

УДК 621.3.09

Программно-аппаратный комплекс исследования электромагнитных экранов

*Якубов А.Р., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»*

*Научный руководитель: Соловьёв В.А., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Shakhnov@iu4.bmstu.ru*

Введение

В настоящее время активное использование электромагнитного ресурса, связанное с развитием радиосвязи и различных систем передачи и дистанционной обработки информации, телевидения, мобильной связи, радиолокации и радионавигации, приводит к появлению дополнительного электромагнитного фона. Особенно сложная электромагнитная обстановка складывается в крупных городах, где источниками электромагнитных полей радиочастотного диапазона являются радиочастотные станции, вещания, телевидения, радиолокационные станции, средства сухопутной подвижной радиосвязи и другие источники. Весомый вклад вносят также бытовые электроприборы, электротранспорт и, безусловно, компьютеры. Наведенные электромагнитные поля все чаще вызывают сбои в работе ИТ-оборудования, влияют на качество связи. В этих и подобных им случаях область, в которую поле не должно проникать, экранируется при помощи металлической оболочки от области, где имеется поле. Если такой оболочкой окружить источник переменного электромагнитного поля, то можно исключить влияние его излучения на расположенные вне оболочки устройства. Подобные оболочки носят название электромагнитных экранов. Экранирование - это физический процесс, связанный с распространением электромагнитных полей источников излучения в средах с различными электрофизическими свойствами. Эти процессы характеризуются отражением, преломлением, рассеянием и поглощением энергии электромагнитных полей. При проектировании экранирующих систем используют теорию поля, при этом вводится понятие «эффективность экранирования» или «коэффициент экранирования», которые в дальнейшем используются в качестве основного критерия выбора конструкции экранов и экранирующих материалов. Экранирующее действие экрана из немагнитного материала в переменном электромагнитном поле определяется наведенными в толще стенок экрана токами и возбужденным этими токами

магнитным полем. Очевидно, экранирующее действие возрастает при увеличении частоты и толщины стенок экрана.

Актуальность разработки высокоэффективных, широкополосных, технологичных и удобных в эксплуатации экранирующих и радиопоглощающих материалов обуславливается высокой потребностью в таких материалах при разработке и усовершенствовании конструкций изделий радиоэлектроники, устройств защиты информации и военной техники.

Экранирование является одним из основных способов достижения стойкости электронных систем к воздействию электромагнитной помехи. Помехой для ЭС является внешнее или внутреннее воздействие, приводящее к искажению информации во время ее сохранения, преобразования, обработки или передачи. Т.к. информационные сигналы в ЭС имеют электрическую природу, то при конструировании необходимо учитывать помехи той же природы, как наиболее вероятные источники искажения информации. Борьба с помехами приобретает все большую актуальность вследствие следующих причин:

- энергетический уровень информационных сигналов имеет тенденцию к уменьшению, а энергетический уровень внешних помех непрерывно увеличивается, что обусловлено ростом энерговооруженности народного хозяйства;
- из-за уменьшения габаритов активных элементов и линий связи между ними, а также увеличения взаимное влияние элементов;
- активного внедрения РЭС во все сферы человеческой деятельности.

Современные РЭС отличаются большой сложностью и состоят из множества элементов. Взаимодействие между ними должно происходить по строго определенным каналам, трактам и схемам. Появление каких-либо других направлений взаимодействия элементов РЭС нарушает условия нормального функционирования аппаратуры.

Одним из основных способов устранения взаимных связей, не предусмотренных функциональной схемой, является поэлементное, блочное и общее экранирование ЭС. В этом смысле экранирование выполняет ведущую роль, а конструирование экранов зависит от их конкретного значения. Решение задачи по конструированию экранов в зависимости от их назначения имеет свою специфику, обусловленную объемом работ и последовательностью решений. Если экран является внешним кожухом аппаратуры, он определяет общую компоновку, внешний вид и условия эксплуатации ЭС. Такой случай является наиболее общим, так как при этом должны решаться вопросы блочного и поэлементного экранирования и фильтрации цепей при максимальном использовании стандартизованных и нормализованных изделий, а также освоенных производством изделий из другой аппаратуры. Проектирование должно вестись с учетом особенностей данного типа РЭС. Достижение простоты конструкции экрана должно сочетаться с его компактностью, исключением излишнего расчленения общей

