МЕТОДЫ ЭКРАНИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ МОДУЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

В.В. Глотов, *к.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет, vadik-livny@mail.ru;*
Н.Д. Майков, *Воронежский государственный технический университет, nik-maikof@yandex.ru.*

УДК 621.382

Аннотация. С ростом степени миниатюризации радиоэлектронных устройств, а также увеличением скорости их переключения и повсеместным внедрением в критически важные сферы проблема электромагнитных помех приобретает все большую значимость. Нежелательные электромагнитные помехи могут существенно нарушать работу радиоэлектронной аппаратуры. Одним из эффективных способов борьбы с нежелательными электромагнитными помехами является экранирование. Достичь экранирования могут материалы, свойства которых – электрические, магнитные и механические – точно соответствуют требованиям/расположением в конкретном изделии. Ключевым показателем такой защиты является эффективность электромагнитного экранирования, которая количественно выражает способность материала ослаблять проникающее электромагнитное излучение. В данной статье представлен обзор существующих методов оценки электромагнитного экранирования материалов.

Ключевые слова: электромагнитная помеха; ближнее поле; дальнее поле; экранирование.

METHODS OF SHIELDING PRINTED MODULES OF ELECTRONIC DEVICES FROM ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

V.V. Glotov*, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Voronezh State Technical University;*
N.D. Maikov*, Voronezh State Technical University.*

Annotation. With the increasing miniaturization of electronic devices, along with their increasing switching speed and widespread adoption in critical applications, the problem of electromagnetic interference is becoming increasingly important. Unwanted electromagnetic interference can significantly disrupt the operation of electronic equipment. One effective way to combat unwanted electromagnetic interference is shielding. Shielding can be achieved by materials whose electrical, magnetic, and mechanical properties precisely match the requirements/locations in a specific product. A key indicator of such protection is electromagnetic shielding effectiveness, which quantifies the material's ability to attenuate penetrating electromagnetic radiation. This article provides an overview of existing methods for assessing the electromagnetic shielding of materials.

Keywords*:* electromagnetic interference; near field; far field; shielding.

Введение

С увеличением числа источников электромагнитного излучения, таких как электродвигатели, линии электропередачи, радиоприемники, радиолокационные системы проблема электромагнитных помех становится все более значимой. Но

наиболее важное обострение проблемы электромагнитных помех произошло с появлением электронных компонентов высокой плотности, таких как биполярный транзистор, интегральная схема и микропроцессор. Таким образом, плотность источников электромагнитного излучения с широким спектральным составом стала очень большой, и, следовательно, увеличилось количество проблем с электромагнитными помехами. Электромагнитные помехи влияют на системы связи и работу многих радиоэлектронных устройств [1]. Во избежание сбоев в работе радиоэлектронные устройства должны быть эффективно экранированы, чтобы не воздействовать на другие устройства и не подвергаться их воздействию. Электромагнитные экраны высокоэффективны, когда они изготовлены из материалов, характеризующихся высокой проводимостью, высокой проницаемостью или структурными параметрами, так что уровень ослабления поля, распространяющегося через них, является высоким [2].

Целью проведенного исследования является выявление оптимального существующего метода экранирования радиоэлектронных компонентов от электрического, магнитного или электромагнитного излучения.

Электромагнитное экранирование

Принятая в настоящее время теория экранирования основана на соотношениях для случая бесконечного плоского экрана конечной толщины *t*, размещенного в свободном пространстве в области плоской волны. На рис. 1 показан концептуальный механизм определения электромагнитной защиты.

