

УДК 621.396.13

Модель определения параметров конструкции бортовой аппаратуры для обеспечения электромагнитной совместимости на основе многослойной нейронной сети**A model for determining the design parameters of on-board equipment for ensuring electromagnetic compatibility based on multilayer neural network****Сохен / Sokhen M.**

Михаил Юрьевич

(vka@mil.ru)

АО «Региональный центр защиты информации
«ФОРТ», генеральный директор.

г. Санкт-Петербург

Лоскутов / Loskutov A.

Андрей Иванович

(vka@mil.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

начальник кафедры телеметрических систем,

комплексной обработки и защиты информации.

г. Санкт-Петербург

Гусаков / Gusakov V.

Виктор Михайлович

(vka@mil.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

докторант кафедры передающих,

антенно-фидерных устройств и средств СЕВ.

г. Санкт-Петербург

Суручан / Suruchan M.

Михаил Юрьевич

(vka@mil.ru)

ВКА им. А. Ф. Можайского,

адъюнкт кафедры телеметрических систем,

комплексной обработки и защиты информации.

г. Санкт-Петербург

Якимов / Yakimov V.

Виктор Леонидович

(vka@mil.ru)

доктор технических наук, профессор.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

профессор кафедры космических радиотехнических

систем.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: электромагнитная совместимость – electromagnetic compatibility; электродинамическая модель – electrodynamic model; имитационная модель – simulation model; напряженность электрического поля – electric field strength; многослойная нейронная сеть – multilayer neural network.

Представлен анализ подходов к экранированию бортовой радиоэлектронной аппаратуры летательных аппаратов для обеспечения электромагнитной совместимости. Показано преимущество использования имитационного подхода к определению величины напряженности электрического поля. Проведен эксперимент имитационного электродинамического моделирования и определения напряженности электрического поля. Разработана модель определения напряженности электрического поля аппаратуры с использованием нейронной сети.

The paper presents an analysis of approaches to shielding onboard radio-electronic equipment of aircraft to ensure electromagnetic compatibility. The advantage of using a simulation approach to determining the magnitude of electric field strength is shown. An experiment of simulation electrodynamic modeling and determination of electric field strength is conducted. A model for determining the electric field strength of equipment using a neural network is developed.

Введение

Одним из требований, предъявляемых к конструкции бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) летательных аппаратов (ЛА), является требование по экранированию электромагнитного излучения и обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) всех радиоэлектронных средств на борту ЛА [1, 2].

Актуальность поиска новых методов и автоматизации расчета характеристик конструкций БРЭА, позволяющих обеспечить требуемый уровень экранирования БРЭА, связана со следующими причинами [3]:

- в среднем до 15 % массы всего ЛА приходится на экранирующие конструкции, что требует оптимизации конструкций БРЭА и поиска новых материалов;
- задача экранирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры часто требует индивидуального конструкторского решения с тщательным моделированием каждого устройства;
- при проектировании конструкций БРЭА с использованием средств электродинамического моделирования расчет экранирующих свойств является процессом итерационным и требует длительного времени;
- существуют трудности аналитического описания экранирующих свойств сложных конструкций БРЭА.

Из-за сложности вычисления эффективности экранирования разработчиками не всегда своевременно принимаются должные решения для обеспечения ЭМС устройств в целом, что в значительной мере увеличивает стоимость их разработки на конечном этапе проектирования [3].

Использование при проектировании БРЭА электродинамической модели позволит выявить влияние конструктивно-технологических параметров БРЭА на отношение сигнал/шум при различном удалении от аппаратуры, что может быть использовано при обеспечении ЭМС БРЭА на борту ЛА.

Различают два подхода к построению электродинамической модели: аналитический и имитационный. При рассмотрении аналитической модели необходимо теоретически описать прохождение электромагнитной

волны (ЭМВ) через экран [4, 5, 6]. Аналитические модели характеризуются следующими недостатками: не позволяют описывать сложные конструкции; могут быть использованы больше для качественной, чем количественной оценки характеристик поля; могут содержать аномальные искажения. В этой связи наиболее популярным подходом к построению электродинамических моделей стал имитационный подход с использованием специализированных программных пакетов (Ansys HFSS, MWO) [6, 7]. В свою очередь, включение имитационной модели в контур оптимизации параметров БРЭА при расчете ее параметров для обеспечения ЭМС ведет к значительному увеличению трудоемкости оптимизационной задачи и значительному увеличению времени ее решения, так как время однократного имитационного эксперимента может иметь продолжительность до одного часа и более, а в процессе оптимизации параметров БРЭА необходимо провести тысячи итераций процесса оптимизации.

Решением данной проблемы является аппроксимация нелинейных зависимостей, связывающих параметры БРЭА и параметры напряженности электрического поля на заданном удалении от аппаратуры, и полученных в результате имитационных экспериментов на основе использования многослойных нейронных сетей, включение которых в контур оптимизации параметров БРЭА на этапе проектирования позволит оперативно решать задачу поиска оптимальных с точки зрения ЭМС значений конструктивно-технологических параметров БРЭА.

Аналитическое описание прохождения электромагнитной волны через экранирующее устройство

Задача нахождения аналитического описания прохождения электромагнитной волны через экранирующее устройство сильно зависит от геометрии экрана и в общем случае не решена. Создание аналитической модели для конкретного экрана также часто невозможно или слишком трудоемко относительно решаемой задачи. В работе предлагается

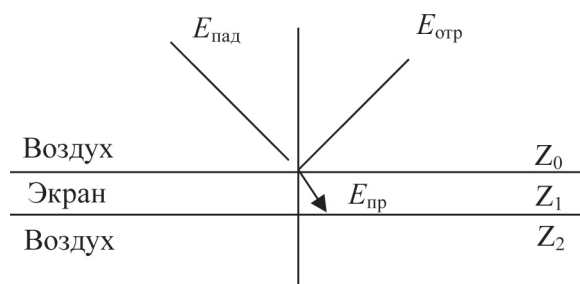


Рис. 1. Электродинамическая трехслойная модель металлического экрана

оценить толщину стенки экрана, представив его как трехслойное покрытие (рис. 1), в середине которого находится металлическая стенка экрана, а по краям воздушное пространство.

