

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЧЕРЕЗ НЕОДНОРОДНОСТИ В КОРПУСЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПО ANSOFT HFSS

П. Я. Кундышев

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва

В настоящее время микроэлектронные изделия все больше интегрируются в технические средства (ТС). Развитие микроэлектронной базы, ее усложнение приводит к увеличению степени интеграции соответствующих элементов и к уменьшению их габаритных размеров. Соответственно, изменяются характеристики изделий: снижаются значения рабочих токов и напряжений и увеличиваются рабочие частоты. Эти обстоятельства создают условия, при которых возрастает вероятность уязвимости микроэлектроники при воздействии внешних преднамеренных источников электромагнитных полей. К настоящему моменту наиболее активно развивающимися технологиями преднамеренного электромагнитного воздействия на аппаратуру, включающую микроэлектронику, являются средства, сочетающие генерацию мощных электромагнитных импульсов с созданием частотных характеристик импульсов, сопоставимых с рабочими частотами функционирования микроэлектроники. Это так называемые технологии мощных микроволновых (ММВ) воздействий, в т. ч. сверхширокополосных электромагнитных импульсов (СШП ЭМИ). Одним из основных поражающих механизмов этих технологий является проникновение электромагнитной энергии внутрь экрана через всевозможные неоднородности в корпусе (щели, стыки, отверстия и т. п.).

Изделия ВНИИА традиционно оборудованы внешним корпусом, также играющим роль электромагнитного экрана. Если ранее входящие в состав изделий компоненты, находящиеся внутри корпуса, были слабо чувствительны к высокочастотным электромагнитным воздействиям, поскольку обладали большой инерционностью и низкими рабочими частотами, то к настоящему времени в связи с интеграцией компонентов, включающих микроэлектронику в состав изделия, возникает необходимость исследования и подтверждения электромагнитной стойкости аппаратуры, разработанной с применением высокоинтегрированной элементной базы.

Подтверждение стойкости аппаратуры к поражающим электромагнитным воздействиям во ВНИИА осуществляется преимущественно с применением расчетных методов, дающих приблизительные оценки. Экспериментальные исследования в силу трудоемкости и сложности материального обеспечения используются в меньшей степени.

К настоящему моменту появляется возможность компьютерного моделирования электромагнитных процессов (как дополнительного метода) с применением программ по решению фундаментальных уравнений Максвелла и полноволнового анализа электромагнитного поля. Спектр подобных программных продуктов является достаточно широким: от моделирования сугубо магнито- и электростатических проблем, решения низкочастотных полей, до решения высокочастотных полей как с применением упрощений и приближений, так и с полным решением этих уравнений. Отсюда вытекает необходимость рассмотрения особенностей и возможностей компьютерного моделирования воздействий электромагнитных полей на аппаратуру и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными и расчетными оценками.

В данной работе рассматривается возможность компьютерного моделирования процессов проникновения высокочастотного электромагнитного излучения сквозь неоднородности в корпусах и сравнение с теоретическими оценками.

Для этих целей был выбран программный продукт Ansoft HFSS [1–3] для моделирования сверхвысокочастотных (СВЧ) структур, реализующий расчетный метод конечных элементов (МКЭ) для моделирования трехмерных объектов. МКЭ в настоящее время является одним из наиболее точных методов компьютерного моделирования в применении к электромагнитным задачам. Данный метод основывается на разбиении построенной компьютерной модели на базисные конечные элементы. При задании условий на границах модели (так называемых граничных условий) и источников воздействия метод позволяет рассчитывать распределения электромагнитных полей непосредственно внутри модели. Программный комплекс содержит большую библиотеку источников воздействия (таких как энергетические порты, источники токов и напряжений, элементарные излучатели, электромагнитные волны и т. д.) и вариантов граничных условий – и, таким образом, предоставляет широкие возможности по моделированию высокочастотных электромагнитных процессов.

HFSS осуществляет разбиение модели на базисные элементы – тетраэдры, размеры которых ограничиваются величиной длины волны электромагнитного излучения, зависящей от частоты исходного воздействия (рис. 1).

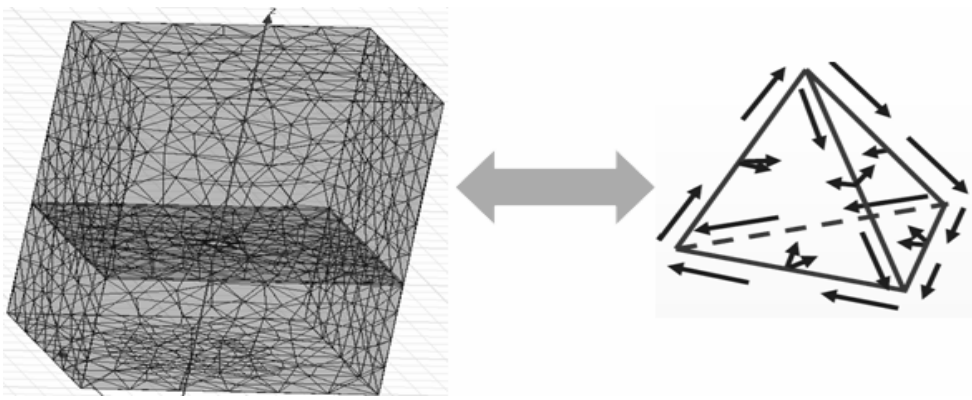


Рис. 1. Разбиение модели HFSS на базисные элементы. Расчет электромагнитных полей (тангенциальных и нормальных составляющих, как показано стрелками) производится на ребрах и гранях базисных элементов

При распространении плоской электромагнитной волны в Ansoft HFSS решается уравнение Максвелла в частотной области в виде

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla E(x, y) e^{-\gamma z} \right) - k_0^2 \varepsilon_r E(x, y) e^{-\gamma z} = 0, \quad (1)$$

где $E(x, y)$ – напряженность электрического поля; $\mu_r(x, y)$, $\varepsilon_r(x, y)$ – комплексная магнитная проницаемость и диэлектрическая проницаемость; k_0 – волновое число в свободном пространстве; γ – комплексный коэффициент распространения электромагнитной волны в среде.

