Изучение свойств тонких пленок никеля толщиной до 250 нм показывает возможность их использования для создания ЭМЭ, обеспечивающих в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц значения  $S_{21}$  от -13 до -18 дБ, что в подавляющем большинстве случаев достаточно для решения задач электромагнитного экранирования и электромагнитной совместимости.

Следует учитывать две особенности применения ЭМЭ на основе тонких пленок материалов высокой проводимости:

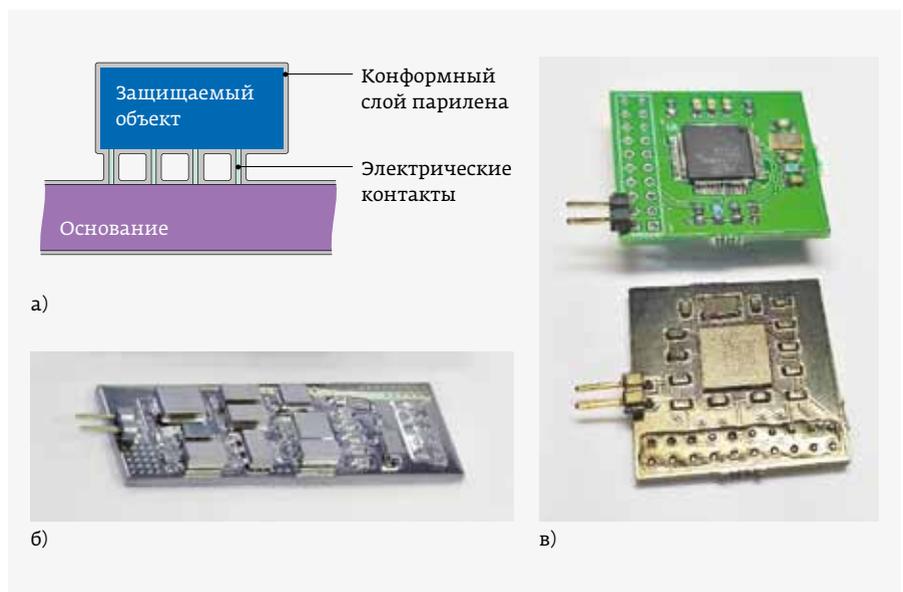
- реальные электронные системы могут иметь токопроводящие поверхности, которые должны быть обработаны изолирующим покрытием, которое будет служить подложкой для нанесения металлической пленки;
- процесс окисления металла имеет долговременную тенденцию, поэтому, с целью обеспечения надежности работы ЭМЭ после проведения металлизации на поверхность пленки, необходимо наносить защитное покрытие.

В связи с этим состав ЭМЭ должен включать в себя минимум три слоя: изолирующий, экранирующий



**Рис. 8.** Частотные зависимости коэффициента передачи для различных толщин пленки Ni: 1 – 4 нм; 2 – 10 нм; 3 – 16 нм; 4 – 35 нм; 5 – 70 нм; 6 – 110 нм; 7 – 135 нм; 8 – 180 нм; 9 – 250 нм

и защитный. Требования, предъявляемые к изолирующему слою: конформность, малая толщина, сплошность, высокие диэлектрические свойства и др., практически идентичны требованиям, предъявляемым к защитному



**Рис. 9.** Конформный электромагнитный экран: а – схема формирования диэлектрического слоя на основе парилена; б – электромагнитная защита на основе парилена и никеля; в – плата модуля радиоканала до и после формирования конформного мультислойного защитного экрана

слою, поэтому целесообразно для их нанесения использовать один и тот же материал. В качестве такого материала использовался парилен, синтезированный по технологии вакуумно-пиролитического осаждения (рис. 9) [15].