Решение задачи заключается в нахождении коэффициентов отражения и прохождения рассматриваемой модели [4]:

$$R = \frac{Z_{\text{ВХ}} - Z_0}{Z_{\text{ВХ}} + Z_0},$$

где Z_0 – волновое сопротивление верхнего слоя (воздуха); $Z_{\text{ВХ}}$ – эквивалентное входное сопротивление системы нижних слоев.

Расчет эквивалентного сопротивления осуществляется поэтапно от нижнего слоя к верхнему:

$$Z_{\text{ВХ}} = \frac{Z_{\text{ВХ_ПРЕД}} - iZ_{\text{В}} \operatorname{tg} k_{\text{В}} d_{\text{В}}}{Z_{\text{В}} - iZ_{\text{ВХ_ПРЕД}} \operatorname{tg} k_{\text{В}} d_{\text{В}}},$$

где $Z_{\text{В}}$ – волновое сопротивление верхнего слоя; $Z_{\text{ВХ}}$ – искомое эквивалентное входное сопротивление системы нижних слоев; $Z_{\text{ВХ_ПРЕД}}$ – эквивалентное входное сопротивление, рассчитанное на предыдущем этапе; $d_{\text{В}}$ – путь ЭМВ внутри текущего слоя диэлектрика, равный отношению его толщины к косинусу угла распространения волны; $k_{\text{В}}$ – волновое число.

На первой итерации значение $Z_{\text{ВХ_ПРЕД}}$ берется равным сопротивлению самого нижнего слоя.

Модуль волнового сопротивления металла рассчитывается по формуле [5]:

$$Z_{\text{металла}} = \sqrt{\frac{2\pi f \mu_0}{\sigma}},$$

где f – частота сигнала; σ – проводимость; μ_0 – магнитная проницаемость свободного пространства.

Также следует учесть, что при наклонном падении волновое сопротивление зависит от поляризации ЭМВ [4]:

$Z_{\text{нак}} = Z_{\text{ВХ}} / \cos \varphi$ для волны, вектор электрического поля которой перпендикулярен плоскости падения (нормальная или горизонтальная поляризация);

$Z_{\text{нак}} = Z_{\text{ВХ}} / \cos \varphi$ для волны, поляризованной в плоскости падения (вертикальная поляризация). Здесь φ – угол распространения электромагнитной волны в среде, в общем случае – комплексный, определяемый как отношение фазовых скоростей, точнее – фазовых коэффициентов падающей и прошедшей волн.

При наклонном падении для нахождения волновых сопротивлений необходимо знать угол распространения волны в слое, который рассчитывается через коэффициент преломления среды как отношение фазовых коэффициентов также итерационно от верхнего слоя к нижнему [4, 8]:

$$\sin \varphi_{\text{Н}} = \sin \varphi_{\text{В}} \cdot \frac{\beta_{\text{В}}}{\beta_{\text{Н}}},$$

где $\beta_{\text{В}}$, $\beta_{\text{Н}}$ – фазовые коэффициенты в верхнем и нижнем слоях. Для металлов фазовый коэффициент рассчитывается по формуле $\beta = \sqrt{\pi f \sigma \mu_{\text{мет}} \mu_0}$, а для воздуха по формуле $\beta = \frac{2\pi f}{c}$.

Таким образом, в общем случае процесс нахождения коэффициентов отражения и прохождения производится в два этапа – сначала от верхнего к нижнему слою находят углы распространения волны в каждом слое, а потом от нижнего к верхнему находят эквивалентные волновые сопротивления.

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента прохождения волны через экран из алюминия при его толщине: 1,5 мм (а), 1 мм (б); и 0,01 мм (в). Как видно из зависимостей, экранирующие свойства материала зависят от частоты. Так, даже при толщине алюминиевого экрана 1,5 мм коэффициент

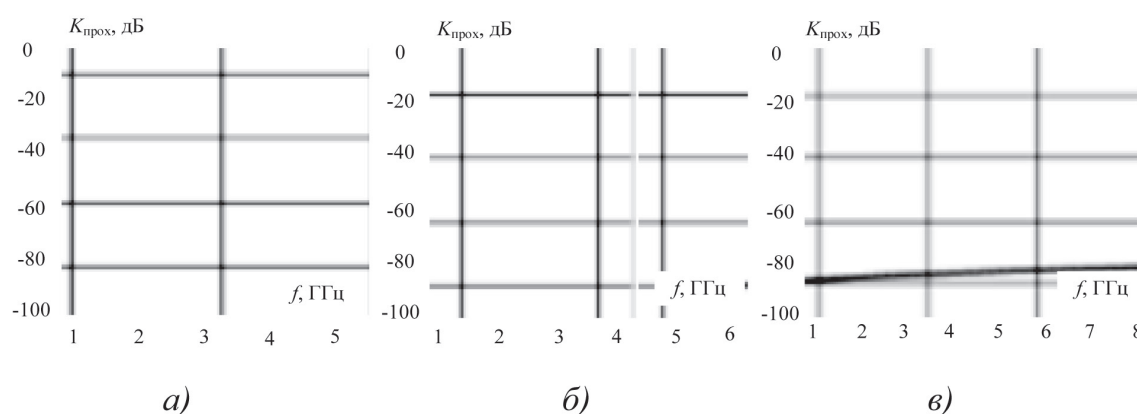


Рис. 2. Результаты аналитических расчетов прохождения ЭМВ через экран при различных его параметрах

прохождения на частотах до 1,5 ГГц составляет -40 дБ, что может быть критичным не только для высокочувствительных приёмников, но и для вычислительных устройств при рассогласовании передатчика с нагрузкой.

