

**ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,
АО «ТЕСТПРИБОР», БГУИР**

**«ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ЗАЩИТЕ РЭА
ОТ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ»**

¹Василенков Н.А., ²Гиро А.М., ³Грабчиков С.С., ⁴Зубарь Т.И., ⁵Труханов А.В.

¹техн. директор; ²вед.н.с., к.-ф.-м.н. ³гл.н.с., д. ф.-м. н.; ⁴ст.н.с., к.ф.-м.н.; ⁵вед.н.с., к.ф.-м.н.

¹АО «ТЕСТПРИБОР», г. Москва, ²БГУИР, г. Минск, ^{3;4;5}ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», г. Минск

2021 год

АКТУАЛЬНОСТЬ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Воздействие мощных электромагнитных импульсов (ЭМИ) природного и искусственного происхождения представляет серьезную угрозу для нормального функционирования радиоэлектронной, информационной и др. аппаратуры.

ЭМИ занимают широкий спектральный диапазон и имеют высокую проникающую способность. Согласно классификации существуют ЭМИ милли-; микро- и наносекундной длительности.

[Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. Из-во:«Группа ИТД» М. 2007. 478с.]

Обеспечить эффективную электромагнитную защиту от излучений с различными частотными и спектральными характеристиками с помощью одного материала практически невозможно.

Цель работы:

- исследовать перспективные материалы и методы, обеспечивающие требования электромагнитной стойкости и безопасности беспилотных транспортных средств (БПТС) в условиях воздействия мощных ЭМИ с напряженностью электрической составляющей $0,1 \div 50$ кВ/м, напряженностью магнитной составляющей $1 \div 10$ кА/м в диапазоне частот 10 кГц \div 10 МГц.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЭМП, ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ, УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

Параметры	миллисекундный диапазон; 50Гц	микросекундный диапазон; (25÷420)кГц	Нано (1÷5)×10 ⁷ Гц и субнаносекундный (8,3÷50)×10 ⁷ Гц диапазоны
Поражающие факторы	КЗ ВЛЭП; контактная сеть ЖД	молния	ЯВ
Напряженность электрической составляющей; кВ/м	10-300 (ВЛЭП)	100-500	5-270
Напряженность магнитной составляющей; А/м	2000-3000 (ВЛЭП) 700 (ЖД)	100-300	50-790
Несущая полоса частот спектра импульса (90% энергии ЭМИ); Гц		(2,5-42)×10 ⁴	
Длительность фронта импульса напряженности магнитного поля по уровням 0,1-0,9; мкс		0,2-3,0	0,5-8нс
Длительность импульса напряженности магнитного поля на уровне 0,5	1-5с (ВЛЭП) 0,1-0,2с (ЖД)	50-100мкс	3-25нс

В РФ испытания на устойчивость к импульсному ЭМВ проводят согласно

ГОСТ Р 52863-2007 при следующих условиях:

- амплитуда ЭМИ от 100 В/м до 50 кВ/м; длительность ЭМИ от 0,2 до 1 нс;
- длительность фронта ЭМИ от 0,1 до 0,5 нс; частота следования от 1 кГц до 1 МГц.

Это импульс наносекундной длительности. Для расширения частотного диапазона нами испытания проведены в микросекундном ($\approx 10 \div 50$ кГц) и наносекундном ($\approx 0,1 \div 1$ МГц) диапазонах частот.

ПРЕДЫДУЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

«НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», АО «Тестприбор» и АО «Московский институт теплотехники» выполнили цикл работ по исследованию многослойных пленочных экранов (МПЭ), как средств защиты от мощных электромагнитных импульсов милли-, микро- и наносекундной длительности позволяющий формировать экраны на деталях сложной геометрической формы, что практически неосуществимо на основе коммерческих листовых и фольговых материалов. Показано, что МПЭ являются эффективными средствами защиты от ЭМИ с напряженностью магнитной составляющей до 12 кА/м.

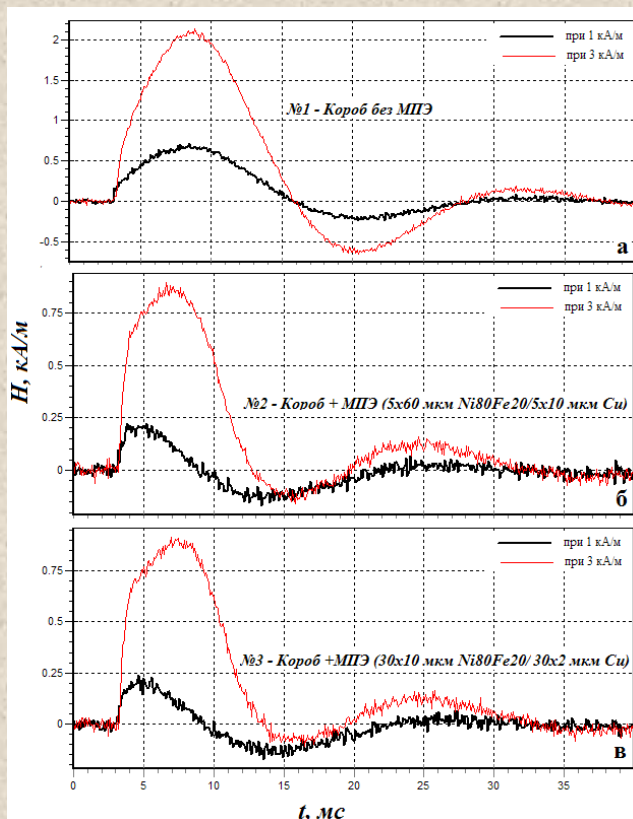
Поскольку магнитная составляющая ЭМИ обладает гораздо более высокой проникающей способностью, чем электрическая, и защита от нее представляет очень сложную задачу, оценка эффективности экранирования в основном проводилась по магнитной составляющей