конструкции на отдельные блоки, обеспечивать простоту изготовления, высокую экономическую эффективность и повышение эксплуатационных качеств, удобство обслуживания и ремонта РЭС, а также реализацию требований эргономики и дизайна. С этих позиций важно обоснованно произвести выбор материала экрана и его покрытий, который определяет технологические характеристики аппаратуры, ее отдельных устройств и их режимы работы. Требования, предъявляемые к экрану, вытекают из общих требований к РЭС и роли, отводимой внешнему кожуху устройства.

Решение общей или частной технической задачи по ЭМЭ обычно начинается с изучения радиоустройства, в результате чего выявляются источники и намечаются наиболее экономичные способы ослабления радиопомех. Эти способы могут предусматривать:

- введение в схемы, конструкцию и размещение узлов аппаратуры дополнительных элементов и изменений, обеспечивающих уменьшение уровней помех до минимальных значений, за счет влияния, как на источник помех, так и на пути их распространения;
- защиту наиболее чувствительных элементов РЭС от влияния помех путем частичного или полного экранирования;
- локализацию помех в местах их генерации или в объемах, из которых эти наиболее чувствительные элементы РЭС или сама аппаратура исключаются.

Следует отметить, что необоснованный отказ от какого-либо вариантов или от учета какого-либо фактора, определяющего интенсивность помех в предположении, что соответствующая корректура будет вводиться при монтаже устройства. Часто приводит к задержке реализации проекта системы экранирования, сдачи в эксплуатацию РЭС и излишним расходам средств. В итоге необходимая эффективность экранирования может быть не обеспечена.

В технике проводной связи и радиотехнике важно уметь ограничить распространение в пространстве электрического и магнитного полей и, в особенности, защитить элементы электрических цепей, электронных устройств, электроизмерительных приборов и другого оборудования от помехонесущего поля.

Для решения задач анализа и синтеза экранирования был разработан программный код на языке QBasic, работающих на ЭВМ типа СМ-3, ДВК-1, Электроника-60, которые уже не используются в наше время. Решение задач анализа связана с расчетом величины эффективности экранирования Э, представляющей собой коэффициент экранного затухания в логарифмических единицах – децибелах, дБ. Задача синтеза связана с расчетом толщины стенок экрана и определением экранирующего эффекта. При расчете учитывались: конструкция экранирующего элемента, материал экрана, спектр частот помехи и соответствующие величины напряженности электрического или магнитного полей.

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/637741.html>

Цели и задачи работы:

- разработка методики исследования электромагнитных экранов.
- разработка и усовершенствование программного кода для лабораторной работы на современном языке программирования.
- визуализация процесса вычисления, для удобства проведения лабораторной работы.
- добавление новых параметров, материалов и конфигураций экранов.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы: разработка программного кода расчетов эффективности экранирования с помощью языков программирования PHP, визуализация процесса расчета и вывода результатов, путем использования языка программирования HTML, теория оптимизации, методы обработки данных в реальном времени, методики системного анализа.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана новая методика проведения лабораторной работы по исследования электромагнитных экранов;
- создано программное обеспечение для исследования электромагнитных экранов;
- разработана визуализация процесса вычисления;
- добавлены новые параметры, материалы и конфигурации экранов.

Практическая ценность работы: Результат данной работы позволит проводить расчет и анализ эффективности электромагнитных экранов. А так же он будет использован в образовательном процессе при проведении методических работ.

Результаты проекта:

- онтология предметной области электромагнитного экранирования;
- программно-аппаратный комплекс исследования электромагнитных экранов;
- визуализация процесса расчета экранирования электромагнитных экранов;
- методические материалы по использованию программно-аппаратного комплекса исследования электромагнитных экранов.

Реализация результатов: при реализации проекта были обеспечены следующие требования к техническому обеспечению:

- Программное обеспечение, используемое во всех компонентах системы, совместимо с ОС Windows.
- Программный комплекс работает на компьютерном оборудовании с Intel-совместимой.
- Программная реализация осуществлена с использованием современных языков и технологий программирования.