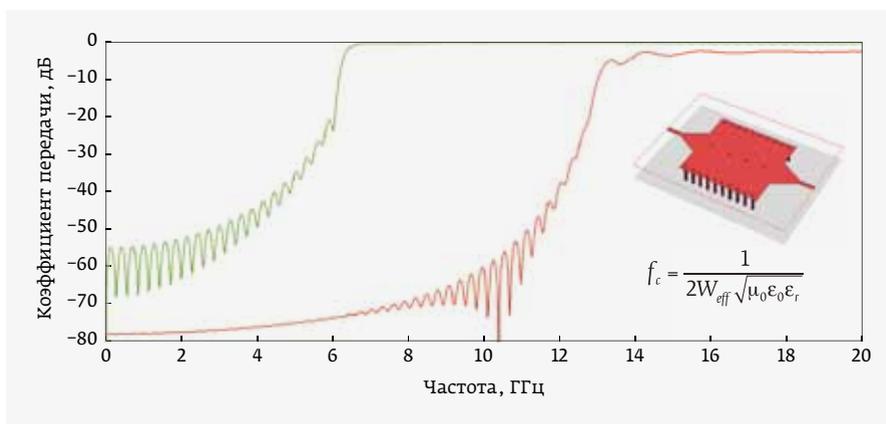
### МИНИАТЮРНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ МОЩНОСТИ

В результате внешних электромагнитных воздействий в зависимости от поглощенной элементами ИС мощности могут наблюдаться следующие нарушения работоспособности:

- помехи и обратимые отказы с восстановлением нормальных характеристик и параметров после прекращения электромагнитного воздействия;
- деградационные изменения параметров и характеристик с медленным ухудшением технических характеристик микросхем в процессе эксплуатации и возможным выходом рабочих параметров за пределы установленных допусков;
- быстрые «катастрофические» отказы с необратимым нарушением работоспособности.

Согласно ГОСТ Р 52863-2007 электромагнитное воздействие на ЭКБ может осуществляться:

- по сетям электропитания;
- по проводам линий связи (информационный канал);
- по металлоконструкциям на порты заземления и корпуса;
- посредством электромагнитного быстроизменяющегося поля на элементы портов ввода/вывода сигналов, питания, антенно-фидерные устройства.



**Рис. 10.** Частотная зависимость коэффициента передачи ограничителя мощности на основе интегрированного в подложку волновода

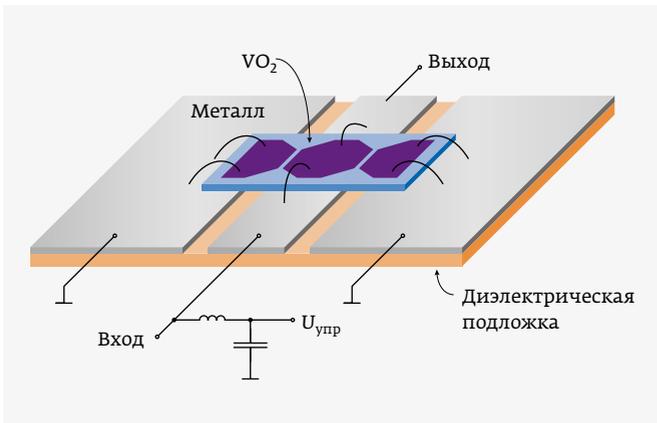
Примеры типовых значений при испытаниях ЭКБ на устойчивость к сильным электромагнитным воздействиям приведены в табл. 2.

Электронные ограничители мощности контролируют нагрузку и в случае ее роста выше установленного значения осуществляют обесточивание потребителя. Срабатывание ограничителя мощности осуществляется с выдержкой времени от нескольких секунд до нескольких минут.

Особый интерес с практической точки зрения представляют частотно-избирательные ограничители мощности. Достаточно простой ограничитель мощности с определенной частотой отсечки можно реализовать на основе интегрированного в подложку волновода. Металлические индуктивные штыри, расположенные в центре широкой стенки волновода, увеличивают критическую частоту в два раза, и частотная область сигнала оказывается в запредельной области с большим коэффициентом затухания (рис. 10).