1. Многослойные пленочные экраны как средства защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия импульсных электромагнитных полей / С.А. Акимов, Н.А. Василенков, С.С. Грабчиков и др. – Технология ЭМС . 2017, №1 (60), с. 21-30.
 2. Расчетно-экспериментальные аспекты оптимизации многослойных пленочных структур для эффективного экранирования электромагнитных импульсов / С.А. Акимов, С.С. Грабчиков, С.Ф. Симаков и др. - Технология ЭМС . 2019, №1 (68), с. 30-40.
 3. Патент на изобретение РБ №22561 от 03.04.2019г. С.С. Грабчиков, А.В. Труханов, С.А. Акимов, С.Ф. Симаков / Многослойный экран для защиты от электромагнитного импульса.
 4. Перспективные методы защиты транспортных беспилотных систем от воздействия преднамеренных импульсных электромагнитных излучений / Акимов С.А., Василенков Н.А., Гиро А.М., Грабчиков С.С., Максимов А.Ю., Труханов А. В.
- IX Всероссийская научно-техническая конференция «Электромагнитная совместимость», 21-22 мая 2020, г. Москва, с. 15-23.

ЗАЩИТА БОРТОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ (БКС) РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ЭМП ИМПУЛЬСНОГО ТИПА. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

(ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, АО «Корпорация «МИТ» г. Москва)

Проблема: недостаточная электромагнитная защита типовых коробов БКС от воздействия мощных импульсных ЭМП природного и искусственного происхождения.
Материал БКС - Al или его сплавы толщиной (d) 2 мм.



Временная зависимость внешнего магнитного поля для ЭИ миллисекундного диапазона с уровнями напряженностями 1,0 кА/м и 3,1 кА/м для образцов:
№1 – БКС без экрана 2 мм Al (а);
№2 – БКС + $5 \times 60 \mu\text{м} Fe_{20}Ni_{80} / 5 \times 10 \mu\text{м} Cu$ (б);
№3 – БКС + $30 \times 10 \mu\text{м} Fe_{20}Ni_{80} / 30 \times 2 \mu\text{м} Cu$ (в).

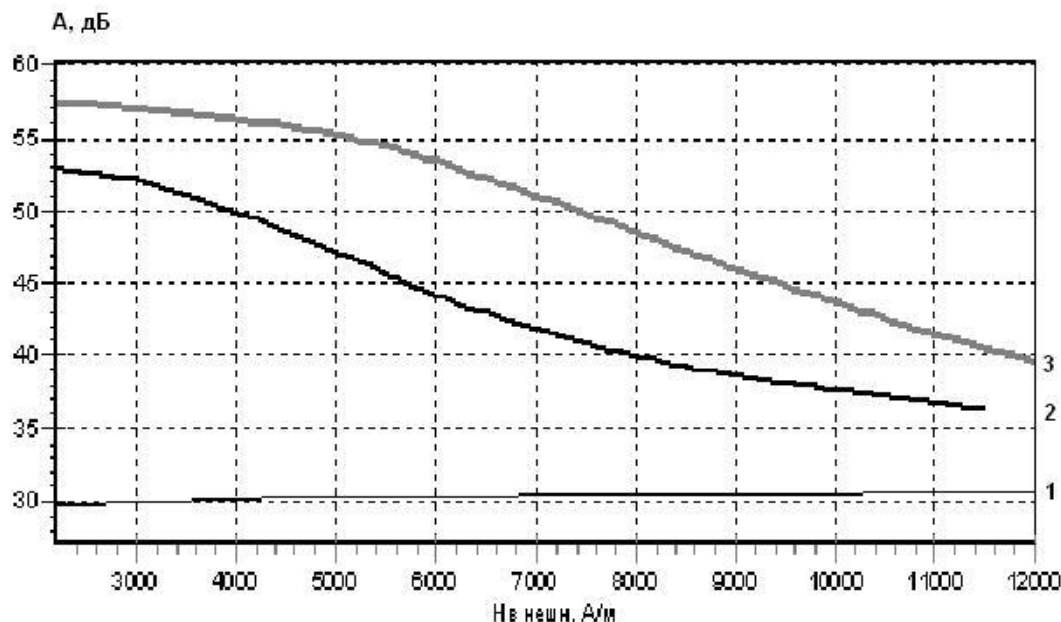
Основные результаты:

Эффективность экранирования ЭМИ миллисекундного диапазона напряженностью 1,0÷3,1 кА/м составляет:

- для конструкций из Al с $d=2$ мм (№1) $\approx 3,3$ дБ (1,47 раз),
- для МПЭ с $d = 0,36$ мм (№№ 2;3) – 13÷11 дБ (4,5÷3,5 раз).