Рассмотренная модель экрана позволяет оценить требуемую толщину и материал, но не учитывает важные особенности конструкции БРЭА, например наличие разъемов и крышки корпуса с зазорами, которые могут являться источниками излучения, особенно если их размеры сопоставимы с длиной волны. В настоящее время для учета особенностей распространения ЭМВ внутри экрана перед испытаниями производятся расчеты в специализированных электродинамических пакетах.

Электромагнитная структура прототипа изделия БРЭА

Основными электронными компонентами типовой БРЭА является микропроцессор или микроконтроллер, флеш-память, микросхемы интерфейса ввода/вывода информации. При этом посадочные места данной

аппаратуры и дорожки на печатной плате устройства образуют частотно-избирательную цепь, излучающую электромагнитные колебания. На рис. 3а представлена обобщенная электромагнитная структура печатной платы и корпуса БРЭА без разъемов и крышки с портами для ввода/вывода информации И1, И2, И3. Предполагается, что внутри корпуса присутствует воздух (рис. 3б), печатная плата выполнена на основе стеклотекстолита FR4 (рис. 3в), внизу платы имеется медный экран, а сверху платы – резистивный слой (посадочные места для микросхем и дорожки) (рис. 3г).

Важными элементами представленной электромагнитной структуры являются разъемы и крышка корпуса. Это связано с тем, что в некоторых случаях при изготовлении корпуса БРЭА в местах соединения разъемов и крышки могут быть зазоры, которые могут значительно увеличить напряженность электрического поля вне корпуса изделия. На рис. 4 представлена модель корпуса изделия (рис. 4а), включающая разъемы и крышку (рис. 4б) и позволяющая задать конструктивно-технологический параметр – величину максимального зазора, обусловленного

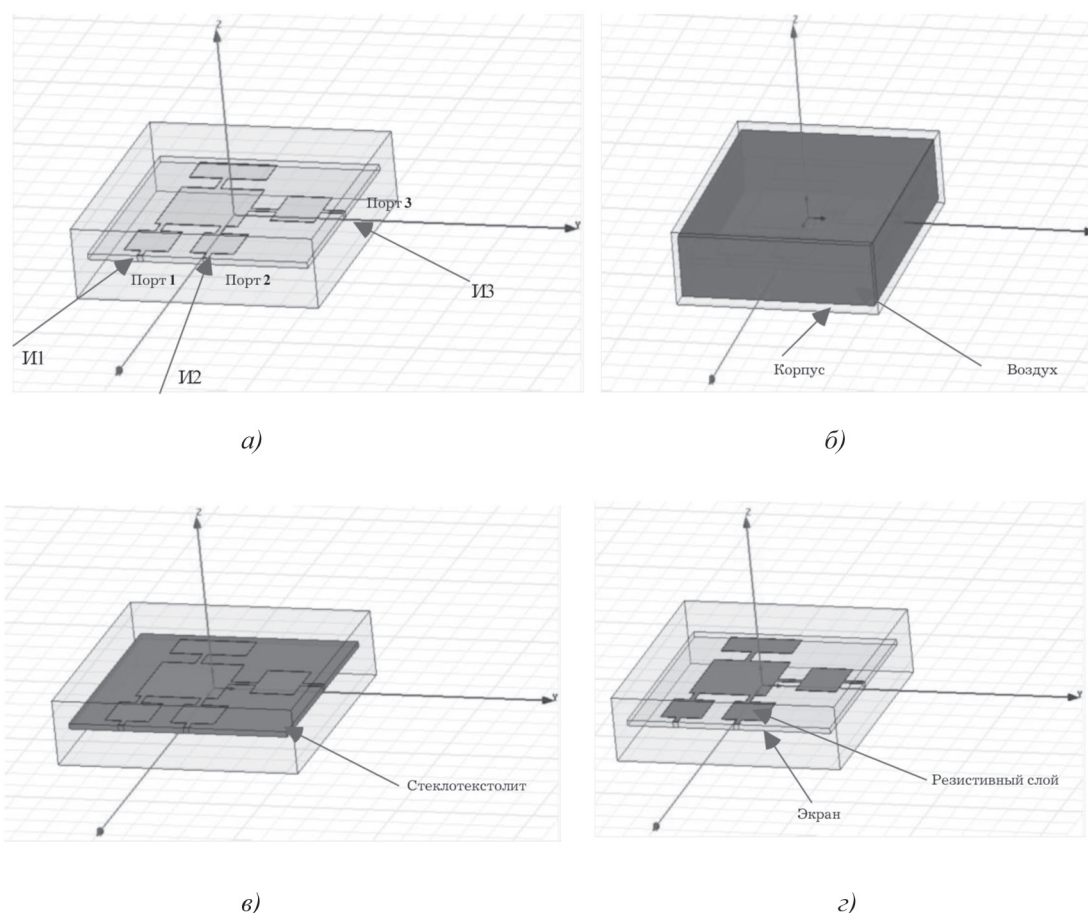


Рис. 3. Детализированное описание электромагнитной структуры прототипа изделия

погрешностью обработки материала при изготовлении корпуса изделия.

Основными параметрами предлагаемой электромагнитной структуры являются: общая компоновка изделия, габаритные размеры (ширина, высота, длина); материал корпуса; толщина корпуса; максимальный размер зазоров; энергопотребление; тип используемого материала корпуса (алюминий, графит, пластик (полиэстер)).

Оцениваемым параметром, необходимым для оценки ЭМС БРЭА, является напряженность электрического поля на заданном расстоянии от изделия.