При вычислении распределения электромагнитного поля во всей модели используется подход составления матриц, включающих в свой состав так называемые S -параметры, образуемые при раскладывании электрических и магнитных составляющих напряженностей полей в вид

$$E = \sum_{m=1}^K (a_m + b_m) e_m; \quad (2)$$

$$H = \sum_{m=1}^K (a_m - b_m) h_m, \quad (3)$$

где a_m, b_m – неизвестные комплексные коэффициенты падающих и отраженных электромагнитных полей; e_m, h_m – амплитуды электрических и магнитных напряженностей полей.

S -параметры, таким образом, имеют вид

$$S_{ij} = \left. \frac{b_i}{a_j} \right|_{a_{k=0, k \neq j}}. \quad (4)$$

В качестве исходной задачи для Ansoft HFSS было осуществлено моделирование процесса проникновения высокочастотного электромагнитного поля (ЭМП) 1 ГГц через металлический лист с простейшим круглым отверстием 2 см в диаметре и с щелью 2×400 мм (см. рис. 2). На границах исходных моделей были заданы границы из специального материала, имитирующего полное поглощение электромагнитной энергии на внешних границах. Источник в виде плоской волны был помещен на нижней грани моделируемого пространства.

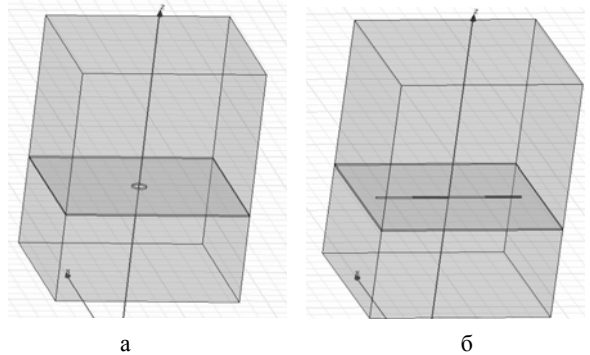


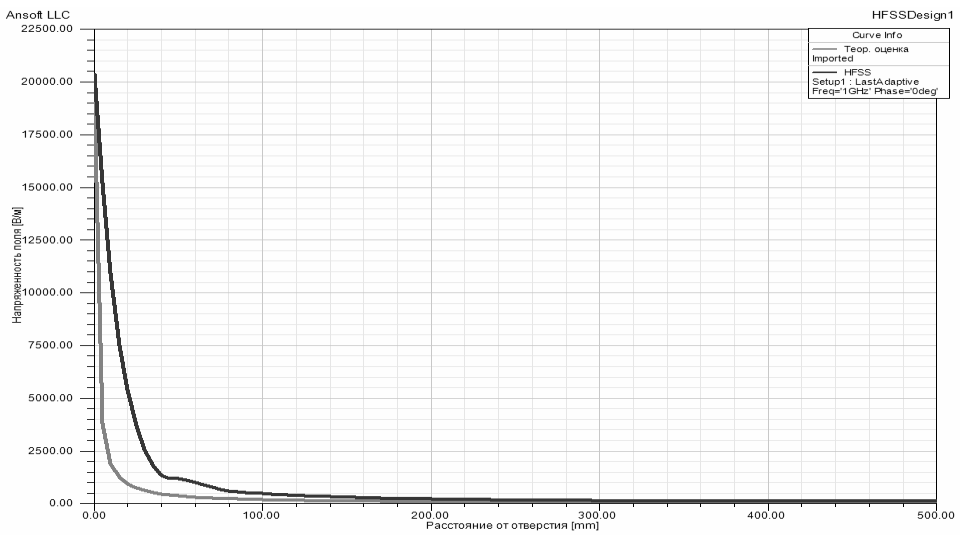
Рис. 2. Модель Ansoft HFSS: а – модель Al листа с отверстием 2 см в диаметре; б – модель Al листа с щелью 2×400 мм

Результаты моделирования электромагнитного воздействия выведены в виде графиков зависимостей напряженности поля $E(x)$ от расстояния на линии вдоль оси отверстия и геометрического центра щели, начиная непосредственно от отверстия и щели (см. рис. 3). На этом же графике приведена зависимость, полученная по теоретической расчетной формуле [4]

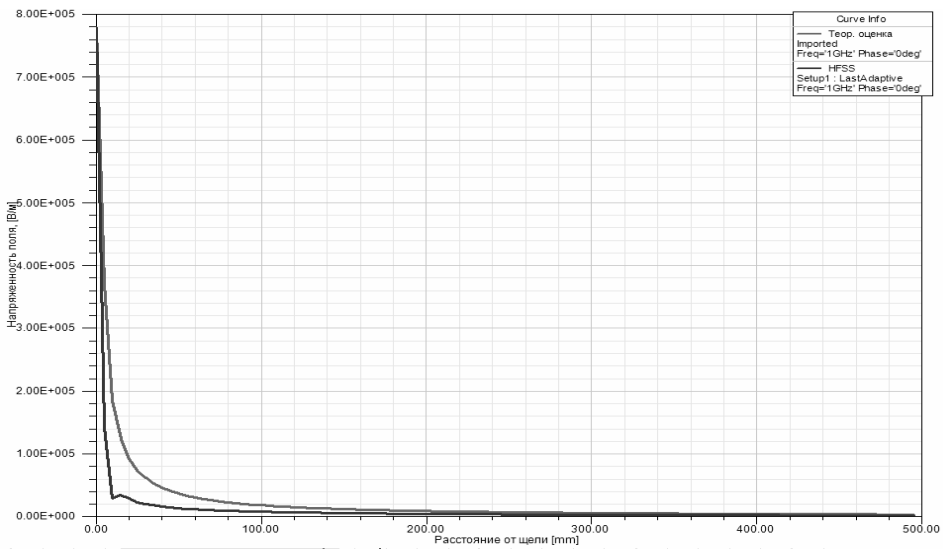
$$E_{ov.}(r) = ik \frac{E_0 S_{ov.}}{2\pi r} \sin(\theta) e^{-ikr}, \quad (5)$$