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВАНИЯ МПЭ Эксперимент.

(ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, АО «Корпорация «МИТ» г. Москва)



Зависимости эффективности экранирования МПЭ от напряженности импульсного ЭМП микросекундного диапазона (длительность импульса $50 \div 80 \mu\text{с}$ на уровне 0,5):

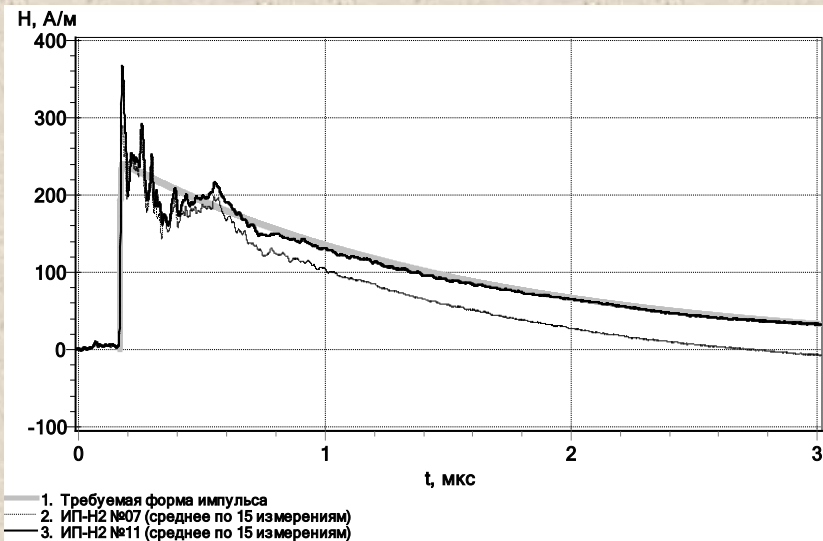
- 1 – БКС без МПЭ, толщина $Al = 2 \text{ мм}$;
- 2 – БКС + МПЭ ($30 \times 10 \mu\text{м}$ $Ni_{80}Fe_{20}$ + $30 \times 2 \mu\text{м}$ Cu);
- 3 – БКС + МПЭ ($15 \times 10 \mu\text{м}$ $Ni_{80}Fe_{20}$ + $15 \times 10 \mu\text{м}$ $Ni_{50}Fe_{50}$ + $30 \times 2 \mu\text{м}$ Cu)

Основные результаты:

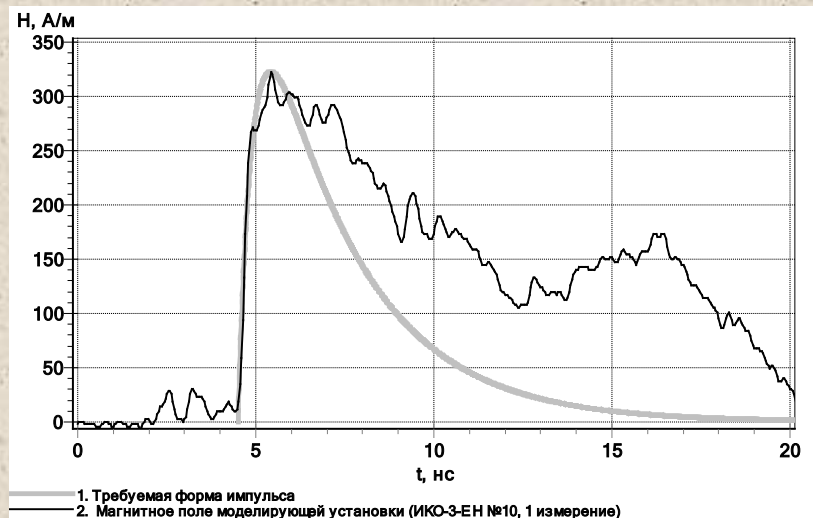
- эффективность экранирования магнитной составляющей импульсного ЭМП напряженностью $1,25 \div 3,5 \text{ кА/м}$ для микросекундного диапазона, обеспечиваемое конструкциями БКС из Al с $d = 2 \text{ мм}$ без МПЭ, составляет 29 дБ (29 раз), а с МПЭ $d_{\Sigma} = 360 \mu\text{м}$ – $60 \div 51 \text{ дБ}$ ($1000 \div 360$ раз), соответственно;
- насыщение магнитных слоев МПЭ наблюдается в области $10 \div 11 \text{ кА/м}$, что существенно превышает максимальные значения напряженности магнитного поля грозового происхождения $H_{max} = 3 \text{ кА/м}$.
- эффективность МПЭ увеличивается с ростом количества слоев или снижением толщины магнитных слоев при постоянной суммарной толщине экрана;
- МПЭ градиентного типа обладают более высокой эффективностью экранирования импульсного ЭМП (на $8 \div 12\%$), чем МПЭ симметричного типа при равных суммарных толщинах магнитных и немагнитных слоев.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТЫ МПЭ ИМПУЛЬСНЫХ ЭМП НАНО- И СУБНАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНОВ Эксперимент.

(ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, АО «Тестприбор» г. Москва)



Напряженность магнитного поля воздействия №1



Напряженность магнитного поля воздействия №2

Образцы экранирующих конструкций в виде куба с размером ребра 330 мм, изготовленных из СТФ ($d_{Cu}=18$ мкм) с нанесенными дополнительно МПЭ.

№	Строение МПЭ NiFe/Cu (N слоев × d мкм)	№1 t_1 -5 нс; t_2 -1000 нс		№2 t_1 -0,5 нс; t_2 -3 нс		
		К _Н , дБ в диапазонах		К _Е , дБ	К _Н , дБ	К _Е , дБ
		~100 КГц	>1МГц			
1	10x5мкм/ 9x2,5мкм	~ 85	>90	>74	>82	>65
2	50мкм/0	~ 61	>90	>74	>82	>65
3	15мкм/0	~ 59	>85	>74	>82	>65
4	3x5мкм/ 2x2,5мкм	~ 63	>85	>74	>82	>65
5	0/0	~ 55	>75	>74	>82	>65

t_1 - длительность фронта на уровне 0,1-0,9;
 t_2 - длительность импульса на уровне 0,5.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МПЭ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КОРПУСОВ БОРТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 0,01 ÷ 100 МГц

(ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, АО «Тестприбор» г. Москва)



Частота, МГц	Коэффициент экранирования, дБ			
	Образец №1	Образец №3	Образец №4	Образец №4*
0,01	35	36	36	37
0,1	54	55	54	56
0,2	61	60	61	61
0,5	65	66	66	66
1	67	66	67	67
10	47	48	48	48
30	53	53	52	56
50	59	62	64	59
70	61	52	56	62
100	64	64	66	70

Зависимости эффективности экранирования корпусов бортовых компьютеров с МПЭ для электрической составляющей ЭМВ в диапазоне частот от 0,01 до 100 МГц

* - образец с закрытыми отверстиями для соединений

ОБЪЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью расширения функциональных характеристик МПЭ в настоящей работе рассмотрен новый тип широкополосных электромагнитных экранов (ШЭЭ), включающий многослойную магнитную структуру и композиционный материал с высокими прочностными и коррозионностойкими характеристиками.



Образцы серийных корпусов для РЭА с ШЭЭ

Тип 1 - корпус РЭА (модель В025; материал – АСД-12; $d = 1,0$ мм, габариты – $114 \times 89 \times 55$ мм³);

Тип 2 – корпус РЭА (модель G137 герметичного типа, АСД-12; $d = 1,5$ мм; габариты - $120,5 \times 120,5 \times 101,5$ мм³);

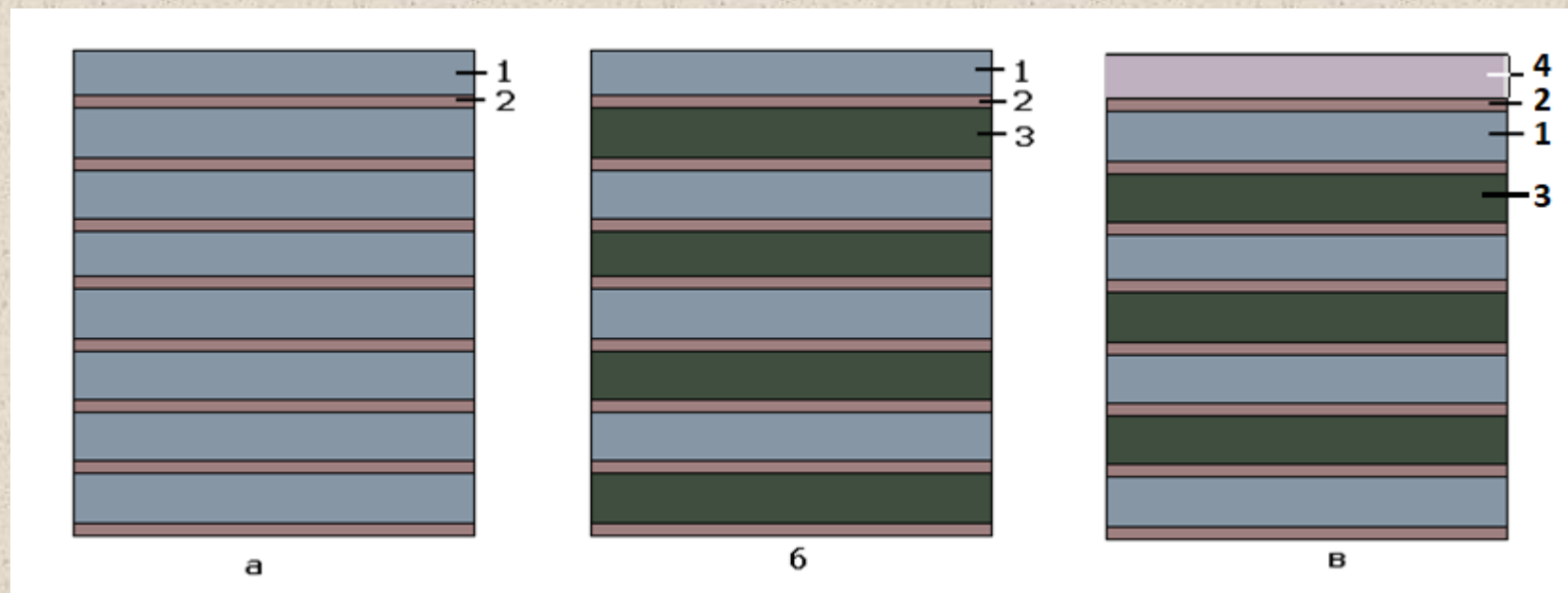
Тип 3 - корпуса РЭА (модель G139 герметичного типа, АСД-12 $d = 1,5$ мм; габариты - $158,5 \times 158,5 \times 101,5$ мм³).