Электромагнитная защита (*SE*) экрана определяется как отношение падающей волны (E_i) и падающей волны (E_t) [3]:

$$SE_{dB}=20log(E_i/E_t) \quad (1)$$

$$SE_{dB}=20log(H_i/H_t) \quad (2)$$

$$SE_{dB}=20log(P_i/P_t) \quad (3)$$

Данные уравнения представлены для измерения электромагнитной защиты для различных полей: уравнение 1 – для электрических полей, уравнение 2 – для магнитных полей и уравнение 3 – для электромагнитной мощности. Как видно на рис. 1, существует несколько механизмов, которые способствуют затуханию поля, после прохождения через объект [4]. Первое – это отражение *(R)* на первой границе раздела. Часть волны, проходящая через эту границу раздела, ослабляется при прохождении через экран, и это является механизмом поглощения (*A*). Когда она достигает второй границы раздела, часть ослабленной волны передается в среду с правой стороны экрана, а другая часть подвергается многократным отражениям и пропусканию внутри экрана. Каждый раз, когда волна достигает границы раздела, части этой волны добавляются к общему количеству отраженных и прошедших волн, соответственно, и дополнительные отраженные и пропущенные поля постепенно ослабевают при прохождении через экран. Это явление повторного отражения (*B*) [5].

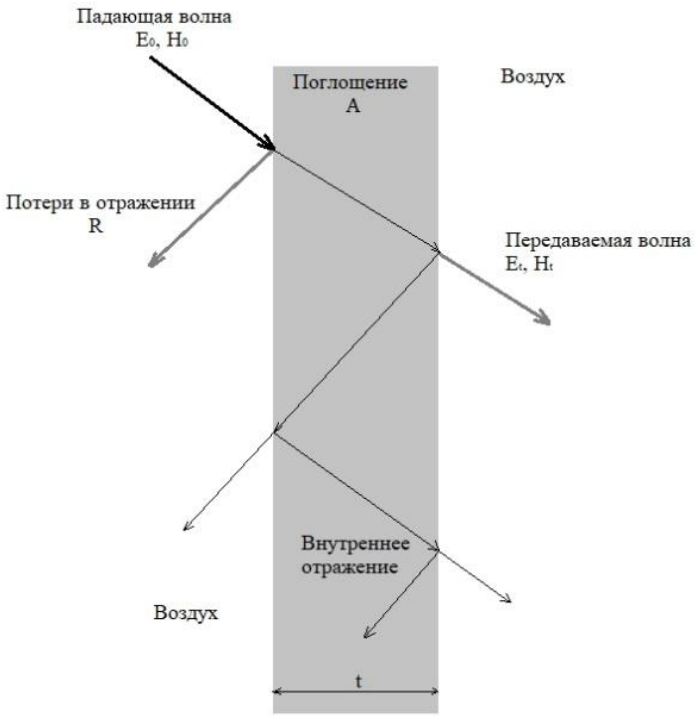

Рисунок 1

Таким образом, эффективность экранирования является суммой этих трех слагаемых:

$$SE_{dB}=R_{dB}+A_{dB}+B_{dB}, \quad (4)$$

где R_{dB} представляет собой потери на отражение, вызванные отражением на границах раздела; A_{dB} представляет собой потери на поглощение волны при ее прохождении через экран; B_{dB} – потери на поглощение. представляет собой потери из-за многократных отражений внутри экрана (коррекция повторного отражения). Позже, при моделировании случая бесконечного плоского экрана с помощью коаксиальной линии передачи, была продемонстрирована эквивалентность между уравнением электромагнитной защиты в случае бесконечного плоского экрана и коэффициентом затухания (I) образца материала, помещенного в коаксиальную ячейку:

$$SE_{dB} = I_{dB} \quad (5)$$

Методы измерения электромагнитной защиты

Измерение электромагнитной защиты направлено на количественную оценку ослабления падающей волны, вызванного взаимодействием с образцом материала. На рис. 2 показана базовая испытательная установка для экспериментального определения электромагнитной защиты [6].

Сигнал, излучаемый источником, измеряется приемником сначала без образца (эталонное измерение), а затем с образцом, установленным между ними (измерение нагрузки). В обоих случаях сигнал поддерживается на одном и том же уровне. Электромагнитная защита рассчитывается в соответствии с уравнениями, где нижние буквы i и t обозначают величины, измеренные без пробы и с образцом соответственно.