Наибольшее воздействие на работоспособность узлов РЭА оказывает магнитная составляющая электромагнитного поля с индукцией B . Когда магнитное поле частотой f пересекает замкнутый контур площадью S , то в контуре возникает ЭДС U :

$$|U| = 2\pi f \cdot S \cdot B$$

Рассчитанное по формуле напряжение U является напряжением помехи для чувствительных элементов устройства. При анализе помехоустойчивости печатных узлов чувствительными элементами обычно являются микросхемы, тогда S - наибольшая площадь замкнутого контура, образованного заземляющим и сигнальным проводниками.

Если $|U| \geq U_{\text{п}}$ и нет возможности уменьшить площадь контура S , то необходим электромагнитный экран, эффективность которого:

$$K_{\text{Э}} = \frac{U_{\text{вн}}}{U_{\text{вн}} + U_{\text{Э}}}$$

Главное назначение экрана - ослабление напряженности электрического (E) или магнитного (H) полей. В зависимости от назначения различают экраны с внутренними источниками помехи и экраны внешнего электрического поля, во внутренней полости которых помещаются чувствительные к помехам узлы [1].

На рис.1 приведена классификация электромагнитных экранов по трем признакам: типу поля помехи, конструктивной форме, материалу и конструкции стенок экрана.



Рис.1. Классификация электромагнитных экранов

Математические методы для расчета экранирования электрических, магнитных и электромагнитных полей

Основные формулы для расчета магнитостатического экрана. Для цилиндрического экрана эффективность экранирования в случае $\mu_r > 1$ определяется формулой



Следовательно, для заданных \mathcal{E}_H^H , μ_r , r_2 определим толщину экрана

$$d = r_2 \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4 \left(10^{20} - 1 \right)}{\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2}} \right]$$

Для прямоугольного экрана

$$\mathcal{E}_H^H = 20 \cdot \lg \left[1 + \left(1 - \frac{a_1^2}{a_2^2} \right) \left(\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2 \right) \right]$$

тогда

$$d^* = 0.5 \lambda \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 \left(\frac{f}{10^8} - 1 \right)}{\mu + \frac{1}{\mu} - 2}} \right]$$

Для сферического экрана



тогда

$$d^* = r_3 \left[1 + \sqrt{1 + \frac{45 \left(\frac{f}{10^8} - 1 \right)}{\mu + \frac{1}{\mu} - 2}} \right]$$

В целом эффективность магнитоэлектрических экранов шунтированием магнитного поля невелика. Так, например, экран, изготовленный из специального сплава «Армко», у которого $\mu_r = 3000$, при радиусе 40 см и толщине 1 см обеспечивает эффективность 31.5 дБ.

Основные зависимости для расчета электростатического экранирования. Эффективность электростатического экранирования плоского листового электростатического экрана можно оценить по формуле:



где r_3 - радиус эквивалентного сферического экрана.

$$r_3 = \sqrt{S_3 / \pi}$$

S_3 - площадь поверхности экрана;

a - расстояние источником и приемником помехи;

a_1 - расстояние от экрана до приемника помехи.

Для электростатических экранов замкнутой формы эффективность экранирования определяется выражением:

$$d^* = 10 \lg \left(\frac{a}{a_1} \right)^2$$

Таким образом, минимальная толщина экрана $d_{\min E}$ определяется по формуле:

$$d_{\min} = \frac{10^{\frac{d^*}{10}}}{60}$$

где d_E^* - необходимая эффективность экранирования.

Основные зависимости расчета электромагнитного экранирования. Электромагнитный режим экранирования охватывает частотный диапазон от 10^3 до 10^9 Гц при условии, что расстояние от экрана до источника помех $(5 - 6)\lambda$, а поперечные размеры экрана меньше длины волны помехи [2].

Эффективность экранирования сплошного электромагнитного экрана в дальней зоне излучения определяется по формуле:

$$K_{\text{эк}} = 10^{-0,5 \sqrt{z_{\text{в}} z_{\text{д}}} / d}$$

где d – толщина экрана;

$z_{\text{в}}$ - характеристическое сопротивление окружающего пространства, для плоской волны

$$z_{\text{в}} = 100\pi \text{ Ом};$$

$z_{\text{д}}$ - характеристическое сопротивление металла, из которого сделан экран.