Результаты имитационного электродинамического моделирования

Было проведено множество имитационных экспериментов по определению напряженности электрического поля на различном удалении от БРЭА для разработанного прототипа изделия. При моделировании фиксированными параметрами являлись следующие: выбранная компоновка БРЭА, габаритные размеры (ширина, высота, длина) и энергопотребление. Варьируемыми параметрами являлись следующие: материал корпуса ($M_{\text{крп}}$); толщина корпуса ($d_{\text{крп}}$); максимальный размер зазоров (Q); расстояние от изделия (r). При этом толщина корпуса варьировалась от 1 до 5 мм, величина зазора – от 0.01 до 0.002 мм, а расстояние от 0 до 50 см от центра изделия. Кроме того, на начальном этапе были определены частоты, на которых ослабление электромагнитной волны минимально при распространении в различных направлениях внутри корпуса изделия. Данные частоты (~2 ГГц) в дальнейшем были использованы как основные для электродинамического моделирования и были внесены в список не варьируемых параметров для исследуемой БРЭА.

В ходе имитационного моделирования была получена измерительная информация о величине напряженности электрического поля на различном удалении от изделия при заданных фиксированных и варьируемых параметрах.

На рис. 5 представлены результаты моделирования для случая электромагнитной структуры с разъемами и крышкой для корпуса из графита толщиной 2 мм в проекциях горизонтальной (рис. 5а) и вертикальной (рис. 5б) при величине зазора 2 мкм.

На рис. 6 представлены результаты моделирования для случая электромагнитной структуры с разъемами и крышкой для корпуса из алюминия толщиной 2 мм в проекциях горизонтальной (рис. 6а) и вертикальной (рис. 6б) при величине зазора 2 мкм.

На рис. 7 представлены результаты моделирования для случая электромагнитной структуры с разъемами и крышкой для корпуса из полиэстера толщиной 2 мм в проекциях горизонтальной (рис. 7а) и вертикальной (рис. 7б) при величине зазора 5 мкм.

На рис. 8 представлены зависимости максимальных значений напряженности электрического поля от расстояния до центра изделия для случая герметичного корпуса (зазор $\delta=0$) с толщиной стенок $d=1$ мм в проекциях горизонтальной (рис. 8а) и вертикальной (рис. 8б) для различных материалов: алюминия (кривая 1), графита (кривая 2), полиэстера (кривая 3).

С увеличением расстояния от центра корпуса максимальная напряженность поля вне изделия уменьшается пропорционально квадрату расстояния. Внутри корпуса распределение напряженности поля имеет более сложный характер.

На рис. 9 представлены зависимости максимальных значений напряженности электрического поля от толщины стенок корпуса d (рис. 9а) и от размера зазора корпуса δ (рис. 9б) из графита при различных

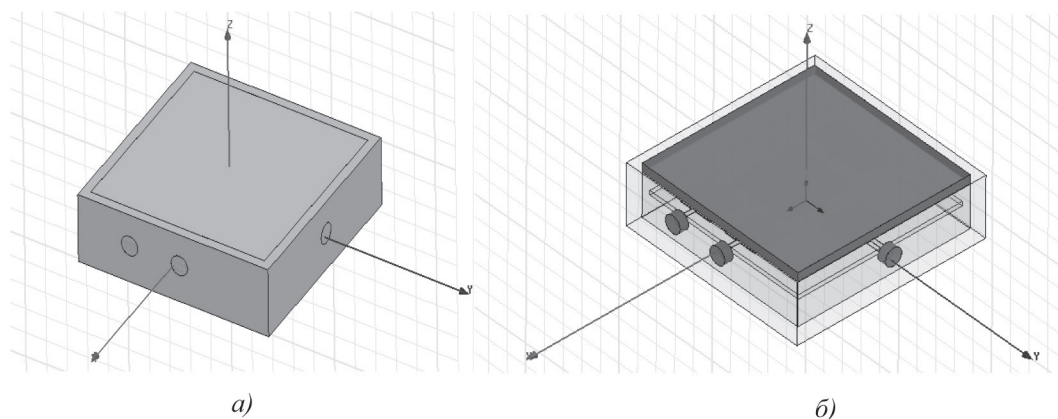


Рис. 4. Обобщенная электромагнитная структура изделия БРЭА

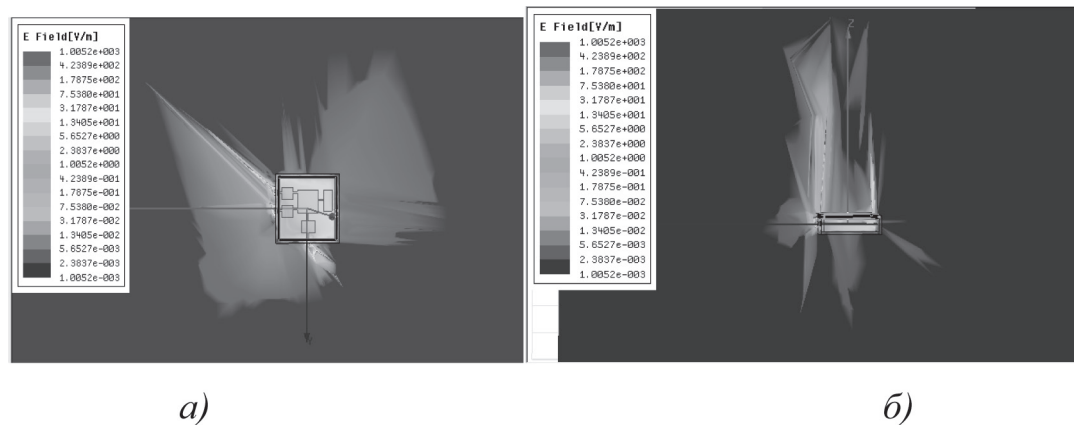


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля для корпуса из графита (2 мм) при величине зазора 2 мкм в различных проекциях