ШЭЭ с $d = 1,5$ мм, содержали многослойную магнитную структуру градиентного типа и композиционный поглощающий материал. Многослойная структура с общей толщиной $\approx 1,0$ мм состояла из 8 слоев сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 100 мкм, 2 слоев сплава $\text{Ni}_{50}\text{Fe}_{50}$ по 100 мкм и 9 слоев меди по 2,5 мкм. Композиционный поглощающий материал на основе порошков гексаферрита бария (50 вес.%), альсифера (50 вес.%) и полимерной матрицы (эпоксидная смола) был нанесен на многослойную структуру градиентного типа.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ШЭЭ



ТИПЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ЭКРАНОВ (МПЭ), ШИОКОПОЛОСНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЭКРАН



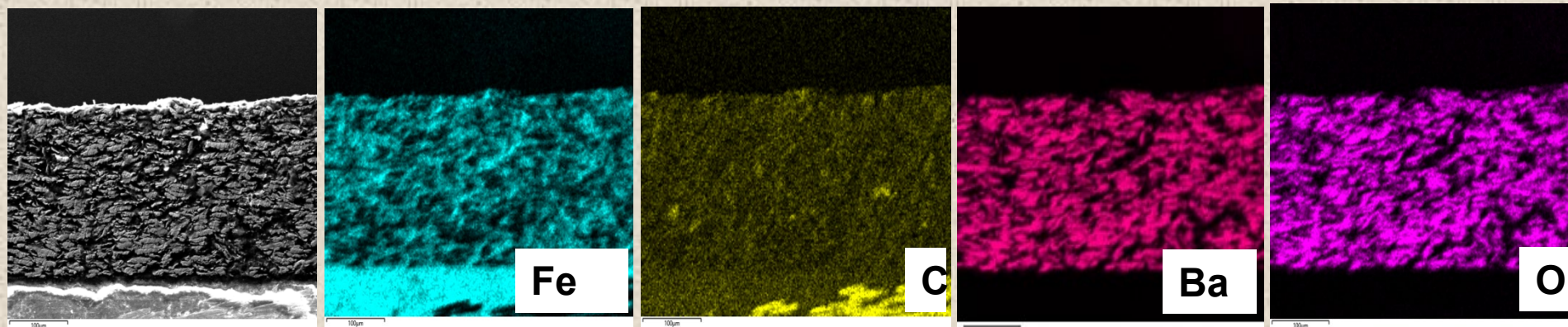
Симметричный тип МПЭ (а), содержит слои с высокими значениями μ (поглощение магнитной составляющей ЭМИ) и слои с высокими значениями σ (поглощение электрической составляющей ЭМИ).

Градиентный тип МПЭ(б) и ШЭЭ (в), имеют более сложный характер изменения параметров отдельных слоев по мере проникновения вглубь материала, чем симметричные структуры.

