

А. Ю. СКОБЛИКОВ, аспирант, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ГИБРИДНОГО МЕТОДА ПРИ РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВНУТРИ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНА

В статье наведено порівняльний аналіз гібридного методу розрахунку напруженості електричного поля, що проникає всередину полого тонкостінного електромагнітного екрану, що має структурні неоднорідності типів «отвір довільної форми» та «щілина». Досліджено точність розрахунку напруженості електричного поля для різних зон внутрішнього об'єму електромагнітного екрану. Досліджено фактори, що обумовлюють похибку розрахунку напруженості електричного поля гібридним методом. Встановлені межі застосовності гібридного методу.

The comparative analysis of the hybrid method for estimating electric field, penetrating a thin-wall electromagnetic shield with «orifice of arbitrary shape» and «chink» structural inhomogeneities is presented in the article. The accuracy of electric field estimation in different zones of the inner space of an inhomogeneous electromagnetic shield is studied. The sources and the level of the error in estimation of electric field with the hybrid method are figured out. The limit of the hybrid method applicability is defined.

Введение. Степень структурной неоднородности электромагнитных экранов является одним из основных факторов, определяющих эффективность их применения для защиты радиоэлектронного оборудования (РЭО) от воздействия мощных электромагнитных полей (МЭМП) [1-4]. Реальные структурные неоднородности принято классифицировать в различные группы: отверстия произвольной формы, щели, сварные швы, системы отверстий (решетки). Такой подход позволяет использовать индивидуальные методы расчета влияния на защитные характеристики экрана каждой из групп неоднородностей, за счет чего повысить точность оценки проникающего электромагнитного поля с помощью аналитических методик.

Наиболее распространенными, а также вызывающими наиболее существенное ухудшение защитных свойств экрана в квазистационарном приближении являются отверстия произвольной формы и щели, рассмотрению которых посвящена данная статья. Их размер, форма, взаимное расположение, а также ориентация по отношению к векторам электрического и магнитного полей внешней помехи оказывают существенное влияние на защитные качества корпуса-экрана.

Условие квазистационарности предполагает, что длина волны воздействующего МЭМП существенно превышает линейные размеры исследуемого экрана. Так для электромагнитного поля, сопровождающего разряд молнии, условия квазистационарности выполняются для экранов, линейные размеры которых не превышают 50 м. В квазистационарном приближении корректным является независимое рассмотрение электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля. В рамках данной статьи рассматривается только электрическая составляющая МЭМП, воздействующая на корпус-экран.

Следует отметить, что для реальных электромагнитных экранов полностью избежать неоднородностей в их структуре, как правило, не удается, по-

скольку при проектировании экрана необходимо предусматривать отверстия для органов индикации и управления, вентиляционные отверстия и т. д. Кроме того, в течение термина эксплуатации экрана в его структуре также могут появляться дополнительные неоднородности, вызванные естественным старением проводящего материала, а также возможными механическими воздействиями.

Учитывая перечисленные особенности проектирования и эксплуатации электромагнитных экранов, необходимо уже на этапе разработки максимально точно оценивать не только интегральную защитную характеристику экрана – коэффициент экранирования, но и трехмерный профиль внутри экранируемой области с заданным допустимым уровнем напряженности проникающего поля, что является важным для эффективной компоновки РЭО внутри корпуса экрана. Создание для этой цели серии образцов с их последующим тестированием является достаточно неудобным и затратным решением — в качестве альтернативного подхода зачастую применяется математическое моделирование, которое позволяет существенно сократить сроки и стоимость разработки корпусов-экранов.

На сегодняшний день существует достаточно большое число методов, предназначенных для расчета защитных свойств электромагнитного экрана, которые принято классифицировать в две группы: аналитические [5,6] и численные [7-9]. Методы, принадлежащие к каждой из двух групп, имеют типичные преимущества и недостатки. Ранее было показано [10], что основные преимущества численных и аналитических методов могут быть объединены в гибридном методе. Экспериментально подтверждено [11], что гибридный метод позволяет получать результат, погрешность которого лежит в пределах 20 % по отношению к результатам измерений. Причем, гибридный метод дает стабильное завышение для центральной части внутреннего объема проводящего экрана. Данный вывод сделан на основании сравнения результатов в двух точках, находящихся в дальней зоне неоднородностей различной формы, имеющихся в структуре макета РКТ. В дополнение к экспериментальной оценке, проведенной ранее, в данной статье приводится сравнительный анализ результатов вычисления напряженности проникающего электрического поля помехи гибридным и численными методами. Сравнительный анализ, приведенный в данной статье, носит более подробный характер и исследует влияние на распределение точности результата во внутреннем пространстве экрана таких факторов как форма экрана, форма неоднородности, а также ориентация неоднородности по отношению к вектору напряженности электрического поля.

Цель статьи – исследовать применимость гибридного метода для расчета напряженности проникающего электрического поля в различных областях внутреннего пространства корпуса-экрана, имеющего структурные неоднородности типов «отверстие произвольной формы», «щель».

1. Математическая модель. Расчет напряженности проникающего электрического поля гибридным методом происходит в два этапа [10]:

С помощью метода конечных элементов (FEM), определяется напряженность электрического поля помехи на поверхности эквивалентного однородного экрана произвольной формы в точке, совпадающей с центром реальной неоднородности (рис. 1).

Выполняется расчет напряженности электрического поля в произвольной точке внутри экрана с помощью аналитической методики замены реальных структурных неоднородностей экрана эквивалентными эллиптическими отверстиями [12].