где k – волновое число в свободном пространстве; E_0 – исходная напряженность электрического поля; $S_{ov.}$ – площадь неоднородности (отверстия, щели); r – расстояние от отверстия; θ – угол по отношению к нормали, проведенной к плоскости неоднородности (отверстия, щели).

Результаты сравнения указывают на сходный характер убывания напряженности поля. Различия, однако, могут быть интерпретированы, с одной стороны, как низкими условиями разбиения модели на базисные элементы в HFSS, а с другой, как идеализация расчетной формулы, не учитывающей всех электрофизических свойств модели. Распределение ЭМП за металлическим листом в плоскостях перпендикулярно оси отверстия/щели указывает на наличие ярко выраженных максимумов напряженности поля в центре на оси отверстия/щели, которые с расстоянием сглаживаются и уменьшаются (рис. 4).

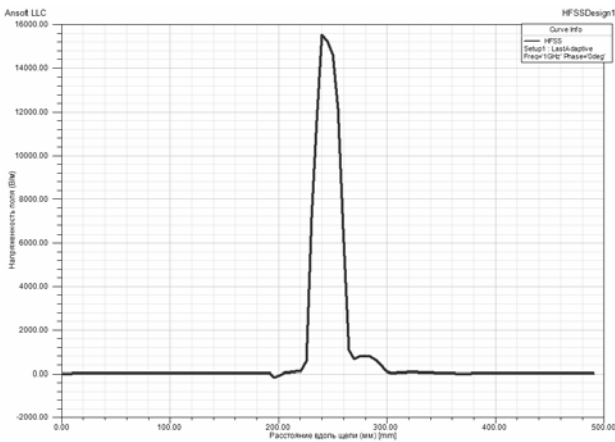


а

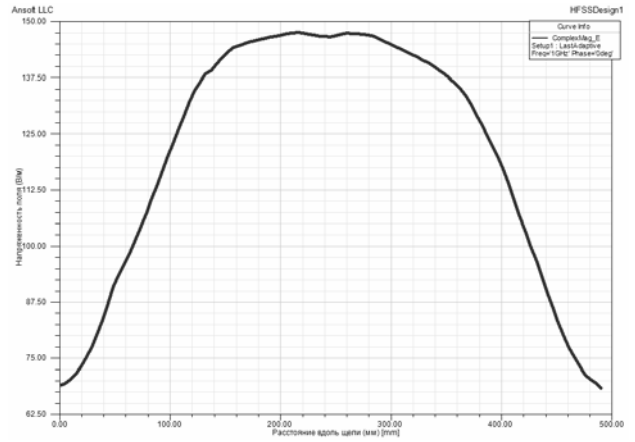


б

Рис. 3. График зависимости напряженности поля E от расстояния: а – на линии вдоль оси отверстия, б – на линии, проходящей через геометрический центр щели перпендикулярно ее плоскости.

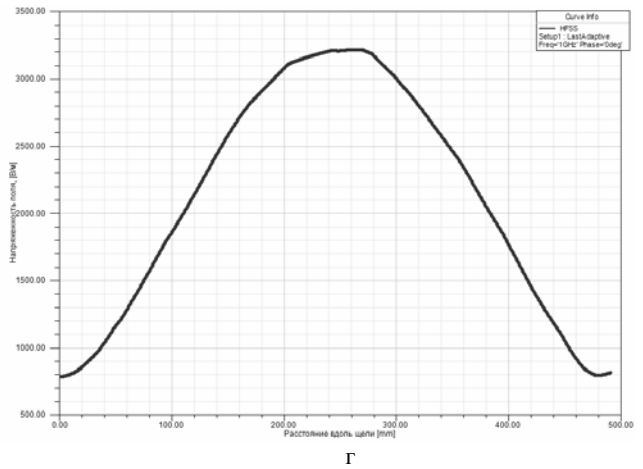
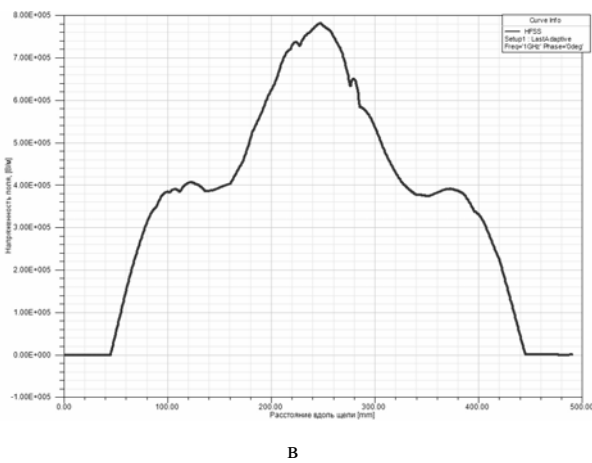


а



б

Рис. 4. Распределения электромагнитного поля за плоскостью экрана: а – на линии вдоль плоскости отверстия на плоскости экрана; б – на линии, параллельной плоскости отверстия, через 30 см от него; в – на линии вдоль плоскости щели на плоскости экрана; г – на линии, параллельной плоскости щели, через 30 см от щели