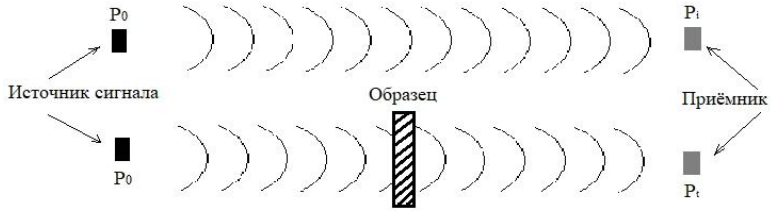

Рисунок 2

Методы испытаний электромагнитной защиты должны быть рассчитаны на различные типы проб. Получение желаемой толщины и формы может быть затруднено, если материал является шероховатым, хрупким или не обладает достаточной жесткостью. Тестирование композитных материалов с низкой поверхностной проводимостью может быть затруднено при использовании методов, требующих хорошего контакта между держателем образца и образцом. Помимо собственных экранирующих свойств материала, измерительная система также вносит свой вклад в итоговое значение электромагнитной защиты [7].

Методы работы с коаксиальными ячейками

Поперечная электромагнитная ячейка представляет собой расширенную коаксиальную линию передачи с заостренными концами, которую можно подключить к обычной коаксиальной линии и использовать в качестве держателя образца при измерениях электромагнитной защиты. Методы испытаний, в которых для оценки экранирующей способности материала используются коаксиальные ячейки, основаны на математической эквивалентности между идеальным случаем бесконечного плоского экрана, размещенного в свободном пространстве в дальней зоне, и в случае с образцом материала, помещенного в линию передачи, выражаемым уравнением. Следовательно, поперечные ячейки имитируют условия дальнего поля. В настоящее время эта модель принята во всем мире и является основой стандартов *ASTM ES*7-83 и *ASTM D*4935-99. Элементы на основе поперечной электромагнитной ячейки изготавливаются с сопротивлением 50 Ом и круглым или прямоугольным поперечным сечением [8].

Метод, основанный на стандарте *ASTM ES*7-83

*ASTM ES*7-83 – метод измерения эффективности электромагнитного экранирования плоских материалов. Он основан на использовании кольцевого держателя коаксиальной линии передачи с непрерывным проводником. Этот метод представлен на рис. 3. Держатель можно разобрать, чтобы вставить образец в форме шайбы (рис. 4).

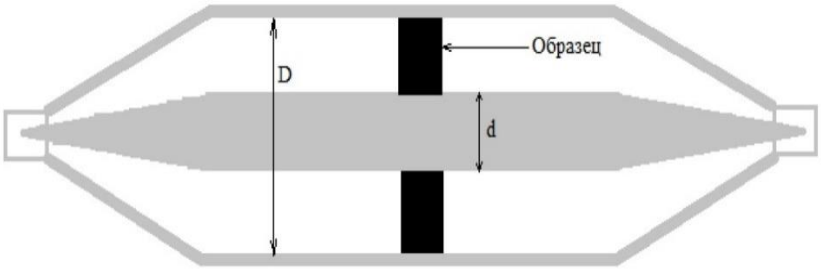

Рисунок 3

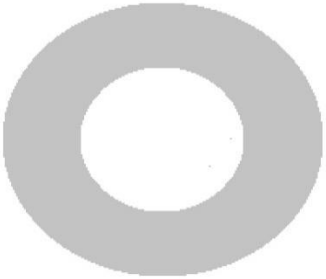

Рисунок 4

В собранном виде внутренний и внешний проводники идеально образуют непрерывные соединения [9]. Поперечная электромагнитная ячейка спроектирована таким образом, чтобы обеспечивать распространение только в диапазоне частот от 1 МГц до 1,8 ГГц. Более низкая частота ограничена оборудованием. При частотах, превышающих его верхнюю частоту, в ячейке начинают распространяться моды более высокого порядка, и сужающиеся участки будут отражать эти моды более высокого порядка. Поле в ячейке возмущается отраженными модами более высокого порядка, что затрудняет проведение надежных измерений. Чтобы избежать появления мод более высокого порядка, верхняя частота не должна превышать частоту среза:

$$f_{max}<c/(\pi/2(D+d)) \quad (6)$$

С годами этот метод получил дальнейшее развитие, и новейшие разработки обеспечивают более низкое контактное сопротивление и частотный диапазон от 0 Гц до примерно 5 ГГц. Измерения могут производиться с помощью источника сигнала и приемника, таких как осциллограф или анализатор спектра, или с помощью векторного сетевого анализатора [11]. Электромагнитная защита определяется соотношением между уровнем сигнала, измеренным без образца (эталонное измерение), и уровнем сигнала с образцом, помещенным внутрь ячейки (измерение нагрузки), в соответствии с уравнением [10]:

$$SE_{dB}=20log(U_i/U_t), \quad (7)$$

где: U_i – напряжение, измеренное без образца, и U_t – напряжение, измеренное с образцом внутри испытательной ячейки.

Метод, основанный на стандарте *ASTM D*4935-99

В этом методе используется коаксиальная испытательная ячейка с внутренним проводником без конца и внешним проводником с фланцем (рис. 5).

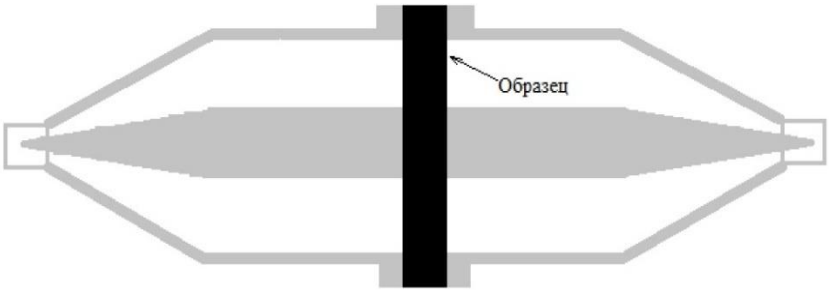

Рисунок 5

Он обеспечивает более точные измерения электромагнитной защиты, чем метод *ASTM ES*7-83, для различных материалов, таких как металлы, проводящие пластмассы и материалы с высоким поверхностным сопротивлением. Этот метод аналогичен предыдущему методу для поверхностно-проводящих материалов, но для проводящих пластмасс основан на емкостной связи между фланцами. Согласно стандарту, измерения могут проводиться на частотах от 30 МГц до 1,5 ГГц, причем верхняя частота ограничена пределом пропускания [11]. Контрольное измерение производится путем помещения между фланцами куска материала в форме шайбы, соответствующего размерам фланца, и диска из материала того же диаметра, что и внутренний проводник, как показано на рис. 6.

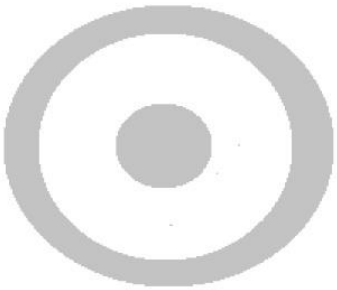

Рисунок 6

Для измерения нагрузки используется образец материала в форме диска диаметром, равным диаметру фланцев (рис. 7).

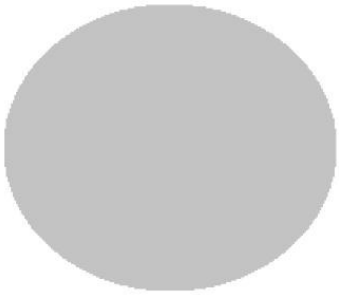

Рисунок 7

Контрольный и нагрузочный образцы должны быть изготовлены из одного материала и одинаковой толщины. После выполнения контрольных измерений и измерений нагрузки значение электромагнитной защиты будет определено из уравнений (1-3) или (7) в соответствии с записанными единицами измерения.

Во время измерений части элемента не должны соприкасаться, особенно с внешним проводником. При наличии контакта между деталями контактное сопротивление соответствует сопротивлению образца и изменяет результаты измерений. Вот почему для крепления фланцев к образцу следует использовать непроводящие винты или опоры [12].

Двойная поперечная электромагнитная ячейка

Двойная поперечная электромагнитная ячейка состоит из двух ячеек, соединенных общим отверстием, в которое устанавливается испытуемый образец (рис. 8).