**Таблица 2.** Классификация типовых электромагнитных воздействий

Вид воздействия	Основные характеристики имитаторов сильных электромагнитных воздействий
Однократные наносекундные импульсы электромагнитного поля	Электромагнитный импульс длительностью 100 нс и напряженностью электрического поля от 1 до 10 кВ/м; одиночные импульсы с частотой следования менее 1 Гц
Периодические наносекундные импульсы электромагнитного поля с низкой частотой повторения	Электромагнитный импульс длительностью от 0,1 до 1,0 нс; напряженность электрического поля от 0,1 до 30 кВ/м; частота следования импульсов 1кГц
Периодические наносекундные импульсы электромагнитного поля с высокой частотой повторения	Электромагнитный импульс длительностью от 0,1 до 1,0 нс; напряженность электрического поля от 0,1 до 30 кВ/м; частота следования импульсов 1000 кГц



**Рис. 11.** Копланарная линия с пленкой диоксида ванадия

Частотно-избирательные ограничители мощности могут основываться на использовании материалов с фазовым переходом, распределенных автоэмиссионных структур и МЭМС.

### Ограничители мощности на материале с фазовым переходом

Одним из способов реализации ограничителей мощности является использование в волноводном тракте либо в планарной линии передачи материалов с управляемым фазовым переходом, например, диоксида ванадия ( $VO_2$ ). Диоксид ванадия – материал, который может при воздействии внешних условий изменять свое состояние и переходить из состояния диэлектрика с высоким значением сопротивления в состояние проводника с высоким значением проводимости (рис. 11). Переход осуществляется путем изменения температуры  $VO_2$  вследствие либо прямого нагрева, либо за счет протекания электрического тока через пленку материала или иным способом. Удельное сопротивление  $VO_2$  при фазовом переходе может изменяться на четыре порядка и более.

Ярко выраженная зависимость проводимости диоксида ванадия от его температуры может быть использована при разработке ограничителей мощности на основе комбинации копланарного волновода и пленки диоксида ванадия.

### Ограничители мощности на основе элементов вакуумной электроники

Ограничители на основе эффекта автоэлектронной эмиссии отличаются отсутствием инерционности, минимальными вносимыми потерями и могут выдерживать высокий уровень мощности. Эффект основан на рассеянии мощности путем полевой эмиссии электронов (автоэлектронной эмиссии) с использованием распределенного излучателя с холодным катодом и может быть реализован в планарной конструкции, образованной холодным катодом, распределенным вдоль отрезка линии передачи (рис. 12).

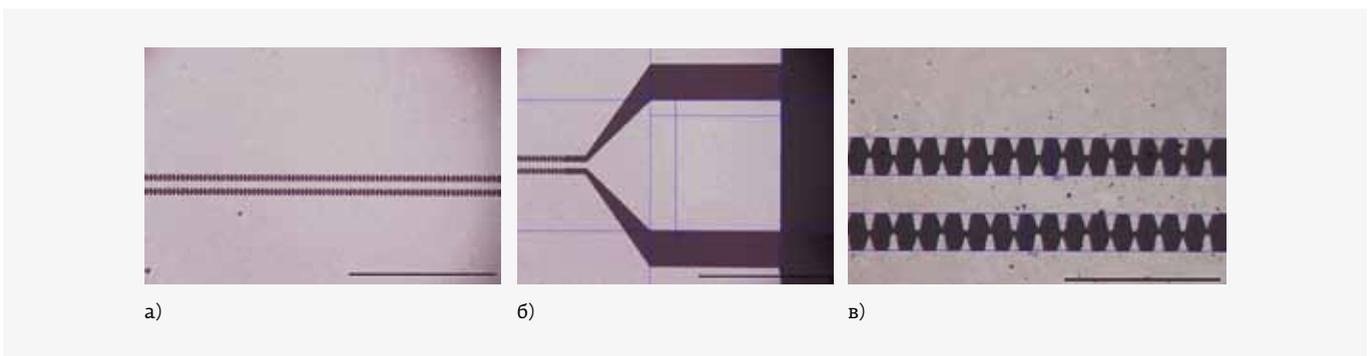
### Ограничители мощности на МЭМС-структурах

МЭМС-переключатели – это устройства, которые используют механическое перемещение для обеспечения замыкания или разрыва в цепи высокочастотной длинной линии. Сила, необходимая для механического перемещения, может быть обеспечена электростатическими, магнитостатическими, пьезоэлектрическими эффектами или тепловым воздействием (рис. 13). На сегодняшний день только переключатели электростатического типа работают в широком частотном диапазоне (0,1–10,0 ГГц) с высокой надежностью (от 100 млн до 10 млрд циклов переключения).