Окончание рис. 4

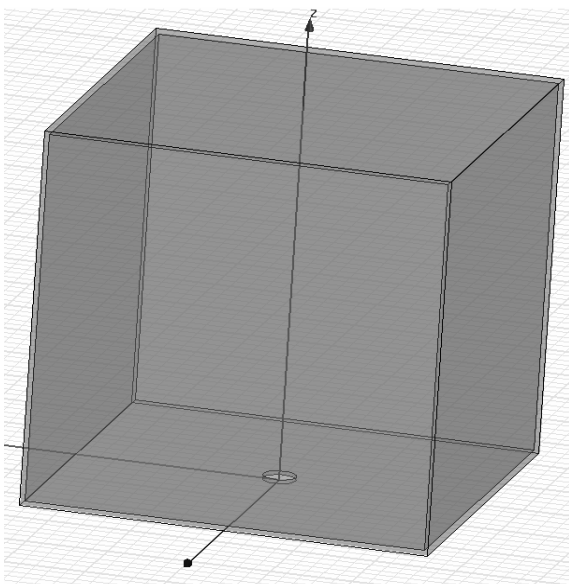
Далее было проведено моделирование прохождения ЭМП сквозь отверстие/щель в металлическом корпусе (см. рис. 5). Модель представляет собой полый Al корпус в виде куба с габаритами 50×50×50 см, толщиной стенок 0,5 см и отверстием 2 см в диаметре/щелью 2×400 мм, расположенными на нижней грани корпуса. Модель окружена воздушной средой. Источник воздействия – плоская волна, расположенная на крайней нижней грани, распространяющаяся с частотой 1 ГГц. На внешних границах модели – условия со специальным поглощающим электромагнитные волны материалом.

Результаты моделирования указывают на наличие локальных областей внутри корпуса с увеличением напряженности поля при одновременном удалении от отверстия/щели (рис. 6). Это свидетельствует о наличии резонансных явлений внутри корпуса, вызванных переотражениями проникающих электромагнитных волн внутри корпуса. Эти явления,

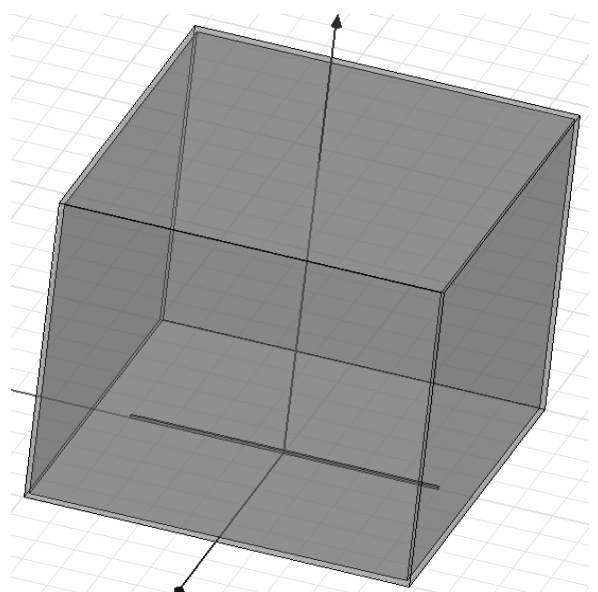
очевидно, характеризуются специфичностью геометрии корпуса при данных частотных воздействиях. Расчетная формула, характеризующая убыванием напряженности по экспоненциальной зависимости от расстояния, не учитывает этих влияний. Резонансный характер выявляется также и при рассмотрении распределения ЭМП за металлическим корпусом в плоскостях, расположенных параллельно плоскости отверстия/щели (рис. 7).

При увеличении частоты воздействия до 3 ГГц для той же конструкции резонансные явления становятся более отчетливыми (рис. 8).

При моделировании той же конструкции с внутренним заполнением корпуса из материала (полиэтилена) и в сравнении с вариантом без заполнения (рис. 9, 10) для того же частотного воздействия из графиков можно заключить о зависимости резонансных явлений внутри корпуса от находящегося внутри него материала.