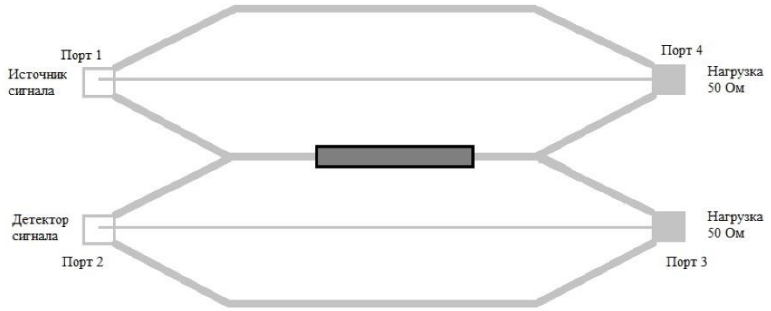

Рисунок 8

Одна из двух ячеек действует как управляющая ячейка и передает энергию через отверстие во вторую ячейку, которая служит приемником. Связь между двумя ячейками может быть проанализирована с помощью теории малых апертур.

В отличие от коаксиальных поперечных электромагнитных ячеек, которые воспроизводят условия дальнего поля, двойная ячейка имитирует условия ближнего поля. Для данного входного сигнала выходной сигнал может быть измерен либо на порту 2 (обратный порт), либо на порту 3 (прямой порт), при этом другой порт подключен к нагрузке 50 Ом. Поскольку апертура асимметрично подает энергию на два выходных порта, путем сложения или вычитания выходных сигналов, измеренных на прямом и обратном портах, можно индивидуально определить взаимодействие электрического и магнитного полей через образец [13].

Эффективность электрического и магнитного экранирования рассчитывается с помощью следующих уравнений:

$$SE_{dB}=20log|\Sigma_i/\Sigma_t| \quad (8)$$

$$SE_{dB}=20log|\Delta_i/\Delta_t| \quad (9)$$

Уравнение (8) необходимо для расчета эффективности электрического поля, (9) – для магнитного. В уравнениях Σ_i и Σ_t – суммы сигналов, измеренных на прямом и обратном портах, с незагруженной и загруженной апертурой соответственно, Δ_i и Δ_t – разности сигналов, измеренных на прямом и обратном портах с незагруженной и загруженной апертурой соответственно. Для измерения суммы и разности сигналов на прямом и обратном портах приемной ячейки используется гибридное соединительное устройство или векторный сетевой анализатор. Обычно сдвоенные ячейки состоят из коаксиальных ячеек прямоугольного сечения [14].

Методы, основанные на стандартах *MIL-STD*-285 и *IEEE-STD*-299

Данный метод определяет процедуры и требования для тестирования электромагнитной совместимости, в частности, для оценки эффективности электромагнитного экранирования корпусов. Он охватывает измерения затухания для экранированных корпусов в диапазоне частот от 100 кГц до 10 ГГц. В этом методе используется экранированный корпус с отверстием и плоский образец, установленный в отверстие, который облучается электромагнитной волной в интересующем диапазоне частот (рис. 9). Для оценки эффективности экранирования необходимо выполнить два измерения: контрольное и нагрузочное. Контрольное измерение заключается в измерении тестового сигнала, излучаемого передающей антенной через отверстие экранированного корпуса, без образца. Измерение нагрузки производится путем передачи тестового сигнала через

отверстие с размещенным над ним образцом. Во время измерений антенны будут находиться в одном и том же положении. Образцы должны быть достаточно большими, чтобы закрывать окно, и должны быть надлежащим образом установлены над окном (с помощью электромагнитной прокладки), чтобы избежать утечки сигнала между образцами и стеной [15].

