

УДК 656.25

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

МЕТОДИКА ЗОНИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ И МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Рассматривается методика выбора мест размещения чувствительных к электромагнитным помехам узлов в корпусе аппаратуры систем обеспечения безопасности движения поездов (зонирования). Предлагаются количественные параметры элементарных объемов, опасных зон и конструкций корпусов с позиций выявления в корпусе опасных зон. Эти параметры определяются на основании анализа распределения энергии электромагнитного поля по элементарным объемам внутри корпуса. Рассмотрены способы вычисления энергии электромагнитного поля в элементарных объемах при расчете во временной и частотной областях. В совокупности, предлагаемая методика зонирования с использованием количественных параметров для опасных зон снижает вероятность ошибки при разработке оборудования. Следовательно, она позволяет повысить помехоустойчивость аппаратуры систем обеспечения безопасности движения поездов.

Одним из способов снижения воздействия электромагнитных помех на микропроцессорную и микроэлектронную аппаратуру является зонирование [1]. Сущность его заключается в размещении узлов с чувствительной элементной базой в местах с низким уровнем помехового электромагнитного поля внутри корпуса.

Таким образом, задача зонирования является частным случаем проблемы оптимального синтеза технических систем, содержащих источники физических полей. Такие источники порождают в системах физические процессы, которые могут негативно сказаться на качестве функционирования системы. Решению этой проблемы посвящены работы [2, 3]. Но в этих работах рассмотрены, главным образом, вопросы внутриаппаратурного синтеза. Кроме того, проблема оптимального синтеза решена для сравнительно простых механических систем – пластин с опорами – и для теплотехнических систем.

В задачах электромагнитной совместимости (ЭМС) рассматриваются источники электромагнитных некондуктивных помех, расположенные вне корпуса микропроцессорной аппаратуры и, зачастую, на значительном удалении от него. Поэтому, по сравнению с указанными выше системами, в области ЭМС возникают дополнительные трудности. Во-первых, зачастую нельзя распорядиться местоположением источников мощных некондуктивных помех (мощные радиоизлучатели, генераторы преднамеренных электромагнитных воздействий, линии электропередач). Во-вторых, система рецепторов состоит из крайне сложной конфигурации паразитных антенн, описание которых современными средствами является практически невозможным [4].

Поэтому задача зонирования решается в приближенной постановке. Опасные зоны в корпусе технического средства определяются на основании расчета распределения помехового электромагнитного поля. В качестве вспомогательного средства используется

визуализация картины поля, к счастью, современные средства компьютерной математики позволяют осуществить ее с малыми затратами времени (рисунок 1).

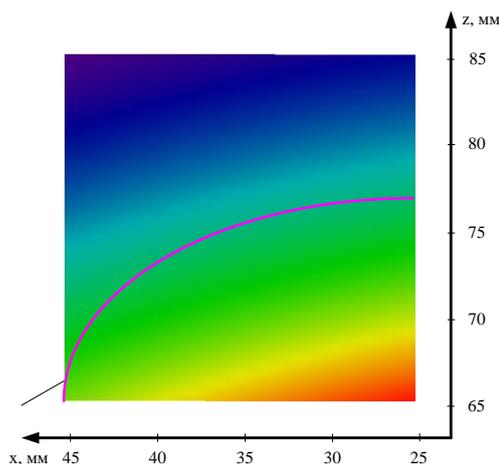


Рисунок 1 – Пример выделения опасной зоны с помощью компьютерной визуализации

Из-за неразработанности теоретического подхода осуществление зонирования практически не рассматривается в руководствах по проектированию микроэлектронной аппаратуры [1, 5, 6]. Процедура зонирования остается полукачественной и, во многом, эмпирической. Такое положение недопустимо при проектировании систем обеспечения безопасности движения поездов (СОБД), для которых имеется неразрывная связь между безопасностью и ЭМС [7].

Поэтому в статье поставлена цель разработки методики зонирования, в которой выделение зон осуществляется на основе анализа помехонесущего электромагнитного поля в корпусе рецептора, выделенные на рисунке 1 зоны характеризуются количественными параметрами, количественными параметрами характеризуется, в частности, конструкция корпуса аппаратуры СОБД и распределение в ней опасных зон.

Задача зонирования в статье ставится следующим образом. Дана конструкция, размеры корпуса микроэлектронной аппаратуры СОБД, а также размеры всех паразитных антенн на корпусе. К таким антеннам относятся отверстия, щели, винтовые соединения. Последние образуют штырьки внутри корпуса. Заданы источники электромагнитных помех, проникающих внутрь корпуса через паразитные антенны и распространяющихся в нем по воздуху. Требуется выделить внутри корпуса зоны, в которых уровень электромагнитных помех превышает допустимый для используемой в узлах аппаратуры СОБД элементной базы.