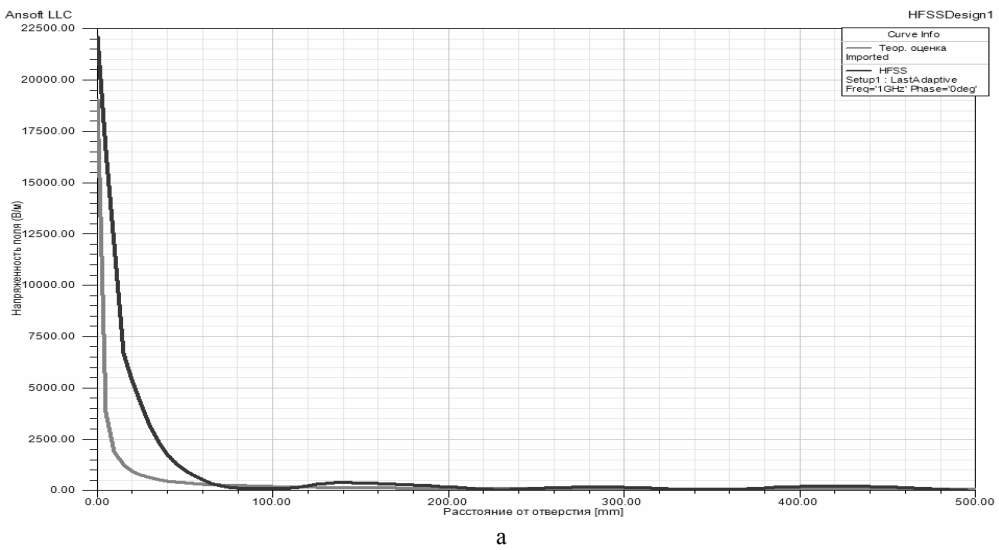


а

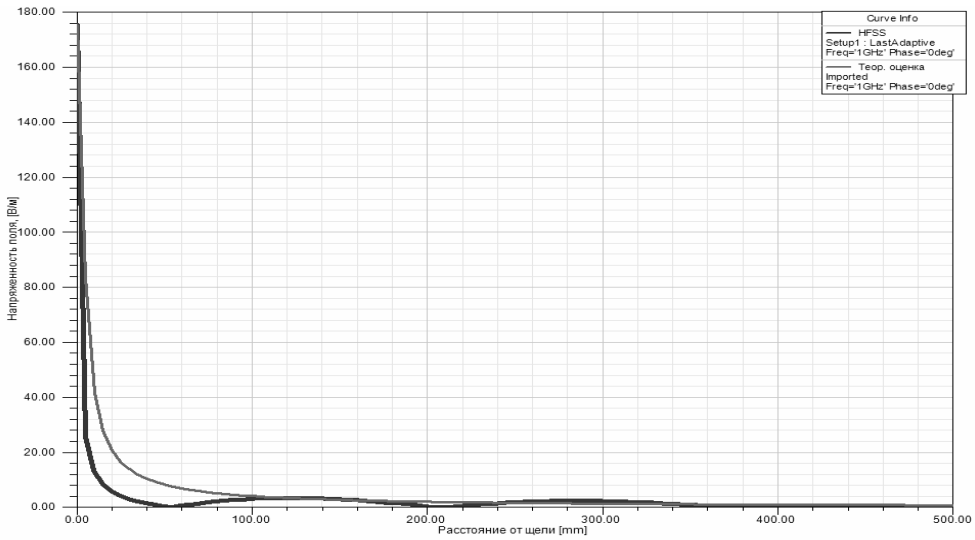


б

Рис. 5. Модель Ansoft HFSS: а – модель полого Al корпуса с отверстием 2 см в диаметре; б – модель полого Al корпуса с щелью 2×400 мм

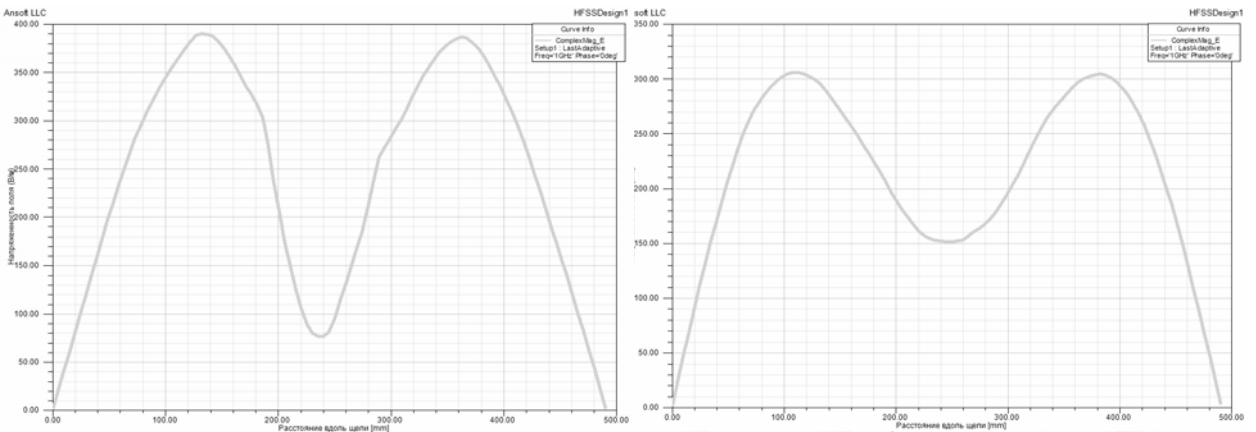


а



б

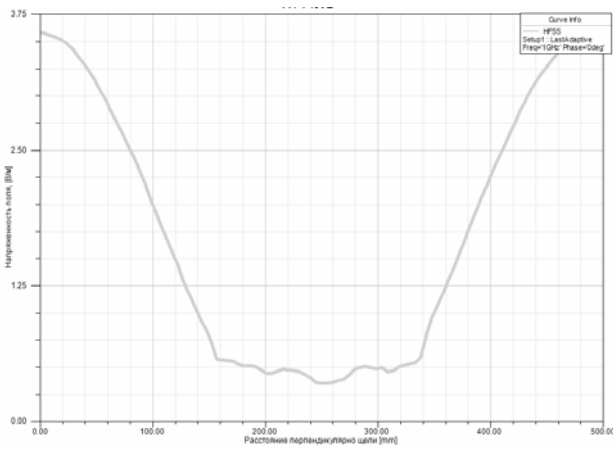
Рис. 6. График зависимости напряженности поля E от расстояния внутри корпуса при частоте воздействия 1 ГГц: а – на линии вдоль оси отверстия; б – на линии, проходящей через геометрический центр щели перпендикулярно ее плоскости