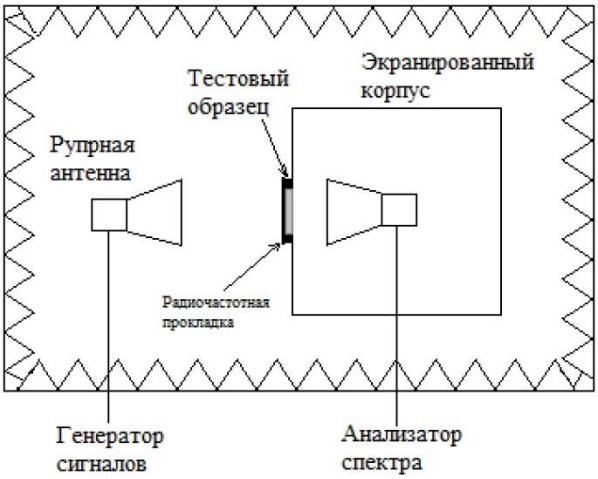

Рисунок 9

Эффективность экранирования определяется из уравнений в соответствии с записанными единицами измерения. Этот стандарт был заменен на *IEEE-STD*-299, который описывает метод измерения эффективности экранирования корпусов с наименьшим размером не менее 2 м в диапазоне частот от 50 Гц до 100 ГГц. Этот частотный диапазон разделен на три поддиапазона для измерения ослабления магнитного поля (50 Гц-20 МГц), электрического поля (20 МГц-300 МГц) и плоских волн (300 МГц-100 ГГц). Для каждого поддиапазона будут использоваться соответствующие антенны (магнитные петли, диполи, логопериодические антенны, рупорные антенны). В данном стандарте передающая антенна и экранированный корпус с установленной в нем приемной антенной помещаются в безэховую камеру. Генератор сигналов и анализатор спектра расположены снаружи безэховой камеры и подключены к передающей и приемной антеннам с помощью коаксиальных кабелей [16].

Методы в свободном пространстве

Поскольку экранирование предполагает наличие плоского экрана, размещенного в свободном пространстве в области плоской волны, представляется целесообразным, чтобы измерения электромагнитного экранирования проводились, по крайней мере, в аналогичных условиях. Для создания таких условий можно было бы использовать безэховые камеры. Безэховая камера – это экранированное помещение со стенами, покрытыми материалом, способным поглощать столько падающей энергии, что может имитировать свободное пространство. Для измерения эффективности экранирования передающая и приемная антенны, а также образец помещаются внутрь безэховой камеры, в то время как устройства измерительной системы (генератор сигналов, приемник) размещаются снаружи для устранения помех (рис. 10). По сравнению с методами, описанными выше, размер образца значительно больше, более 1 м^2, чтобы избежать дифракционных эффектов. Кроме того, образец может быть установлен на окне на металлической стенке, разделяющей безэховую камеру на две зоны.

Электромагнитная защита определяется, как и в других методах, путем сравнения уровней сигнала, измеренных между антеннами с образцом и без него.

Другим способом определения эффективности экранирования в безэховой камере является использование метода отражения. На рис. 11 показана структурная схема этого метода с двумя передающими и приемными антеннами, расположенными на одной стороне образца (под наклоном) в дальней зоне обзора и подключенными к векторному сетевому анализатору. Для определения электромагнитной защиты необходимо выполнить два измерения: контрольное измерение, которое заключается в измерении сигнала, отраженного металлическим эталонным образцом, и измерение нагрузки, когда измеряется сигнал, отраженный испытуемым образцом. Записанные значения вводятся в математический алгоритм, который позволяет определить значение электромагнитной защиты. Кроме того, этот метод позволяет оценивать электрические и магнитные свойства материалов.