Для решения поставленной задачи объем корпуса разбивается на элементарные объемные ячейки (элементарные объемы), размеры которых незначительно превосходят характерные размеры элементной базы. Основной характеристикой электромагнитных помех целесообразно выбрать энергию электромагнитного поля. Это объясняется тем, что уровни энергии помех, необходимой для повреждения линий связи печатных узлов и элементной базы, имеют пренебрежимо малые разбросы относительно известных средних значений [1].

Элементарный объем рационально характеризовать относительной повреждающей энергией

$$\psi^i = \frac{W_V}{W_d}, \quad (1)$$

где W_V – энергия электромагнитного поля в элементарном объеме, Дж; W_d – энергия повреждения элементной базы, Дж.

Опасные зоны образуются смежными элементарными объемами, для которых $\psi^i \geq 1$. По принципу наихудших условий предполагается, что рецептор узла поглощает большую часть (до 80–90 %) энергии помех, находящейся в элементарных объемах. Таким образом, опасность размещения в зоне соответствующих элементов определяется энергией помехового электромагнитного поля в зоне и пороговой энергией повреждения элементной базы.

Конструкция корпуса аппаратуры СОБД с позиции распределения в нем опасных зон и решения задачи зонирования может оцениваться показателями потенциально опасного объема и повреждаемости. В задачах ЭМС повреждаемость целесообразно принять за интегральный показатель, характеризующий свойства корпуса по расположению в нем опасных зон.

$$V_{\text{оп}} = \sum 1(\psi^i - 1) V^i, \quad (2)$$

$$Y = \sum \psi^i 1(\psi^i - 1) V^i, \quad (3)$$

где 1 – единичная функция; $V_{\text{оп}}$ – потенциально опасный объем, м³; V^i – величина элементарного объема, м³; Y – повреждаемость, м³.

Перечисленные характеристики элементарных объемов, зон и корпуса первоначально введены в механике износоусталостного повреждения [8]. Основанием для переноса этого подхода на электромагнитные поля является положение о том, что электромаг-

нитное поле может рассматриваться как разновидность сплошной среды. Это положение обосновано академиком Л. И. Седовым в [9].

Из (1)–(3) следует, что для определения относительной повреждающей энергии необходимо рассчитать энергию электромагнитного поля, содержащуюся в элементарном объеме. Однако в имеющейся литературе вопросы расчета энергии рассмотрены в [10] только для электротехнических устройств. В большинстве источников [11–13] вопрос об энергии электромагнитного поля рассматривается с теоретических позиций.

Тем не менее указанные источники позволяют выбрать способы расчета энергии электромагнитного поля в зависимости от того, во временной или частотной области рассчитывается электромагнитное поле.

Для решения задачи зонирования наиболее удобны численные методы с дискретизацией объема: метод конечных элементов, который реализован в известном программном продукте ANSYS [14, 15], и метод ячеек ЯИИ, реализованный в продукте Microwave Studio [16]. Это объясняется тем, что соответствующие дискретные объекты расчетного метода естественным способом образуют разбиение объема корпуса на элементарные объемы.

В этих методах расчет ведется во временной области. Тогда энергия электромагнитного поля в элементарном объеме может быть найдена из выражения [13]

$$W_V = \left[\frac{1}{2} (\epsilon E^2(t) + \mu H^2(t)) \right] V^i, \quad (4)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м; E – напряженность электрического поля, В/м; μ – магнитная проницаемость среды, Гн/м; H – напряженность магнитного поля, А/м; t – время, с.

В случае импульсных помех электрическая и магнитная составляющие поля непрерывно меняются во времени, поэтому следует выбирать максимальное значение энергии электромагнитного поля за характерное время воздействия помехи.

Несмотря на достигнутый высокий уровень развития численных методов, аналитические методы расчета электромагнитных полей сохраняют актуальность при решении задач ЭМС. Это объясняется тем, что аналитические методы отличаются сравнительно несложным математическим аппаратом, вычислительной эффективностью, простотой реализации, отсутствием вычислительных трудностей, быстротой получения результата. Один из таких методов предложен в [17]. Результатом расчета в нем являются составляющие вектора напряженности помехового электромагнитного поля в декартовой системе координат и в частотной области. В этом случае можно рекомендовать рассчитывать энергию помех в элементарном объеме по формуле

$$W_V = \frac{w_x S_x}{2} + \frac{w_y S_y}{2} + \frac{w_z S_z}{2}, \quad (5)$$

где w_x, w_y, w_z – поток энергии электромагнитного поля по осям x, y, z соответственно, Дж/м²; S_x, S_y, S_z – площади граней элементарного объема м².

Указанные грани показаны на рисунке 2.