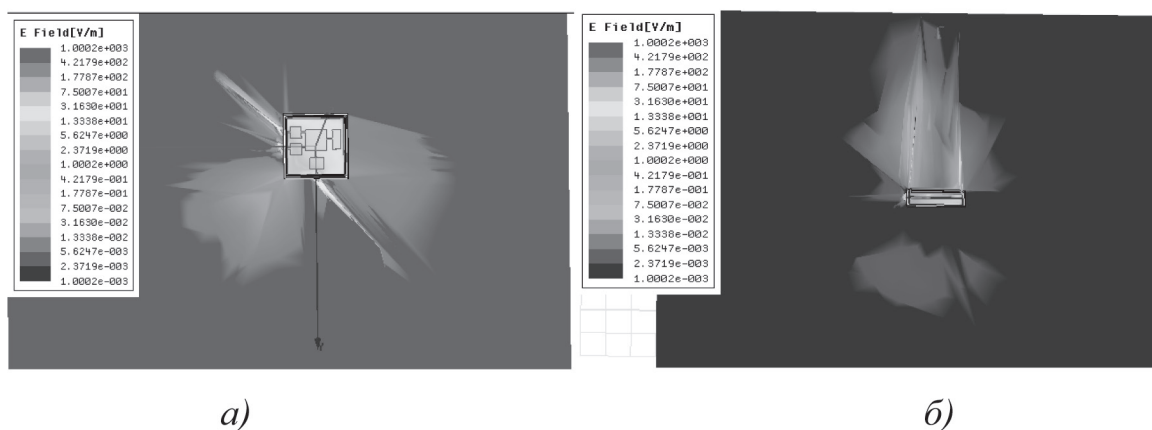


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля для корпуса из алюминия (2 мм) при величине зазора 2 мкм в различных проекциях

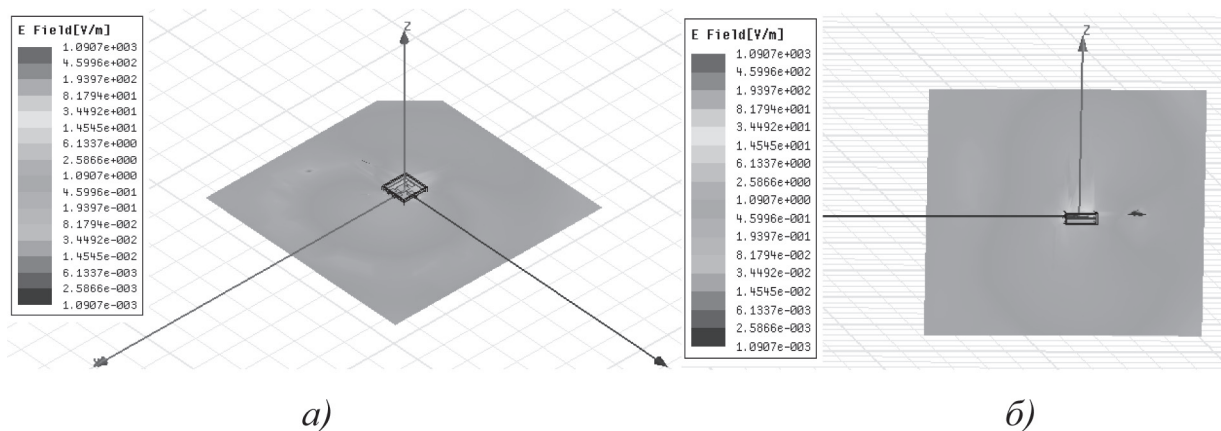


Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля для корпуса из полиэстера (2 мм) при величине зазора 5 мкм в различных проекциях

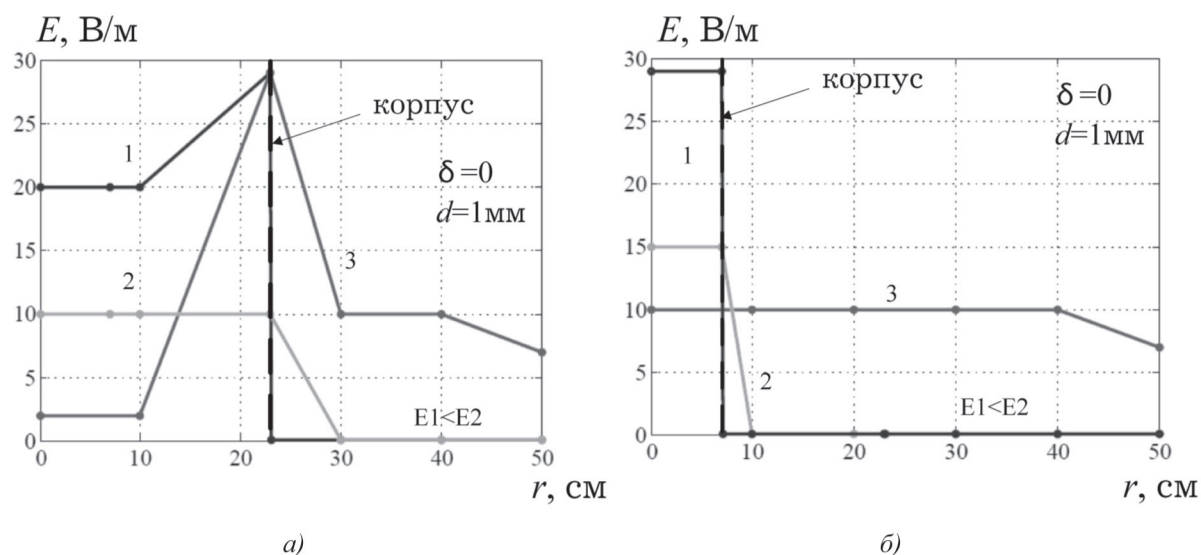


Рис. 8. Зависимости максимальных значений напряженности электрического поля от расстояния до центра изделия для горизонтальной (а) и вертикальной (б) проекций при герметичном корпусе