Описание аппаратной части комплекса

Аппаратная часть состоит из низкочастотного генератора сигналов ГЗ-102, милливольтметра В7-21А и лабораторного макета. Схема лабораторного стенда представлена на рис. 2.

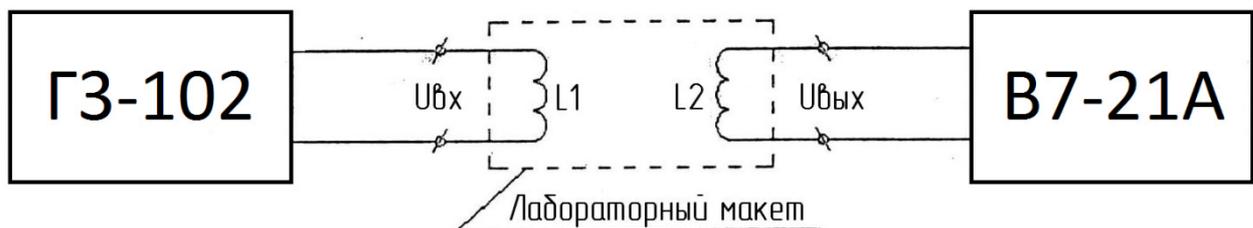


Рис. 2. Схема стенда

Генератор сигналов ГЗ-102 RC-типа с плавной установкой частоты в пределах каждого из четырех поддиапазонов. В генераторе обеспечивается выходной сигнал прецизионной формы. Гарантируется низкий уровень побочных составляющих, в том числе сигналов с чистотой питающей сети и ее гармоник [3].

Плавная и дискретная система регулирования выходного уровня обеспечивает его регулировку на -112 дБ относительно 7.75 В.

Общий вид генератора сигналов ГЗ-102 показан на рис.3.



Рис. 3. Общий вид генератора ГЗ-102

Вольтметр универсальный В7-21А предназначен для измерения:

- напряжения и силы постоянного тока;
- напряжения и силы переменного тока;
- активного сопротивления.

Вольтметр может применяться для контроля и измерения указанных параметров при производстве радиоаппаратуры и электрорадиоэлементов, при научных и экспериментальных исследованиях [8].

Общий вид универсального вольтметра представлен на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид универсального вольтметра В7-21А

Лабораторный макет состоит из двух индуктивных катушек L_1 и L_2 , разделенных экраном (рис.5).

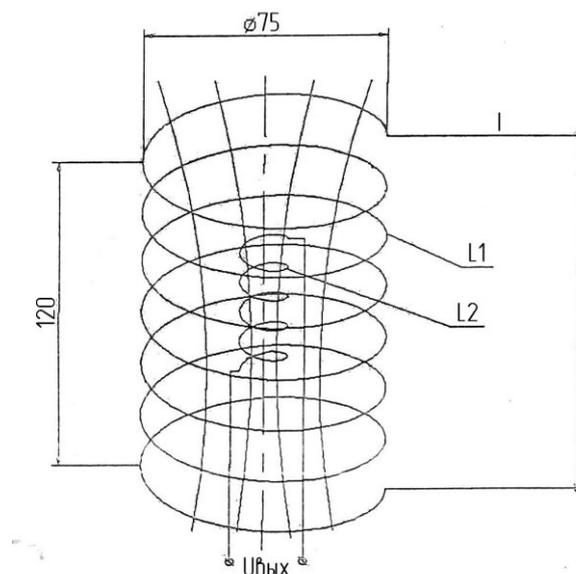


Рис. 5. Схема лабораторного макета

Внутри катушки L_1 создается переменное однородное магнитное поле \vec{H} , направленное вдоль оси катушки. Значение напряженности \vec{H} магнитного поля прямо пропорционально значению напряжения U_{BX} , создаваемого генератором ГЗ-36/1. Это поле является полем помехи для катушки L_2 и наводит в ней ЭДС $U_{ВЫХ}$, измеренное вольтметром ВЗ-38. Таким образом, наведенная ЭДС оказывается прямо пропорциональной \vec{H} :

$$U_{ВЫХ} = A \vec{H}$$

Следовательно, эффективность помещаемого между катушками L_1 и L_2 экрана может быть оценена по изменению наведенной в катушке L_2 ЭДС, а именно



где $U_{ВЫХ0}$ и $U_{ВЫХЭ}$ - наведенные в катушке L_2 э.д.с без экрана и с экраном, соответственно.