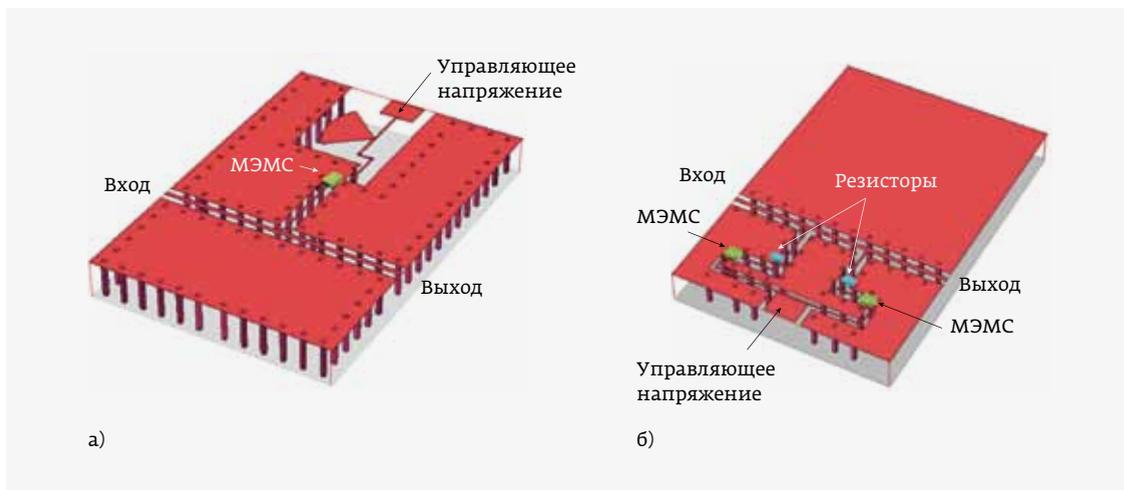
В табл. 3 представлены примеры современных миниатюрных ограничителей мощности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При миниатюризации электронных устройств требуется, чтобы защитные электромагнитные экраны обеспечивали не только заданный уровень эффективности



**Рис. 12.** Участки линии передачи, иллюстрирующие структуру ограничителя мощности на основе элементов вакуумной электроники с различной длиной масштабной линейки: а, б – 1000 мкм; в – 200 мкм



**Рис. 13.** Ограничители мощности на основе МЭМС-структур: а – МЭМС-выключатели на одном элементе; б – МЭМС-выключатели на двух элементах

экранирования, но и конформность с защищаемым объектом. Принцип работы ЭМЭ основан на использовании электрической проводимости, в связи с чем в локальных областях пространства могут образовываться пучности

электрического или магнитного полей, что оказывает негативное влияние на близко расположенные объекты. Применение традиционных ЭМЭ также ограничивает возможность связи по радиоканалу с защищаемым объектом.

**Таблица 3.** Современные типы ограничителей мощности

Тип ограничителя мощности	Примеры	Основные характеристики и особенности
Волновод с металлическими топологическими элементами, интегрируемыми в подложку		Диапазон рабочих частот: 5-10 ГГц; простота интеграции с защищаемым элементом
Микромеханические ключи		Диапазон рабочих частот: 5-10 ГГц; вносимое затухание: 20 дБ (на два элемента); малые вносимые потери
Автоэмиссионные структуры	 2D-структуры    3D-структуры	Возможность защиты от воздействий с характеристиками: $U > 1$ кВ; $f > 100$ ГГц; низкая инерционность срабатывания
Стимулированный полев фазовый переход		Диапазон рабочих частот: 1-40 ГГц; вносимое затухание: 40 дБ (на модуль); малые вносимые потери; простота интеграции с защищаемым элементом

Недостатки традиционных ЭМЭ можно преодолеть путем реализации интегрируемой эластичной конформной гибридной системы электромагнитной защиты, которая обеспечивает заданный уровень защиты от воздействия ЭМИ (в том числе в условиях повышенных температуры и влажности) и снижение коэффициента отражения ЭМИ (исключает создание пучностей электрического и магнитного полей) в рамках решения задач электромагнитной совместимости. Кроме того, такой подход обеспечивает эргономичность, биосовместимость, маскируемость, а также минимизирует массогабаритные показатели электронных устройств.