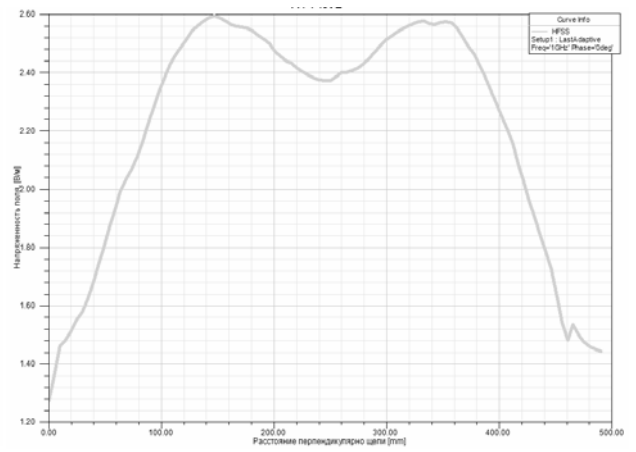
а

б

Рис. 7. Распределения электромагнитного поля за плоскостью корпуса: а – на линии, параллельной плоскости отверстия, через 10 см от него; б – на линии, параллельной плоскости отверстия, через 30 см от него; в – на линии, параллельной плоскости щели, через 10 см от нее; г – на линии, параллельной плоскости щели, через 30 см от нее