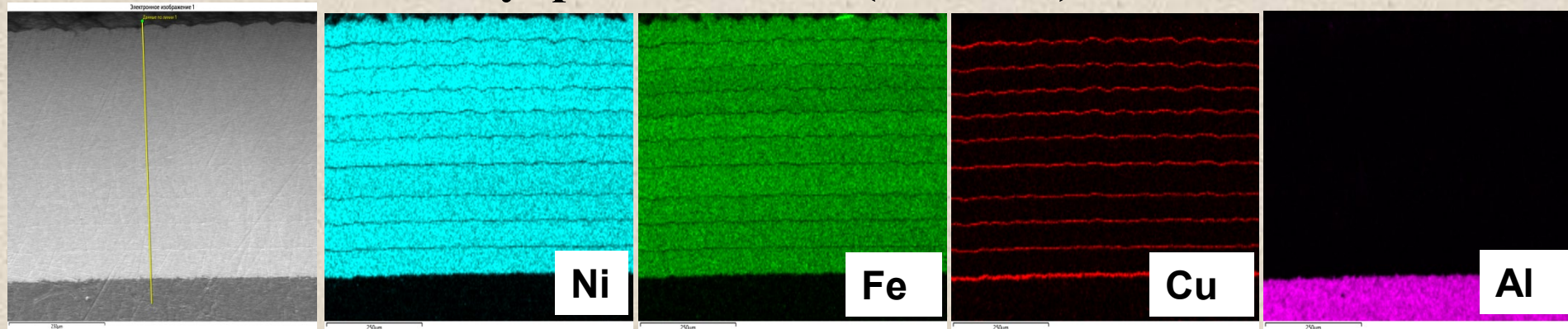
- 1 – магнитный слой с высоким значением μ ($Fe_{20}Ni_{80}$);
- 2 – диамагнитный слой с высокой σ (Cu);
- 3 – магнитный слой с высоким значением B_S ($Fe_{50}Ni_{50}$);
- 4 – композиционный материал на основе порошков гексаферрита бария, альсифера и полимерной матрицы (эпоксидная смола).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПО ТОЛЩИНЕ ШЭЭ (сканирующий электронный микроскоп Zeiss Evo 10 с EDX-анализатором)

Внешний слой: композиционный материал

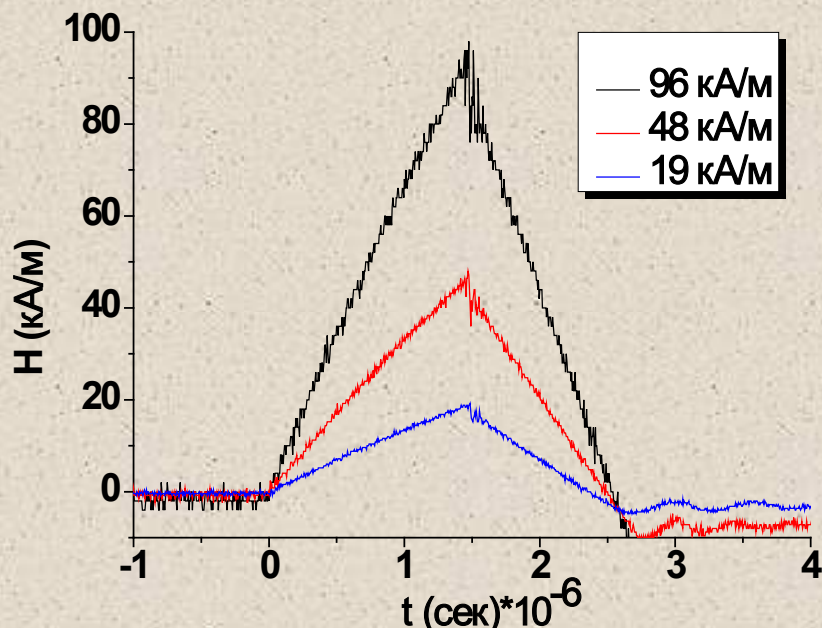


Внутренние слои: (NiFe/Cu) x 10



МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

В ряде случаев напряженность магнитной составляющей ЭМИ может превышать значения 12 кА/м, поэтому практический интерес также представляет область более интенсивных магнитных импульсов ($H_{max} \geq 20$ кА/м).



Эффективности экранирования определялась из выражения:

$$A = 20 \cdot \lg(H_{ex}/H_{in}), \text{ дБ}$$

где A - эффективность экранирования магнитной составляющей ЭМИ;
 H_{ex} - напряженность магнитной составляющей ЭМИ в области размещения корпуса при его отсутствии;
 H_{in} - напряженность магнитной составляющей ЭМИ внутри корпуса.

Амплитудно-временная форма напряженности магнитной составляющей ЭМИ (длительность импульса 2,5 мкс; частота 200 кГц).