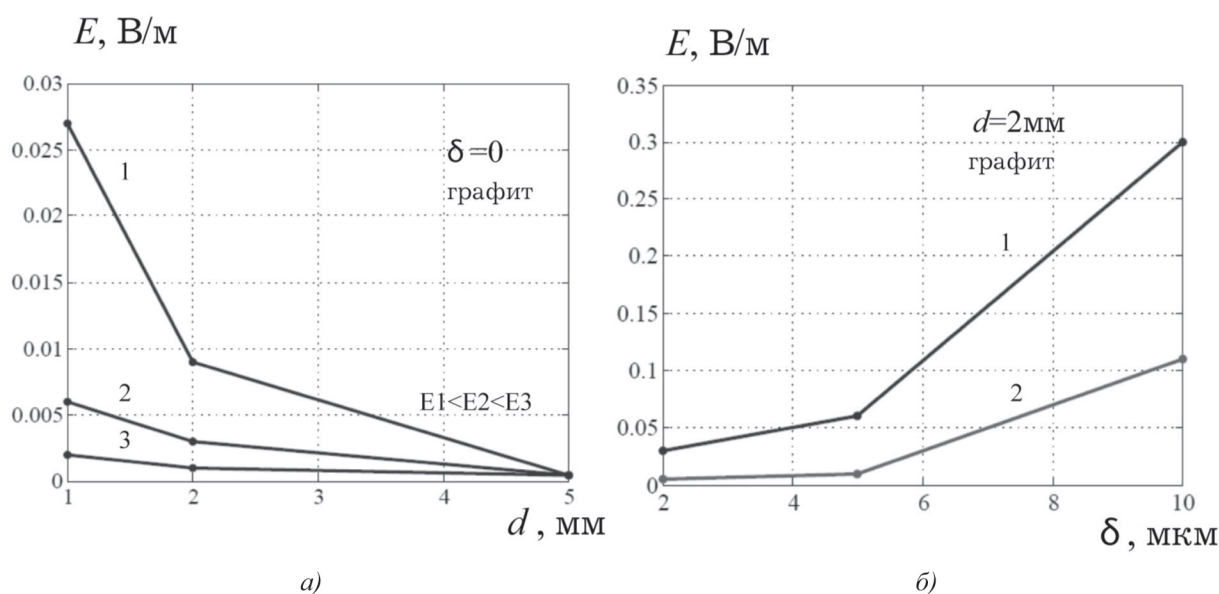


Рис. 9. Зависимости максимальных значений напряженности электрического поля от толщины стенок корпуса d (а) и от размера зазора корпуса δ (б) из графита при различных расстояниях до центра изделия

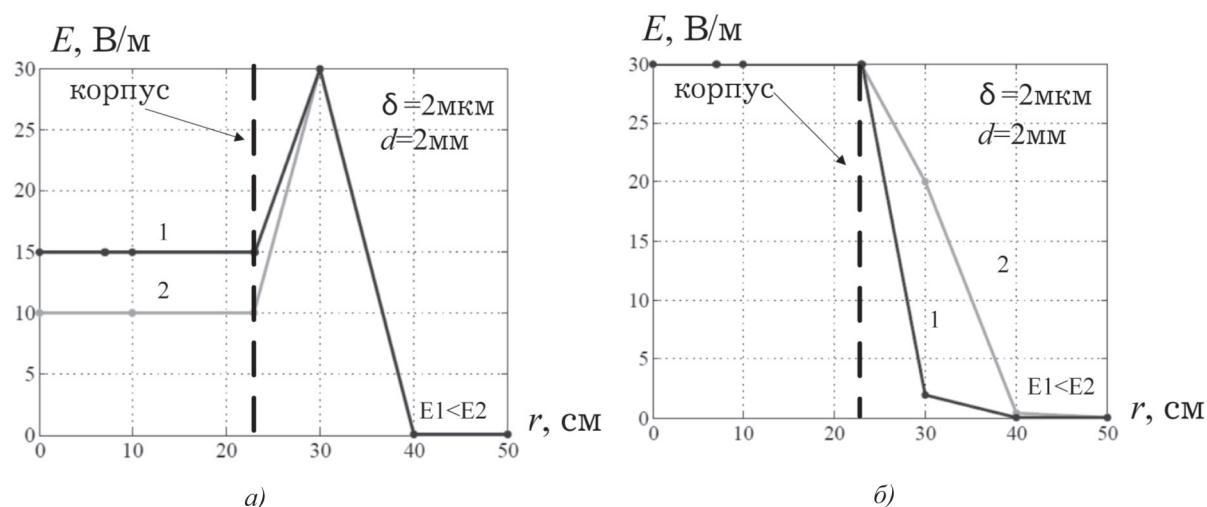


Рис. 10. Зависимости максимальных значений напряженности электрического поля от расстояния до центра изделия для горизонтальной (а) и вертикальной (б) проекций при негерметичном корпусе

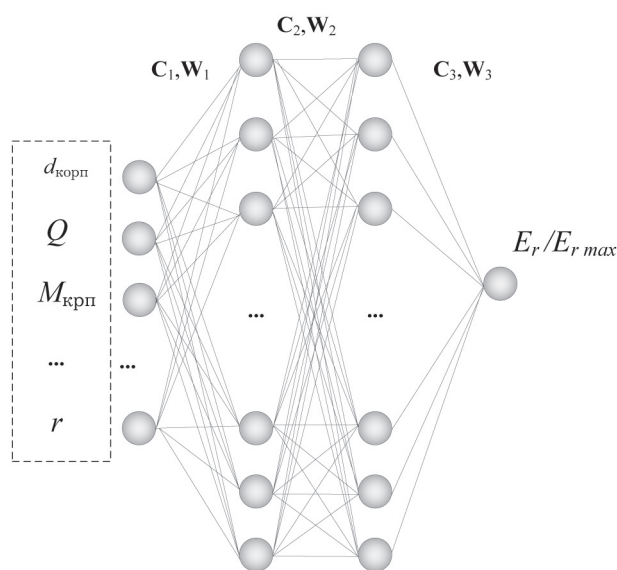


Рис. 11. Структурная схема многослойной нейронной сети для определения значения напряженности электрического поля на основе информации о параметрах конструкции БРЭА и расстояния от центра изделия

расстояниях до центра изделия: 30 см (кривая 1), 40 см (кривая 2), 50 см (кривая 3).