Следует заметить, что введение экрана создает реакцию и, тем самым, изменяет индуктивность катушки L_1 , что приводит к падению напряжения U_{BX} . В этом случае следует поддерживать U_{BX} на заданном уровне [4].

Общий вид лабораторного макета представлен на рис. 6.



Рис. 6. Общий вид лабораторного макета

Разработка программного обеспечения для расчета экранирования

Программа написана на языке HTML и PHP. С помощью языка разметки HTML была создан интерфейс программной части комплекса. Скриптовый язык PHP реализует расчетную часть программы.

Диаграмма пакетов программной части комплекса описывает состав программной системы, основой которой является пользовательский интерфейс. На рис. 7 изображена диаграмма пакетов, которая показывает, из каких частей состоит программная система, и как эти части связаны [5].

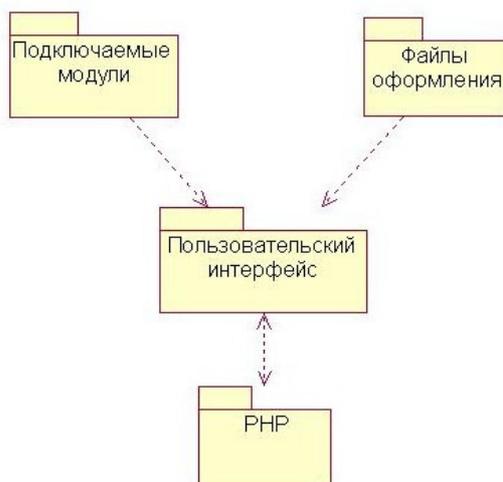


Рис. 7. Диаграмма пакетов АСУ

В таблице 1 приведена спецификация диаграммы.

Пакет	Описание
Подключаемые модули	Модули, реализующие функции программной части
Шаблон	Постоянная графическая часть
Пользовательский интерфейс	Интерфейс программной части
РНР	Лингвистическое обеспечение

Из данной диаграммы видно, что пользовательский интерфейс состоит из подключаемых модулей и постоянной графической части. Пакет «Пользовательский интерфейс» составляет основу системы [6].

Заключение

Актуальность разработки высокоэффективных, широкополосных, технологичных и удобных в эксплуатации экранирующих и радиопоглощающих материалов обусловливается высокой потребностью в таких материалах при разработке и усовершенствовании конструкций изделий радиоэлектроники, устройств защиты информации и военной техники. Одним из способов достижения стойкости электронных систем к воздействию электромагнитной помехи, к устранению или ослаблению паразитных связей между источником и приемником наводок является экранирование.

Разработанный комплекс является одновременно как средством расчета, так и методическим средством для введения студентов в курс электромагнитного экранирования. В данном комплексе был использован наиболее гибкий алгоритм расчета.

Список литературы

1. Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 120 с.
2. Парфенов Е.М., Камышная Э.Н., Усачев В.П. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры // Учебное пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1989.— 272 с.
3. Волин М.Л. Паразитные связи и наводки. – М.: Издательство «Советское радио».1965.
4. Учебное пособие по исследованию электромагнитных экранов, Усачев В.П., Григорьев В.П., Костиков В.Г., 1998.
5. Якубов А.Р. Исследование электромагнитных экранов. Квалификационная работа бакалавра. — М: МГТУ, 2013.
6. Камышная Э.Н., Усачев В.П. Расчет экранирования в ЭВА и РЭА, 1986.

7. Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В. и др. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств. /Под общ. редакцией Шахнова В.А. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. 500 с. (серия: Информатика в техническом университете).
8. Нестеров Ю.И., Власов А.И., Першин Б.Н. Виртуальный измерительный комплекс// Датчики и системы. – 2000. - №4. - С.12-22.