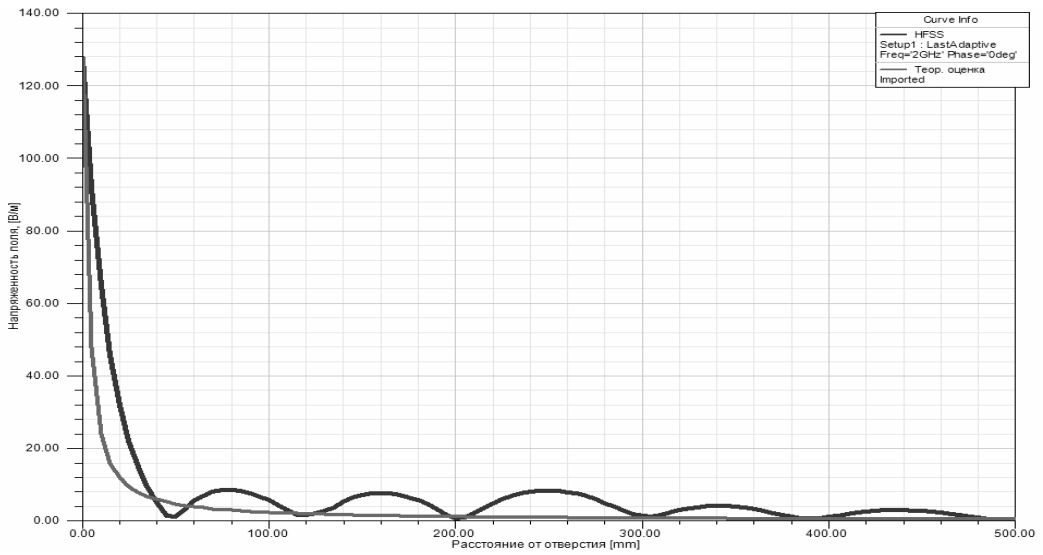


В

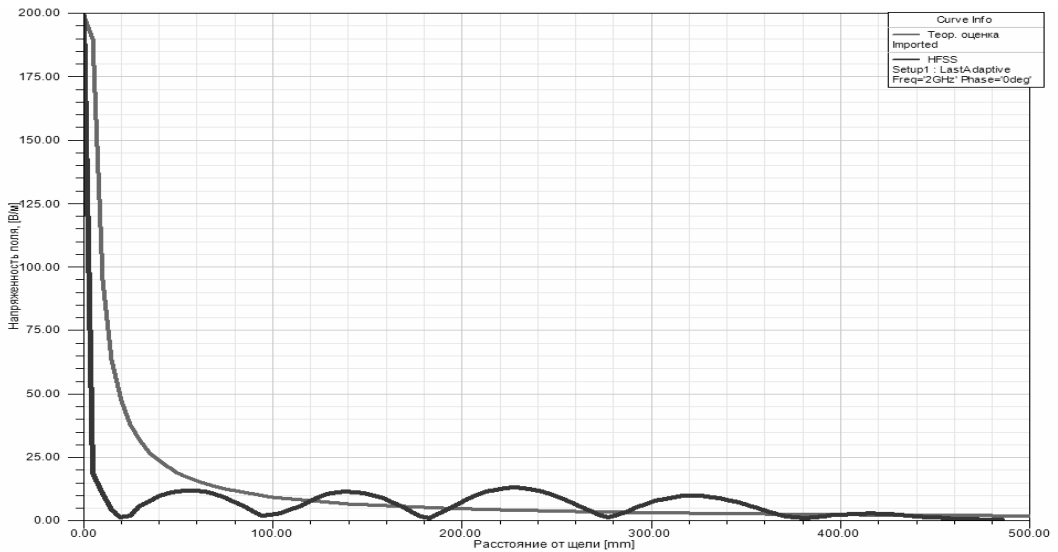


Г

Окончание рис. 7

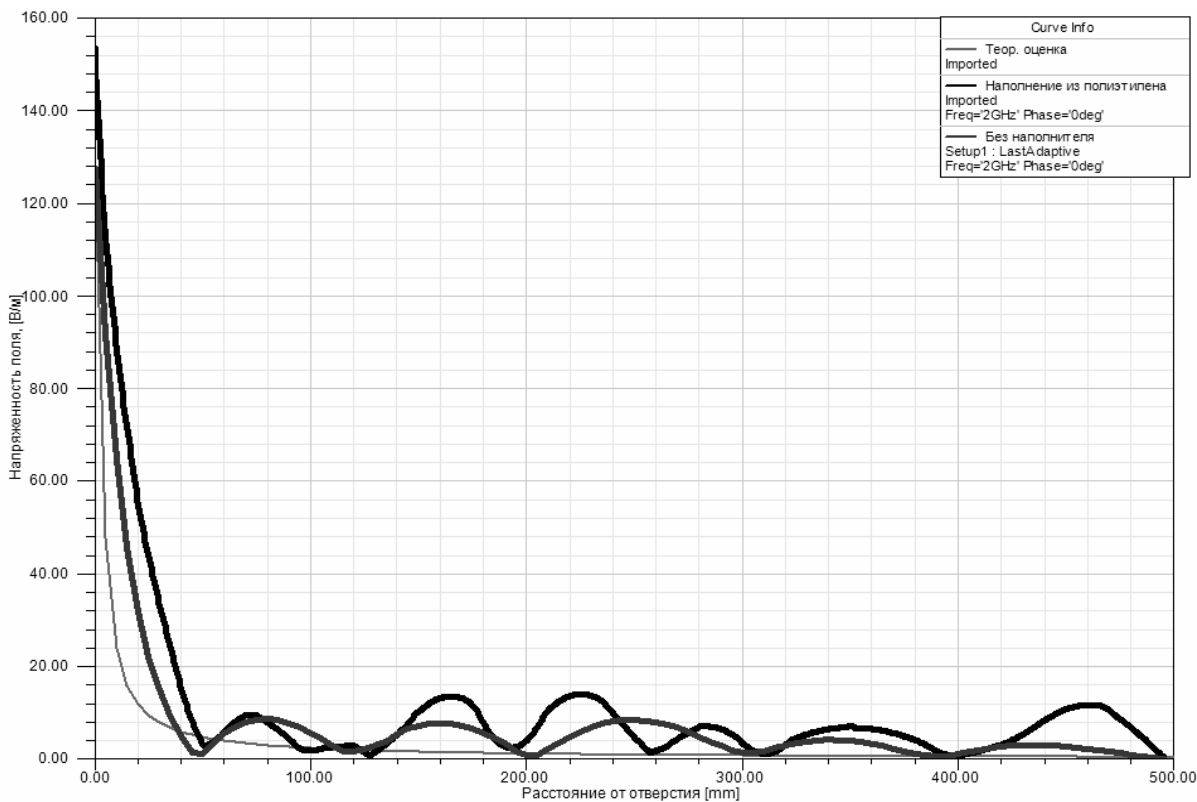


а

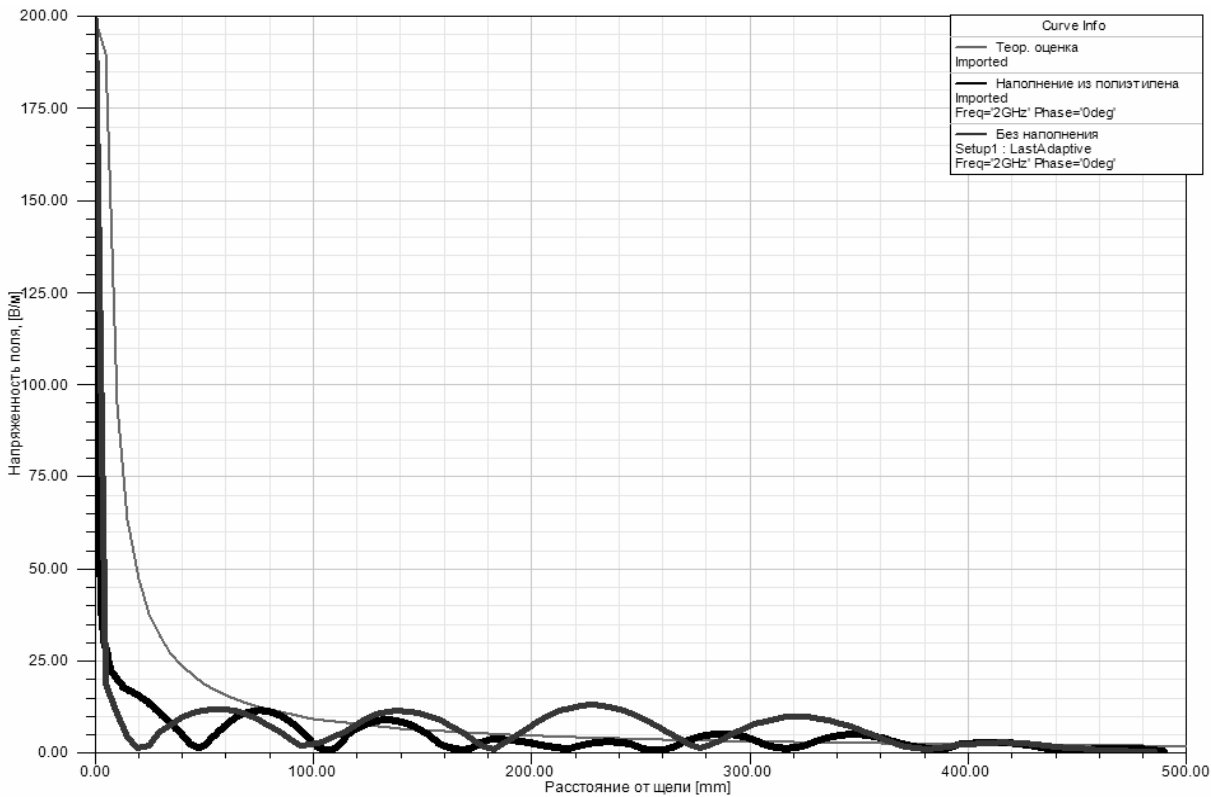


б

Рис. 8. График зависимости напряженности поля E от расстояния внутри корпуса при частоте воздействия 2 ГГц: а – на линии вдоль оси отверстия; б – на линии, проходящей через геометрический центр щели перпендикулярно ее плоскости