С увеличением толщины стенок корпуса напряженность поля вне изделия уменьшается экспоненциально. Негерметичность корпуса и увеличение зазора ведет к повышению напряженности поля вне корпуса.

На рис. 10 представлены зависимости максимальных значений напряженности электрического поля от расстояния до центра изделия для случая негерметичного корпуса (зазор $\delta=2$ мкм) с толщиной стенок $d=2$ мм в горизонтальной (рис. 10а) и вертикальной (рис. 10б) проекциях для следующих материалов: алюминия (кривая 1), графита (кривая 2).

Представленные зависимости позволяют сделать вывод о возможности аппроксимации результатов имитационного моделирования с использованием нелинейных моделей.

Результаты нейросетевого моделирования

В настоящее время наиболее эффективным подходом к решению задачи аппроксимации сложных нелинейных функций являются нейронные сети. На основании полученных результатов имитационных экспериментов была разработана нейросетевая модель, позволяющая определить значение напряженности электрического поля на основе информации о параметрах конструкции и удаленности от центра изделия. Структура модели многослойной нейронной сети представлена на рис. 11.

В качестве показателя эффективности решения задачи оценки параметра напряженности поля использована целевая функция, соответствующая среднеквадратическому значению погрешности определения напряженности электрического поля [8, 9]:

$$\sigma_r(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3, \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (E_{rn,k} - \hat{E}_{rn,k})^2}, \quad (1)$$

где M – количество значений параметров на проверочной или тестовой выборке; $E_{rn,k}, \hat{E}_{rn,k}$ – нормированные истинное и полученное с помощью нейронной сети значение напряженности электрического поля на проверочной или тестовой выборке; $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3, \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3$ – настраиваемые параметры многослойной нейронной сети.

При оценивании параметра напряженности электрического поля необходимо решить задачу оптимизации целевой функции σ_r :

$$(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3, \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3)^* = \arg \min_{\substack{\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3, \\ \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3}} \sigma_r \quad \left| \begin{array}{l} r=r_{\text{зад}}, \\ w=w_{\text{зад}}, h=h_{\text{зад}}, l=l_{\text{зад}}, \\ \lambda_c=\lambda_{c\text{зад}}, \\ \sigma_r \leq \sigma_{r\text{зад}} \end{array} \right., \quad (2)$$

где $(\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3, \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3)^*$ – набор оптимальных значений параметров нейросетевой модели;

$r_{\text{зад}}, h_{\text{зад}}, w_{\text{зад}}, l_{\text{зад}}, \lambda_{c\text{зад}}$ – заданные значения расстояния от изделия, габаритных размеров и энергопотребления РЭА, $\sigma_{r\text{зад}}$ – заданное среднеквадратическое значение погрешности определения напряженности электрического поля. При разработке нейросетевой модели было использовано два скрытых слоя, что вполне достаточно для достижения высокого качества обучения многослойной нейронной сети [10]. Для обучения многослойной нейронной сети все данные результатов имитационных экспериментов были разбиты на три выборки: обучающую, проверочную и тестовую. В процессе обучения на данных обучающей выборки осуществляется минимизация среднеквадратической погрешности определения значения напряженности электрического поля на обучающей и проверочной выборке. Обученная сеть, удовлетворяющая по точности определения напряженности электрического поля на данных тестовой выборки, используется в качестве искомой модели. В процессе обучения многослойной нейронной сети был использован алгоритм наискорейшего спуска [9].

На рис. 12 представлены зависимости погрешности обучения нейронной сети от цикла обучения (рис. 12а) и значений нормированной напряженности поля от номера примера на тестовой выборке (рис. 12б) при обучении нейронной сети на данных измерений внутри и вне корпуса изделия. При этом кривая 1 характеризует истинное значение нормированной напряженности поля, а кривая 2 – вычисленные значения нормированной напряженности поля по параметрам конструкции и заданному расстоянию от изделия.

На рис. 13 представлены зависимости погрешности обучения нейронной сети от цикла обучения (рис. 13а) и значений нормированной напряженности поля от номера примера на тестовой выборке (рис. 13б) при обучении нейронной сети на данных вне корпуса изделия.

Среднеквадратическая погрешность определения напряженности электрического поля на тестовой выборке для случая обучения сети на данных вне корпуса изделия получилась в 2 раза меньше, чем при обучении на всех данных (внутри и вне корпуса изделия), что связано с гораздо более сложным распределением электрического поля внутри корпуса изделия. В ходе моделирования было достигнуто значение среднеквадратической погрешности определения значений напряженности электрического поля для случая обучения нейронной сети на данных вне корпуса изделия на тестовой выборке, равное 0.06.