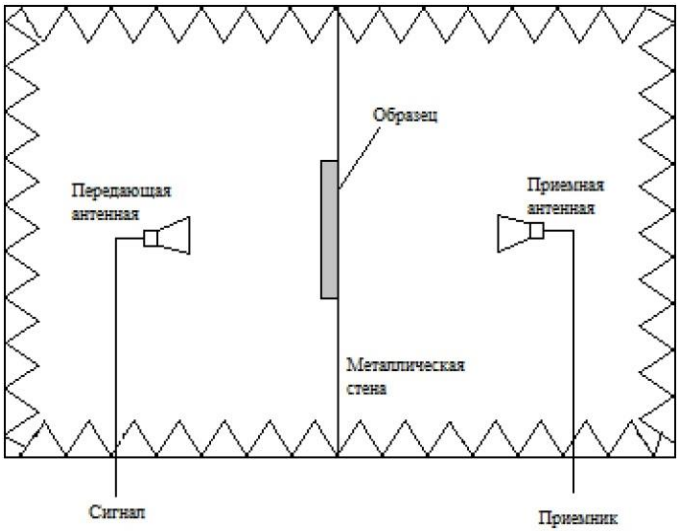

Рисунок 10

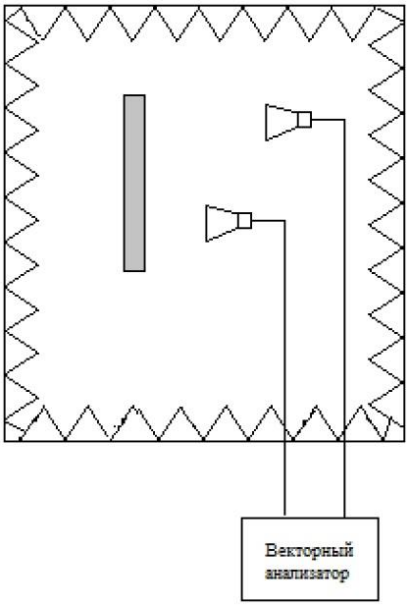

Рисунок 11

Измерение магнитного поля в ближней зоне

В методе измерения эффективности магнитного экранирования образца материала в ближней зоне используются две небольшие рамочные антенны, расположенные коаксиально с каждой стороны образца, как показано на рис. 12.

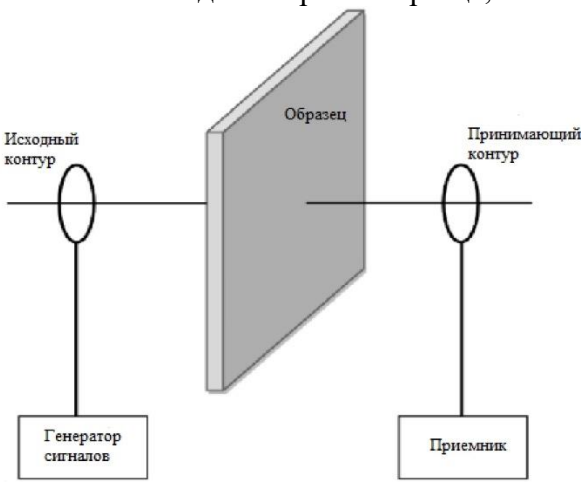

Рисунок 12

Исходный контур создает магнитное поле, перпендикулярное образцу. Измеряя это магнитное поле в присутствии образца и без образца, сохраняя одинаковое расстояние между магнитными контурами, можно определить магнитное поле электромагнитной защиты из уравнения (2). Аналогичная процедура может быть использована для оценки эффективности электрического экранирования в ближнем поле.

Заключение

В этой статье представлены несколько методов, используемых для экспериментального определения электромагнитной защиты материалов в ближней и дальней зоне. Методы, основанные на использовании коаксиальной поперечной электромагнитной ячейки, очень хорошо определены с точки зрения выполнения измерений в ближней или дальней зоне. Таким образом, методы *ASTM ES*7-83, *ASTM D*4935-99 позволяют проводить измерения в дальнем поле, а двойная ячейка и метод, основанный на ячейке с отверстиями, размещенной внутри вибрационной камеры, создают условия для определения электромагнитной защиты в ближнем поле. Важным преимуществом метода *ASTM ES*7-83 является тот факт, что ячейка образует замкнутую среду в виде коаксиальной конструкции, в которую помещается испытуемый образец и в которой распространяется только испытательное поле без возмущений со стороны окружающей среды. Следовательно, нет необходимости в экранированных корпусах или безэховых камерах, а также широкий диапазон частот. Методы, основанные на использовании коаксиальных ячеек, экспериментально подтверждены в относительно низкочастотном диапазоне. Результаты, полученные с помощью этого метода, сильно зависят от контактного сопротивления между образцом материала и испытательным приспособлением. Другой способ управления ячейкой с отверстиями заключается в использовании отражательной камеры. При использовании этого метода сохраняются преимущества двойной ячейки, разница заключается в том, что получается статистически точно определенное поле падающих сигналов. Наконец, методы, обычно называемые методами свободного пространства, дают результаты относительно экранирующей способности

некоторых материалов, поскольку условия испытаний очень близки к условиям эксплуатации. Они будут обладать более высокими эксплуатационными характеристиками, поскольку динамика системы приема излучения будет выше.

