

пульса и сигнала, представляющего собой знакопеременную последовательность четвертей синусоиды, соответствующих по времени переднему и заднему фронтам каждого радиоимпульса (рисунок 2).

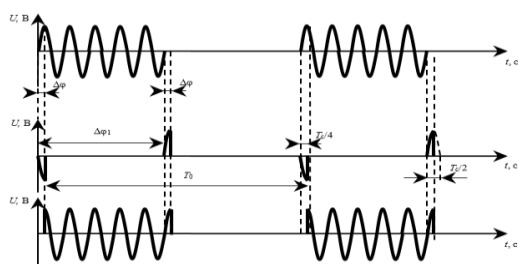


Рисунок 2 – Представление сигнала последовательности радиоимпульсов задержанных во времени

Использование принципа наложения позволяет учесть и сам добавочный сигнал как сумму двух более простых задержанных относительно друг друга разнополярных периодических сигналов, что облегчает спектральный анализ результирующего сигнала.

Таким образом, результирующий сигнал представляет собой сумму трех периодических сигналов: неискаженного радиоимпульса и двух разнополярных периодических последовательностей импульсов в виде четвертей синусоиды, сдвинутых относительно друг друга по фазе на $\Delta\varphi_1 = mT_c$.

При расчете спектра сигнала суммы двух периодических последовательностей радиоимпульсов, задержанных относительно друг друга на время t_c , необходимо умножить функцию спектральной плотности исходного одиночного однополярного сигнала на $2 \left| \sin \left(\frac{n\Omega t_c}{2} \right) \right|$, где $\Omega = \frac{2\pi}{T_0}$ –

УДК 621.371

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ГИБРИДНЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПАНЕЛЕЙ
Алешкевич Н.Н., Будай А.Г., Кныш В.П., Малый С.В.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь
Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Одной из важнейших проблем в настоящее время является оценка и обеспечение безопасности электро и радиотехнических устройств. Это связано с решением задач электромагнитной совместимости различных систем, а также с защитой информации, содержащейся в побочном электромагнитном излучении технических средств обработки информации от технических средств раз-

частота периодизации, n – номер гармонической составляющей [2]. Причем $t_c = mT_c$.

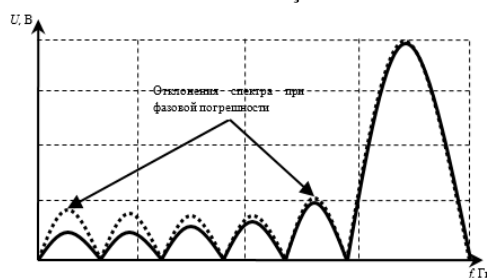


Рисунок 3 – Спектры сигналов периодической последовательности радиоимпульсов неискаженного и с фазовой погрешностью

Сравнение спектров неискаженного сигнала периодической последовательности радиоимпульсов и сигнала периодической последовательности радиоимпульсов с фазовой погрешностью (рисунок 3), позволяет определить области частотного спектра наименее чувствительные к фазовой погрешности генерируемых тестовых сигналов.

Анализ амплитудных спектров показывает, что фазовая погрешность стремится к нулю с приближением к несущей частоте и увеличивается при удалении от нее.

Литература

1. Ревин, В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: учеб. пособие: в 5 ч. Ч.1 / В.Т. Ревин. – Минск : БГУИР, 2002. – 70 с.
2. Суходолов, Ю.В. Спектрально-импульсные методы контроля обмоток асинхронных двигателей / Ю.В. Суходолов. – Минск, 1993. – 113 с.
3. Толстов, Г.П. Ряды Фурье: 3-е изд./ Г.П. Толстов. – М. : Наука, 1980. – 384 с.
4. Малашин, А.Н. Спектральный (частотный) метод анализа электрических цепей: учеб. пособие / А.Н. Малашин [и др.] – Минск : ВАРБ, 2015. – 95 с.

ведки, бесконтактной модификации и уничтожения информации. Для этого используются радиопоглощающие материалы и покрытия Поскольку в настоящее время значительно возросло количество разнообразных источников ЭМИ (информационные системы, системы связи, навигации и др.) и расширяется используемый частотный диапазон, то весьма актуальными являются

проблемы защиты от воздействия электромагнитных сигналов в сверхширокой полосе частот.