Работа поддержана грантом РФФ, проект № 21-19-00719.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гареев К. Г., Гасников А. О., Ершов М. И., Кондрашов К. К., Лучинин В. В., Петров А. А., Тестов О. А.** Обеспечение электромагнитной безопасности объектов биотехносферы // Биотехносфера. 2017. № 6 (54). С. 28–53.
2. **Тестов О. А., Гареев К. Г., Лучинин В. В., Комлев А. Е., Тестов Д. О., Тестов И. О., Хмельницкий И. К.** Конформная интегрируемая микро- и наноконпозиционная пассивная электромагнитная защита объектов биотехносферы // Нано- и микросистемная техника. 2022. Т. 24. № 3. С. 143–153.
3. **Беляев А. А., Беспалова Е. Е., Лепешкин В. В.** Радиопоглощающие материалы на основе отделочных строительных материалов для защиты от СВЧ излучения базовых станций сотовой связи // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2015. № 6. С. 80–88.
4. ГОСТ 7885. Углерод технический для производства резины.
5. **Inzelt G.** Conducting Polymers – A New Era in Electrochemistry. Berlin: Springer, 2010. 282 p.
6. **Гареев К. Г., Лучинин В. В., Севостьянов Е. Н., Тестов И. О., Тестов О. А.** Частотная зависимость коэффициента поглощения электромагнитного излучения в магнитной жидкости // Журнал технической физики. 2019. Т. 89, вып. 6. С. 893–896.
7. **Семихина Л. П.** Диэлектрические и магнитные свойства воды в водных растворах и биообъектах в слабых электромагнитных полях. Тюмень: ТюмГУ, 2005. 173 с.
8. **Диденко А. Н., Дмитриев М. С., Лалаян М. В.** Аномальное поглощение электромагнитных волн десятисантиметрового диапазона в воде // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 7. С. 734–741.
9. **Гареев К. Г., Рейнюк А. В., Тестов Д. О., Лучинин В. В., Мошников В. А.** Способ получения магнитной жидкости. Патент РФ № 2639709 от 29.03.2017.
10. **Гареев К. Г., Лучинин В. В., Тестов И. О., Тестов О. А., Хмельницкий И. К.** Электромагнитный экран. Патент РФ № 2688894 от 20.06.2018.
11. **Корицкий Ю. В., Пасынков В. В., Тареев Б. М.** Справочник по электротехническим материалам. Т. 3. Л.: Энергоатомиздат Ленинградское отд-ние. 1988. 728 с.
12. **Дизенко Е. И., Новоселов В. Ф., Тугунов П. И., Юфин В. А.** Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. М.: Недра, 1978. 199 с.
13. **Жук Н. П.** Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия. 1976. 472 с.
14. ГОСТ19241-2016. Никель и низколегированные никелевые сплавы, обрабатываемые давлением. Марки.
15. **Ширшова В. А.** Поли-пара-ксилилены. История разработки, современное состояние и перспективы развития технологии // Лакокрасочные материалы и их применение. 2008. № 1–2. С. 44–47.

ЭЛЕКТРОНИКА
НАНОИНДУСТРИЯ
ФОТОНИКА
ПЕРВАЯ МИЛЯ
Аналитика
СТАНКОИНСТРУМЕНТ

ИНФОПРОСТРАНСТВО  
ФЕССИОНАЛОВ

Мы на YouTube

Подписывайтесь



11–14 апреля 2023

# СВЯЗЬ

35-я юбилейная международная  
выставка «Информационные  
и коммуникационные технологии»

Экспозиция «Навитех» —  
«Навигационные системы, технологии и услуги»

[www.sviaz-expo.ru](http://www.sviaz-expo.ru)



Россия, Москва,  
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



12+  
Реклама

Организатор



При поддержке



Под патронатом



В рамках