Литература

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
2. Зеленин И.А., Рыжиков А.Г., Фёдоров С. М. Антенная решетка на основе линзы Ротмана // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2012. – Т. 8. – № 11. – С. 102-105.
3. Рыжиков А.Г., Слинчук С.А., Фёдоров С.М., Чугуевский В.И. Исследование характеристик антенной решетки на основе линзы Ротмана и антенн с эллиптическими плечами // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2013. – Т. 9. – № 2. – С. 49-52.
4. Ашихмин А.В, Першин П.В., Фёдоров С.М. Пеленгование с использованием модели, в которой наблюдаемое поле является суперпозицией плоской падающей волны и рассеянных сферических волн, создаваемых блестящими точками на корпусе расеивателя // Вестник Воронежского института МВД России, 2018. – № 3. – С. 70-76.
5. Фёдоров С.М. Исследование влияния фильтрующих конденсаторов на рабочие характеристики управляемого метаматериала // Вестник Воронежского института МВД России, 2023. – № 4. – С. 111-113.
6. Ашихмин А.В., Винников В. И., Негробов В.В., Пастернак Ю. Г., Фёдоров С.М. Исследование возможности компенсации фазовых искажений в раскрыве антенны Вивальди с помощью печатной линзы // Радиотехника, 2012. – № 2. – С. 92-97.
7. Антипов С.А., Ашихмин А.В., Негробов В.В., Фёдоров С.М. Экспериментальное исследование сверхширокополосной антенны, построенной на основе модификации плоской линзы Люнеберга // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2012. – Т. 8. – № 3. – С. 113-118.
8. Панычев С.Н., Пастернак Ю.Г., Рыжиков А.Г., Фёдоров С.М. Обзор принципов построения излучающих устройств с возможностью формирования нескольких лучей // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2012. – Т. 8. – № 7.1. – С. 126-129.
9. Винников В.И., Останков А.В., Пастернак Ю.Г., Фёдоров С.М. Обзор современных методов построения квазифрактальных излучающих структур // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2011. – Т. 7. № 5. – С. 55-59.
10. Антипов С.А., Негробов В.В., Фёдоров С.М. Использование гибридных печатных антенн для построения линейных приемных антенных решеток // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. – Т. 7. № 12.1. – С. 119-122.
11. Ашихмин А.В., Виниников В.И., Власов М. Ю., Негробов В.В., Пастернак Ю. Г., Рембовскин Ю.А., Сысоев Д. С., Фёдоров С. М. Исследование перспективных путей создания радиопеленгаторных антенных решеток на основе сверхширокополосных печатных элементов // Радиотехника, 2012. – № 2. – С. 97-104.
12. Панычев С.Н., Фёдоров С.М. Обзор методов построения квазифрактальных антенных решеток // Вестник Воронежского государственного технического уннверснтета, 2012. – Т. 8. – № 4. – С. 32-35.

13. Ромащенко М.А. Основные процедуры и программа планирования обеспечения ЭМС при разработке электронной аппаратуры // Радиотехника, 2013. – № 3. – С. 93-97.
14. Ромащенко М.А., Чураков П.П. Моделирование ближнего электромагнитного поля конструкций электронных систем с использованием численных методов // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2012. – Т. 8. № 3. – С. 109-112.
15. Ромащенко М.А., Коновалов Р.Г., Воробьев М.Е., Основные этапы методики обеспечения электромагнитной совместимости для подвижных объектов связи // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2023. – Т. 19. № 1. – С. 62-68.
16. Фёдоров С.М., Пещерин О.М. Антенная решетка на основе последовательного массива патч антенн // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2025. – Т. 21. – № 1. – С. 103-106.