Для создания сверхширокополосных радиопоглощающих покрытий (РПП) с низким уровнем отражения используются гибридные покрытия, в состав которых входит комбинация плоских однослойных покрытий с магнитным типом поглощения (ферритовые или полимерные композиты с магнитным типом поглощения) и покрытий в виде периодических решеток из элементов пирамидальной формы из углеродосодержащего материала с электрическим типом поглощения. Ферритовые покрытия обеспечивают эффективное поглощение электромагнитного излучения в низкочастотной области, при этом являются тонкими, а покрытия с периодически профилированной поверхностью обеспечивают низкий уровень отражения в высокочастотной области.

Экспериментальная отработка гибридного РПП включает следующие этапы:

- выбор исходных материалов ферритового поглощающего слоя;
- изготовление образцов феррита в виде колец из разного по составу материала и разной толщины и измерение коэффициента отражения в коаксиальном тракте;
- выбор из изготовленных образцов наиболее соответствующих по коэффициенту отражения ТЗ и изготовление ферритовых пластин размером 100x500 мм для исследования их в созданной измерительной установке в виде симметричной полосковой линии;
- моделирование РПП с использованием результатов измерений и выбор геометрической формы, размеров и технических параметров пирамидальных элементов РПП;
- изготовление ферритовых пластин размером 500x500 мм и пирамидальных элементов с размерами основания 100x500 мм и 500x500 мм и измерение их параметров в полосковой установке и в открытом пространстве в различных диапазонах частот, как в отдельности, так и в составе гибридного РПП.

Предварительное тестирование ферритового материала осуществляется в коаксиальной линии. Измерения кольцевых образцов в коаксиальной линии эквивалентны измерениям плоского бесконечного слоя аналогичной толщины в свободном пространстве [1].

Ферритовый слой гибридного поглотителя электромагнитных волн на металлической подложке работает в диапазоне 10–1000 МГц. Этот факт обуславливает выбор частотного диапазона исследований в коаксиальной линии. Первичное тестирование и выбор ферритового материала осуществлялся на измерительной ячейке, реализованной на основе отрезка 50-омной коаксиальной линии. Диаметр центрального проводника равен 7 мм, наружного – 16 мм. В качестве образца использовались ферритовые

кольца с наружным диаметром 16 мм, внутренним – 7 мм и толщинами в диапазоне 6 ÷ 9 мм.

Измерительная ячейка подключалась к векторному анализатору Anritsu Vector Star MS 4642В в режиме измерения параметра S11.

Первоначально осуществлялась проверка и калибровка измерительного тракта помещением в ячейку закорачивающей шайбы, коэффициент отражения которой равен единице. Затем, на шайбу помещалось исследуемое кольцо, и фиксировалась частотная характеристика коэффициента отражения.

При выполнении работы были исследованы образцы ферритовых колец, отличающихся составом, технологией производства, толщиной. Для дальнейшей работы был выбран образец толщиной 8мм, имеющий коэффициент отражения в диапазоне частот 250÷400МГц менее (– 25 дБ).

Реальные ферритовые конструкции состоят из набора малых пластин со своими допусками на размеры и с возможными погрешностями их монтажа. Поэтому необходимо проводить измерения на фрагментах предполагаемой конструкции.

Для исследования крупногабаритных панелей была реализована измерительная ячейка на основе короткозамкнутой симметричной полосковой линии.

При размерах линии, не допускающей распространения волн высших типов, в ней распространяется Т-волна, подобная волне в свободном пространстве.

В качестве базовой выбрана ферромагнитная панель размерами 500x100 мм. По исходным данным была рассчитана и изготовлена измерительная ячейка размерами 500x205x1000 мм³ [2, 3]. Ширина центрального проводника равна 280 мм. Ячейка соединена с 50-омным разъемом плавным переходом длиной 1050 мм. Геометрические размеры ячейки позволяют производить измерения до 300 МГц.

Измерения на малых, по сравнению с длиной волны расстояниях на частоте 30 МГц имеют значительную погрешность из-за отличия фронта падения волны на РПП от плоского[4]. Поэтому была произведена калибровка измерительного канала. В качестве калибратора была выбрана панель размером 100x500 мм из материала F006 фирмы "Franconia", характеристики которого сертифицированы.

При обработке данных измерений учитывался поправочный калибровочный коэффициент.

Для тестирования РПП на частотах 30 и 300 МГц из отобранного по результатам измерений на кольцах феррита были изготовлены панели размерами 100x500x11 мм³. Набор состоял из ферритовых элементов 20x33x8 мм³ и наклеивался на металлическую основу. Две панели укладывались по обе стороны центрального проводника полосковой линии, зазоры заполнялись специально изготовленными вставками. Коэффи-

коэффициент отражения измерялся с помощью векторного анализатора Anritsu Vector Star MS 4642B.