Заключение

Таким образом, в ходе исследований разработана имитационная электродинамическая модель БРЭА, позволяющая для выбранной компоновки, габаритных размеров корпуса, энергопотребления и наиболее опасных частот определить напряженность электрического поля вне корпуса на заданном

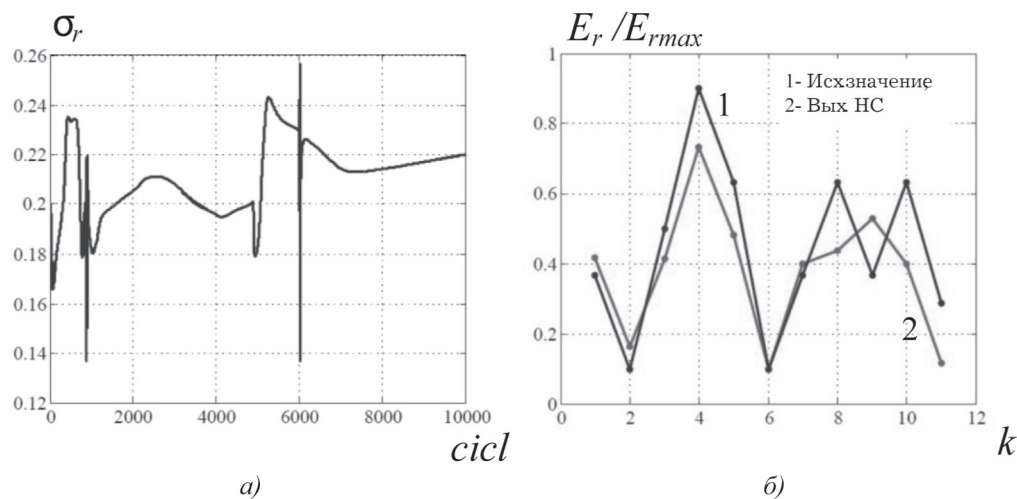


Рис. 12. Зависимости: а) среднеквадратической погрешности обучения нейронной сети от цикла обучения; б) значения нормированной напряженности электрического поля от номера примера на тестовой выборке

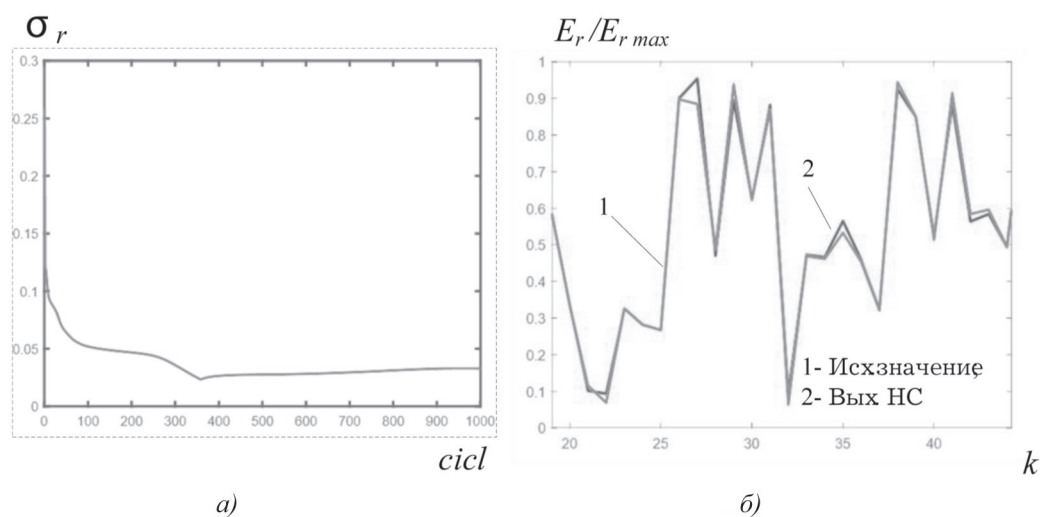


Рис. 13. Зависимости: а) среднеквадратической погрешности обучения нейронной сети от цикла обучения; б) значения нормированной напряженности поля от номера примера в тестовой выборке

удалении от изделия по значениям конструктивно-технологических параметров. На основе результатов имитационного моделирования разработана нейросетевая модель определения напряженности электрического поля по значениям конструктивно-технологических параметров БРЭА на заданном удалении. Преимуществом многослойной нейронной сети является высокая точность аппроксимации нелинейных зависимостей по данным имитационных экспериментов, высокая оперативность расчета и возможность генерации оценки напряженности электрического поля в случаях, которые не предъявлялись многослойной нейронной сети на этапе обучения, что является необходимым для ее использования на этапе многопараметрической оптимизации конструктивно-технологических параметров БРЭА при решении задачи ЭМС.

Литература

1. Полонский, Н. Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры / Н.Б. Полонский. – Москва : Советское радио, 1979. – 216 с.
2. Князев, А. Д. Конструирование радиоэлектронной и электронной вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. – Москва : Радио и связь, 1989. – 224 с.
3. Комнатнов, М. Е. Оценка эффективности экранирования корпуса соединителя бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Авиакосмическое приборостроение. – 2013. – № 4. – С. 37–42.
4. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – Москва : Наука, 1973. – 343 с.
5. Гольдштейн, Л. Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов. – Москва : Советское радио, 1971. – 664 с.
6. Алексейчик, Л. В. Решение комплексных мультифизических задач с помощью современных САПР СВЧ / Л.В. Алексейчик, А.А. Курушин // Информатизация инженерного образования : материалы VI Международной научно-практической конференции (Москва, 12–15 апреля 2022 г.). – Москва : Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2022. – С. 50–55.
7. Электродинамические расчеты в ANSYS HFSS под управлением программы, разработанной в MATLAB / И.А. Кузнецов, А.А. Курушин, А.Н. Грибанов [и др.] // Радиолокация и связь – перспективные технологии : материалы XVI Всероссийской молодежной научно-технической конференции (Москва, 06 декабря 2018 г.). – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Мир науки», 2018. – С. 76–81.
8. Гусаков, В. М. Обзор подходов к определению угла прохождения электромагнитной волны через границу воздух–диэлектрик с потерями / В.М. Гусаков, В.М. Москалев, В.И. Невзоров // СПБНТОРЭС : труды ежегодной НТК. – 2020. – № 1 (75). – С. 12–13.

9. Якимов, В. Л. Прогнозирование технического состояния малых космических аппаратов с использованием многослойных нейронных сетей / В.Л. Якимов, А.В. Назаров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2006. – Т. 49, № 1. – С. 7–12.

10. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – Москва : Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.