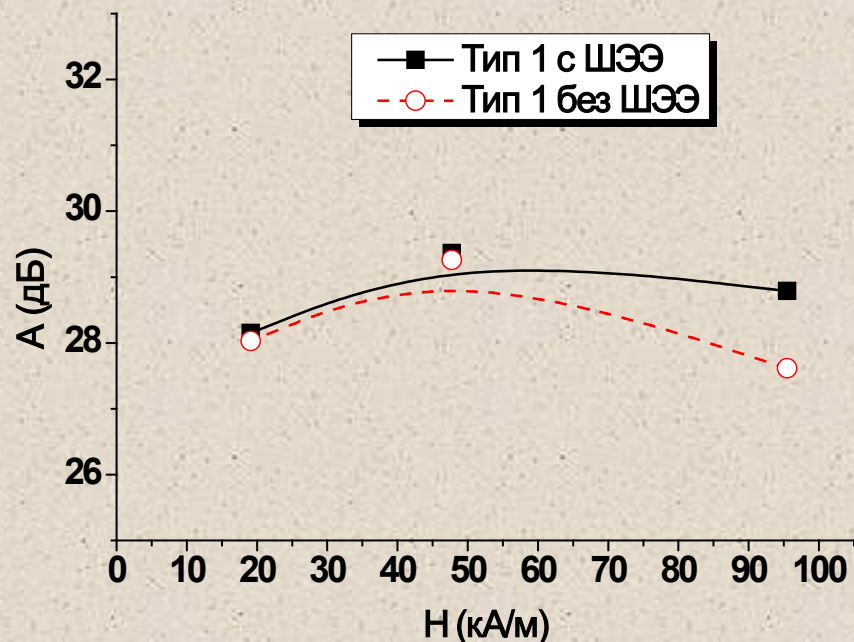
Измерение СВЧ характеристик опытных образцов ШЭЭ в диапазоне частот 0,7÷17 ГГц проводили на измерителе коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01– 18. Относительная погрешность ± 1 %. Коэффициенты поглощения (k_{abs}) и отражения (k_{ref}) определялись по формулам:

$$k_{abs} = 10 \times \lg(P_{abs}/P_{inc});$$

$$k_{ref} = 10 \times \lg(P_{ref}/P_{inc})$$

где P_{inc} ; P_{abs} ; P_{ref} - мощности падающего, поглощенного и отраженного ЭМИ, соответственно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЭЭ



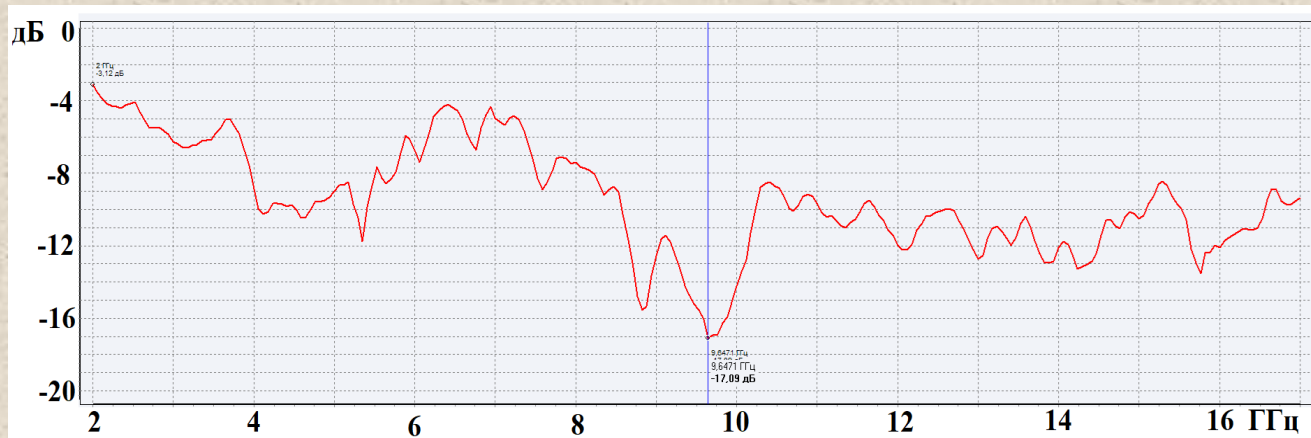
Зависимость эффективности экранирования корпусов РЭА 1 типа с ШЭЭ и без экрана от напряженности магнитной составляющей ЭМИ

ВЫВОДЫ:

- в области высокоинтенсивных магнитных полей ($H \geq 20$ кА/м) при $f \geq 200$ кГц магнитная проницаемость материала ШЭЭ уменьшается, а эффективная глубина проникновения ЭМВ в алюминий составляет 0,2 мм. Поэтому при толщинах 1,0 мм и более, алюминий можно рассматривать как материал, эффективно экранирующий высокоинтенсивные ЭМИ за счет поверхностного эффекта;
- наличие композиционного слоя позволило существенно улучшить эксплуатационные характеристики поверхностей корпусов РЭА с ШЭЭ - повысить механическую прочность, стойкость к воздействиям изменений температуры и коррозии во влажной среде.