С учетом результатов моделирования были изготовлены фрагменты панелей из пенополиуретана с углеродным наполнителем в виде пирамид заданной геометрии и размеров. Ячейка представляет собой пирамиду высотой 329 мм на пьедестале $100 \times 100 \times 60$ мм³. Были разработаны рецептуры пропитывающего раствора с различным содержанием углерода, изготовлены фрагменты 1×5 пирамид и исследованы их характеристики совместно с ферритовыми пластинами. В качестве базовой концентрации углерода в пропитывающем растворе была принята концентрация, выбранная с учетом результатов моделирования и обеспечивающая заданную проводимость материала панели.

В табл. 1 приведены значения поправочного коэффициента Δ и коэффициента отражения ферритовой пластины R_f и панели гибридного РПП R_g размерами 100×500 мм в нижней части рабочего диапазона частот, измеренные в полосковой линии с учетом поправочного коэффициента.

Таблица 1 – Значения поправочного коэффициента и коэффициентов отражения ферритовой пластины и гибридного РПП

Частота, МГц	30	50	100	200	300
Δ , дБ	-8,1	-5,9	-0,1	-9,7	-5,1
R_f , дБ	-13,3	-13,5	-13,0	-24,7	-21,2
R_g , дБ	-14,9	-18,7	-19,0	-24,9	-22,1

Следует отметить, что значения коэффициента отражения пластины на 1,5-2дБ выше значений, полученных для ферритового кольца в коаксиальной линии. Это объясняется наличием, даже при хорошей подгонке, зазоров между малыми ферритовыми пластинками, вносящими дополнительное магнитное сопротивление.

Исследования гибридного РПП на частоте 300 МГц проводились в свободном пространстве с помощью специально изготовленной полуоткрытой рупорной антенны с размерами раскрытия 800×800 мм. Для минимизации отражений от посторонних предметов антенна направлялась в открытое окно. Таким образом, измерения проводились фактически в открытом пространстве. Предварительно программно в векторном анализаторе проводилась компенсация принятого сигнала из-за рассогласования антенны и рассеяния на окружающих предметах.

Измерения проводились по общепринятым методикам с применением векторного анализатора цепей Anritsu Vector Star MS 4642B путем сравнения сигнала, отраженного от металлического листа и от исследуемой панели поглотителя [5].

В качестве эталона-отражателя используется металлическая поверхность с размерами равными размеру испытываемого РПП.

Для испытаний была изготовлена ферритовая панель 500×500 мм², на которую наклеивался пирамидальный блок 5×5 пирамид.

Последовательность операций при измерениях следующая:

- 1) при свободной антенне производится компенсация принятого сигнала;
- 2) перед антенной устанавливается металлическая пластина и фиксируется частотная зависимость принятого сигнала;
- 3) перед антенной устанавливается РПП на металлической пластине и фиксируется частотная зависимость принятого сигнала;
- 4) нормировкой сигнала от РПП к сигналу от пластины вычисляется частотная зависимость коэффициента отражения РПП.

По аналогичной методике осуществляются измерения в диапазоне 1-18ГГц с использованием измерительной антенны П6-23М.

Измерения на частоте 30 ГГц проводились с использованием антенны ETS Lindgren model 3116 В и векторного анализатора Agilent 8722 ET 50 МГц – 40 ГГц.

Результаты измерений в свободном пространстве приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента отражения гибридного РПП

Частота ГГц	0,3	1,0	3.0	10.0	18.0	30.0
Коеф. отр.дБ	-21	-25	-35	-49	-48	-45

Разработанное гибридное РПП сопоставимо по функциональным возможностям и весовыми характеристиками с зарубежными образцами. При этом РПП существенно превосходит характеристики зарубежных аналогов в верхней части частотного диапазона, что позволит создавать сверхширокополосные безэховые камеры не только для целей исследования электромагнитной совместимости и специальных измерений, но и для измерения параметров современных антенных систем и ЭПР радиолокационных объектов.

Литература

1. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах М.: Физматиз. 1963.
2. Кухаркин Е.С. Инженерная электрофизика. Техническая электродинамика. М.: Высш. шк., 1982. – 520 с.
3. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: "Сов. радио", 1967. – 652с.
4. Романов А.М., Беляев А.А., Беспалова Е.Е. Недостатки волноводных методов измерения характеристик радиопоглощающих материалов. Труды ВИАМ №3, 2015.
5. Малай И.М., Титаренко А.В. Метрологические аспекты использования безэховых и экранированных камер (БЭК) для оценки нормируемых характеристик антенных систем СВЧ диапазона ФГУП «ВНИИФТРИ».