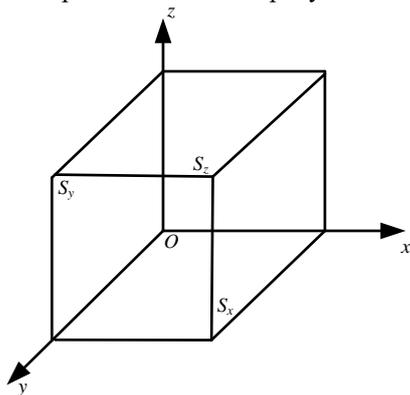


Рисунок 2 – Элементарный объем с гранями для расчета потока энергии электромагнитного поля

Плотность потока энергии по оси $q \in x, y, z$ рассчитывается по формуле [14]

$$w_q = \frac{1}{2Z_0} \int_0^{\infty} E_q^2(\omega) d\omega, \quad (6)$$

где Z_0 – импеданс свободного пространства, Ом; E_q – составляющая вектора напряженности электромагнитного поля по соответствующей оси, В/м, ω – круговая частота, рад/с,

Предложенная методика зонирования при выборе компоновки микросхемной и микропроцессорной аппаратуры СОБД основана на анализе распределения помехового электромагнитного поля в корпусе аппаратуры. Зоны образуются элементарными объемами, которые характеризуются энергией электромагнитного поля в объеме и относительной повреждающей энергией. Таким образом, выделенные опасные зоны имеют количественные параметры. Использование этих параметров снижает вероятность ошибки и влияние человеческого фактора. Расположение узлов аппаратуры СОБД в безопасных зонах внутри корпуса повышает ее помехоустойчивость без использования дополнительных средств защиты. Если же без использования таких средств обойтись не удастся, то их выбор и размещение обосновывается расчетами электромагнитных помех внутри корпуса. Так достигается экономия средств на изготовление аппаратуры СОБД не в ущерб ее помехоустойчивости.

Следовательно, предложенная методика зонирования может найти применение в практике разработки современных СОБД на железнодорожном транспорте.

Получено 10.02.2024

D. V. Komnatny. Procedure of zoning during development of microelectronic and microprocessor equipment of train safety control systems on railway transport.

The procedure of placement selection for units, sensitive to electromagnetic noise, in the case of train safety control systems equipment (zoning) is considered. The quantitative parameters for elementary volumes in the case, the dangerous zone and cases design are defined based on analysis of electromagnetic field energy distribution in elementary volumes inside the case. The methods of electromagnetic field energy calculations all over elementary volumes during the calculations in time or frequency domain are discussed. In common, the proposed procedure of zoning using the quantitative parameters for dangerous zones can reduce the mistake probability during the equipment development. Such this procedure allows to raise noise immunity of train safety control systems.

Автор выражает искреннюю благодарность магистру техн. наук И. О. Жегалину за большую помощь в создании рисунков к статье.

Список литературы

- 1 **Кравченко, В. И.** Грозозащита радиоэлектронных средств / В. И. Кравченко. – М. : Радио и связь, 1991. – 264 с.
- 2 **Стоян, Ю. Г.** Размещение источников физических полей / Ю. Г. Стоян, В. П. Путятин. – К. : Наукова думка, 1989. – 184 с.
- 3 **Стоян, Ю. Г.** Оптимизация технических систем с источниками физических полей / Ю. Г. Стоян, В. П. Путятин. – К : Наукова думка, 1988. – 192 с.
- 4 **Прищепенко, А. Б.** Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона / А. Б. Прищепенко. – М. : БИНОМ Лаборатория знаний, 2008. – 207 с.
- 5 **Князев, А. Д.** Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной техники с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, Б. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1989. – 224 с.
- 6 **Барнс, Дж.** Электронное конструирование. Методы борьбы с помехами / Дж. Барнс. – М. : Мир, 1990. – 238 с.
- 7 **Кечиев, Л. Н.** Электромагнитная несовместимость: опасности, катастрофы, риски / Л. Н. Кечиев. – М. : Грифон, 2022. – 344 с.
- 8 **Щербаков, С. С.** Новая модель износа / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 1. – С. 74–82.
- 9 **Седов, Л. И.** Механика сплошной среды : в 2 т. Т. 1 / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1970. – 492 с.
- 10 **Брон, О. Б.** Электромагнитное поле как вид материи / О. Б. Брон. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 260 с.
- 11 **Поливанов, К. М.** Теоретические основы электротехники : в 3 ч. / К. М. Поливанов. – М. : Энергия, 1969. – Ч. 3 : Теория электромагнитного поля. – 352 с.
- 12 **Фальковский, О. И.** Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 472 с.
- 13 **Ерофеев, В. Т.** Аналитическое моделирование в электродинамике / В. Т. Ерофеев, И. С. Козловская. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 304 с.
- 14 **Каплун, А. Б.** ANSYS в руках инженера. Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Шахраева. – М. : URSS. – 2021. – 272 с.
- 15 **Кулон, Ж.-Л.** САПР в электротехнике / Ж.-Л. Кулон, Ж. К. Сабоннадер. – М. : Мир, 1988. – 204 с.
- 16 **Курушин, А. А.** Проектирование СВЧ-устройств в среде GST Microwave Studio / А. А. Курушин, А. Н. Пластик. – М. : Издательство МЭИ, 2011. – 155 с.
- 17 **Бочков, К. А.** Элементы моделирования электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, Д. В. Комнатный. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 185 с.