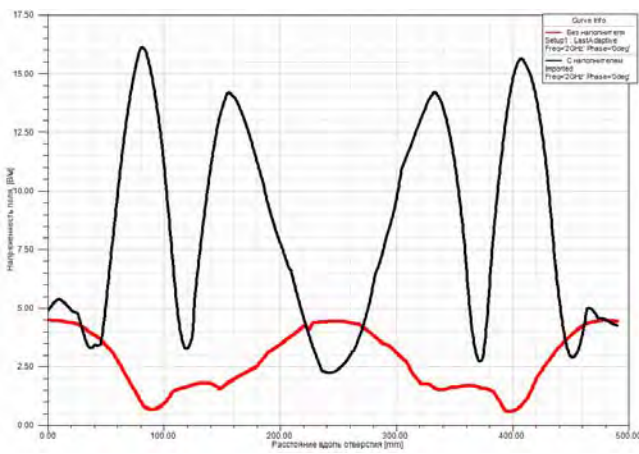


а

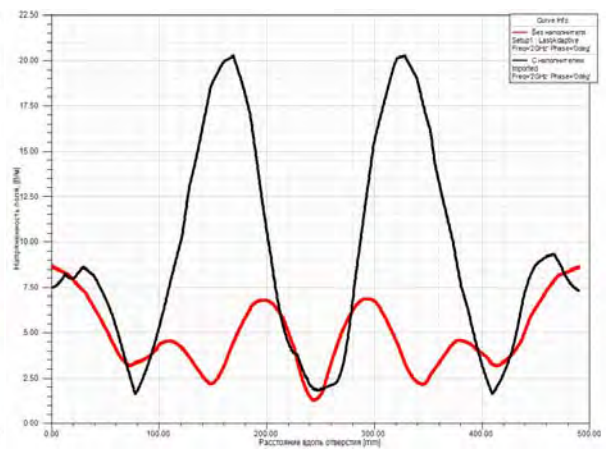


б

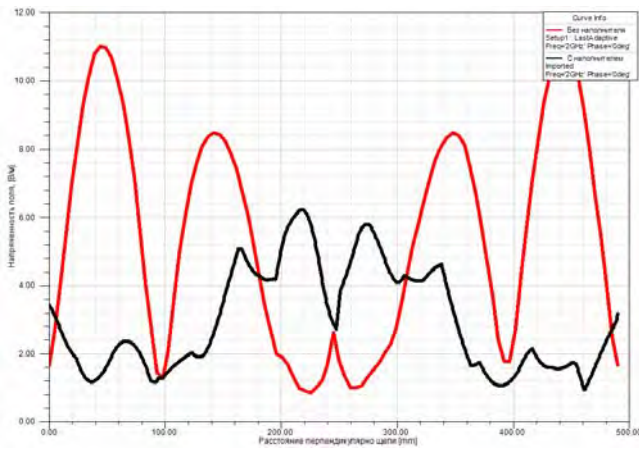
Рис. 9. График зависимости напряженности поля E от расстояния внутри корпуса при частоте воздействия 2 ГГц (конструкция с внутренним заполнением из полиэтилена и без заполнения): а – на линии вдоль оси отверстия; б – на линии, проходящей через геометрический центр щели перпендикулярно ее плоскости



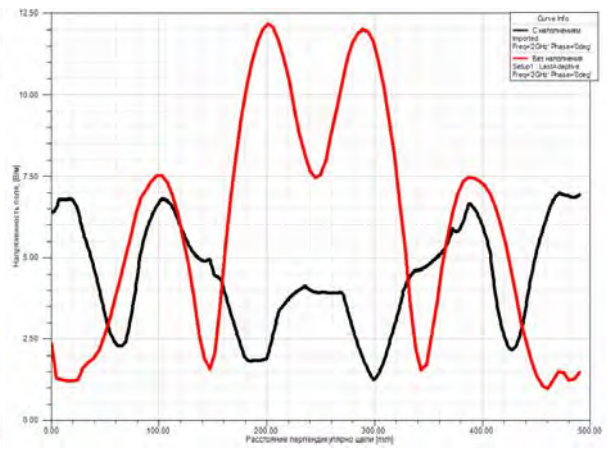
а



б



в



г

Рис. 10. Распределения электромагнитного поля за плоскостью корпуса (конструкция с внутренним заполнением и без заполнения): а – на линии, параллельной плоскости отверстия, через 10 см от него; б – на линии, параллельной плоскости отверстия через 30 см от него; в – на линии, параллельной плоскости щели, через 10 см от нее; г – на линии, параллельной плоскости щели, через 30 см от нее

Использованный при проведении расчетов программный продукт HFSS предоставляет широкие возможности при моделировании высокочастотных электромагнитных воздействий для объектов сложной формы, в т. ч. с неоднородностями. Учет геометрии объектов необходим, поскольку от реальных размеров объекта зависят его резонансные свойства, которые должны учитываться при конструировании аппаратуры для обеспечения ее помехоустойчивости.

Рассмотренные в работе современные возможности компьютерного моделирования процессов проникновения электромагнитного излучения через неоднородности в защитном экране металлические корпуса, позволяют получить качественно отличающийся результат: выявление резонансов внутри замкнутых объемов, которые могут стать причиной отказов аппаратуры, содержащей высокоинтегрированную элементную базу, потенциально чувствительную к сверхвысокочастотным электромагнит-

ным воздействия. Сравнение результатов моделирования с упрощенными оценочными расчетными подтверждает достоверность моделирования.

Литература

1. Банков С. Е., Курушин А. А., Разевиг В. Д. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью Ansoft HFSS. М.: ЗАО «НПП "Родник"», 2004.
2. Банков С. Е., Курушин А. А. Расчет и анализ СВЧ структур при помощи Ansoft HFSS. М.: ЗАО «НПП "Родник"», 2009.
3. Банков С. Е., Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS. М.: ЗАО «НПП "Родник"», 2009.
4. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. М.: Советское радио, 1971.