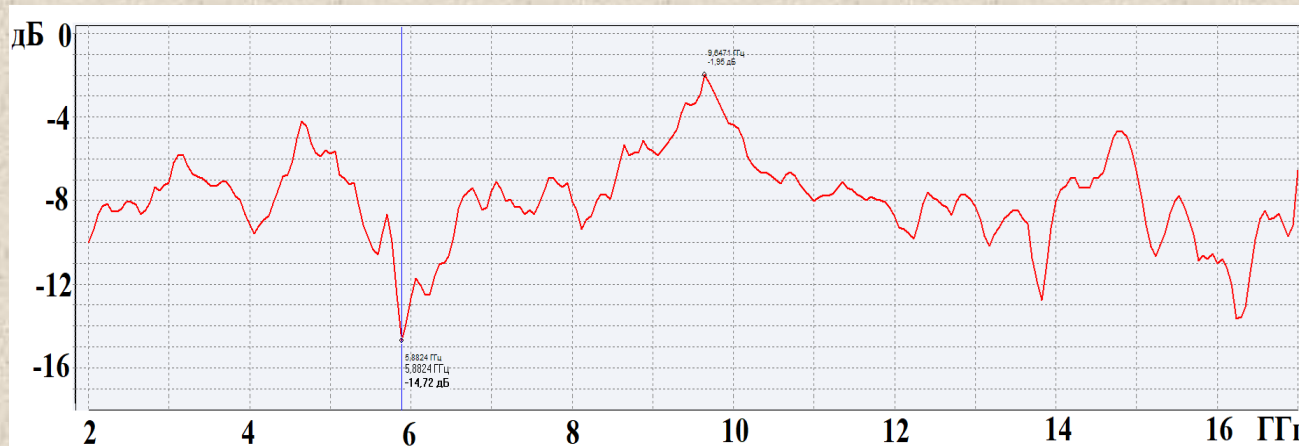
№	Методика испытаний. ГОСТ	Результат	Соответствие ГОСТ
1	Стойкость к воздействию изменений температуры. ГОСТ 30630.0.0-99	Образцы выдержали изменения температуры от -50°C с выдержкой 24 часа до +80°C с выдержкой 3 часа	Соответствует
2	Прочность сцепления с корпусом. ГОСТ 9.302-88	Образцы выдержали нагрев до 200°C с выдержкой 1 час и охлаждение на воздухе.	Соответствует
3	Стойкость к коррозии. ГОСТ 30630.2.2-2001	Образцы выдержали 4 цикла испытаний при влажности 95-100% (1 цикл – 16 часов при 40°C и 8 часов при 30°C).	Соответствует

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЭЭ



а

Зависимости
коэффициентов
поглощения (а) и
отражения (в)
ШЭЭ от частоты
СВЧ ЭМВ



в

Выводы:

- зависимости коэффициентов поглощения и отражения композиционного покрытия от частоты в СВЧ диапазоне ЭМВ носит сложный резонансный характер. Общая тенденция – увеличение поглощающей и отражательной способности материала с ростом частоты;
- для интервалов частот $0,7 \div 10,0$ ГГц и $10,0 \div 17,0$ ГГц значения коэффициентов поглощения ШЭЭ составляют $-8 \div -12$ дБ и $-10 \div -14$ дБ, соответственно;
- в диапазоне частот от $0,7$ до 17 ГГц отражательная способность ШЭЭ в $6 \div 24$ раз ниже, по сравнению с отражательной способностью МПЭ.

ВЫВОДЫ

Исследования функциональных характеристик серийных корпусов РЭА с широкополосными электромагнитными экранами, содержащими многослойную магнитную структуру градиентного типа и композиционный поглощающий материал, позволили сделать следующие выводы:

– при воздействии ЭМИ частотой $10 \div 50$ кГц и напряженностью $1,25 \div 3,5$ кА/м конструкции экранов, изготовленные из алюминия толщиной 2 мм, обеспечивают ослабление магнитных полей 29 дБ (29 раз), а конструкции на основе МПЭ толщиной 0,36 мм – $60 \div 51$ дБ ($1000 \div 360$ раз), соответственно.

При увеличении H_{max} до 12 кА/м эффективность экранирования МПЭ снижается до $36 \div 39$ дБ;

– при воздействии ЭМИ частотой 200 кГц и напряженностью $19 \div 96$ кА/м корпуса РЭА, изготовленные из алюминия толщиной 1 мм, обеспечивают ослабление магнитных полей $28 \div 29$ дБ, корпуса РЭА с дополнительно нанесенными ШЭЭ обеспечивают $A = 28 \div 30$ дБ;

– ШЭЭ являются эффективными средствами защиты от мощного ЭМИ на частотах до 50 кГц и значениях H_{max} до 12 кА/м, при более высоких значениях частот и H_{max} эффективность экранирования ШЭЭ снижается;

– включение в структуру электромагнитного экрана композиционного материала, позволяет расширить функциональные характеристики ШЭЭ – в диапазоне частот от 0,7 до 17 ГГц снизить отражательную способность в $6 \div 24$ раз, по сравнению с отражательной способностью МПЭ, повысить механическую прочность, стойкость к воздействиям изменений температуры и коррозии во влажной среде;

– применение новых материалов, способов и технологий электромагнитной защиты типовых корпусов радиоэлектронного и информационного оборудования от воздействия ЭМИ должно способствовать решению ряда проблем, в том числе связанных с применением беспилотных транспортных систем: повысить безопасность участников дорожного и воздушного движения, обеспечить электромагнитную совместимость блоков РЭА, способствовать борьбе с киберпреступностью, терроризмом и др.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