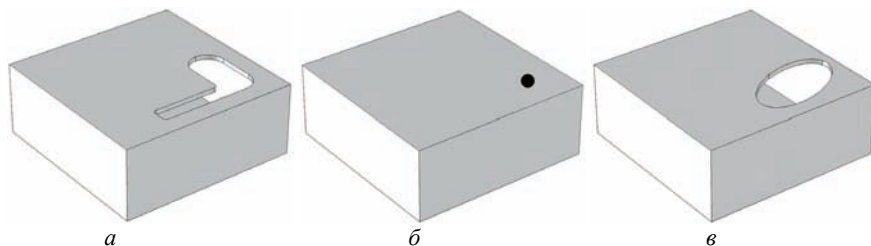


Рисунок 1 – Замена реальной неоднородности электромагнитного экрана, эквивалентным эллиптическим отверстием (*a* – реальная неоднородность корпуса, *б* – эквивалентный однородный корпус, точка совпадает с геометрическим центром реальной неоднородности экрана, *в* – эквивалентное эллиптическое отверстие)

Применение аналитической методики для расчета напряженности проникающего электрического поля позволяет существенно снизить требования к объему вычислительных ресурсов, а также сократить время, затрачиваемое на создание и расчет модели. Расчет напряженности электрического поля в каждой из контрольных точек внутри электромагнитного экрана, для *i*-той структурной неоднородности типа «отверстие произвольной формы» или «щель», осуществляется по следующей формуле [12]:

$$E_r^i = \frac{E_0}{2E(k)} \left\{ E(\varphi, k) - \frac{r \cdot a}{\sqrt{(r^2 + a^2)(r^2 + b^2)}} \right\} e^{-ad}, \quad (1)$$

где E_0 – значение модуля вектора напряженности электрического поля в точке, совпадающей с центром эквивалентного эллиптического отверстия (в точке с координатами X_i, Y_i, Z_i), в предположении, что экран является однородным (рис. 1. б); $E(\varphi, k), E(k)$ – неполный и полный эллиптические интегралы второго рода; φ – аргумент эллиптического интеграла; k^2 – модуль эллиптического интеграла; r – расстояние от центра *i*-той неоднородности до текущей рассматриваемой точки внутри экранируемой области; a – большая полуось эквивалентного эллиптического отверстия; b – малая полуось эквивалентного эллиптического отверстия; α – декремент затухания электрического поля; d – толщина экрана в районе отверстия, либо длина специальной экранирующей насадки.

При расчете в контрольной точке напряженности поля, проникающего через несколько неоднородностей используется следующая формула:

$$E_j = \sum_{i=1}^N E_r^i, \quad (2)$$

где E_j – напряженность электрического поля в j -той рассматриваемой точке внутри экранируемой области; N – количество рассматриваемых структурных неоднородностей экрана; E_r^i – модуль вектора напряженности электрического поля, полученный по формуле (1).

2. Факторы, влияющие на точность расчета гибридным методом. В [11] было экспериментально показано, что погрешность расчета напряженности проникающего электрического поля гибридным методом, как правило, не превышает 20% в дальней зоне неоднородности, в тех же случаях, когда это не так, гибридный метод дает худший прогноз относительно напряженности проникающего электрического поля. Тем не менее, при рассмотрении приведенного математического аппарата аналитического расчета проникающего поля, становится очевидным, что он не учитывает физических процессов, протекающих в проводящем экране, что может вызывать дополнительные погрешности, источники и размеры которых нуждаются в анализе.

Сравнение результатов моделирования гибридным методом с результатами, полученными при использовании численного ФЕМ метода, учитывающего физические процессы, протекающие в проводящем экране, позволяет определить степень погрешности, вносимой каждым из следующих основных источников:

Погрешность, вносимая при замене реальных отверстий произвольной формы эквивалентными эллиптическими. Данный вид погрешности был ранее оценен аналитически для корпусов простой формы, но ее сравнение с результатами численного моделирования прежде не проводилось. Очевидно, что предложенная аппроксимация вносит больший или меньший уровень погрешности в результат в зависимости от формы реального отверстия. Особенно ощутимым влияние данной погрешности становится в ближней зоне неоднородности. Вопрос влияния формы структурной неоднородности на степень погрешности, получаемой при расчете гибридным методом, рассмотрен на моделях, отнесенных к группе 1.

Для расчета электрического поля, проникающего через щели, используется та же формула, что и для отверстий произвольной формы. Данный подход отличается от традиционного, предложенного Г. Каденом [5] для бесконечно длинных щелей. Погрешность, связанная с таким упрощением также исследуется на моделях, отнесенных к группе 1.

В формуле (1) фигурируют лишь параметры рассматриваемой i -той неоднородности, при этом параметры корпуса, в частности его форма и габаритные размеры не учитываются. Теоретически, форма неоднородного электромагнитного экрана оказывает влияние на структуру проникающего электрического поля ввиду различного распределения электрического заряда в проводящей обшивке корпуса. Аналитический же метод не рассматривает физических процессов, протекающих в проводящих частях экрана, потому не учитывает дан-

ное влияние. Зависимость уровня погрешности от формы исследуемого экрана при расчете напряженности проникающего электрического поля гибридным методом по отношению к результатам расчета FEM методом, учитывающего физические процессы в проводящем материале, исследуется на моделях, отнесенных к группе 2.

В формуле (1) не учитывается взаимное расположение вектора напряженности электрического поля помехи, и поверхности, содержащей исследуемую неоднородность. При расчете проникающего электрического поля предполагается, что вектор напряженности перпендикулярен касательной плоскости, проходящей через центр отверстия (антипараллелен оси Z), а напряженность поля в любой точке, удаленной на расстояние R от центра неоднородности, равно напряженности поля, в точке, лежащей на том же расстоянии на оси Z (рис. 2). Погрешность, вносимая таким предположением, оценивается на серии моделей, отнесенных к группе 3.

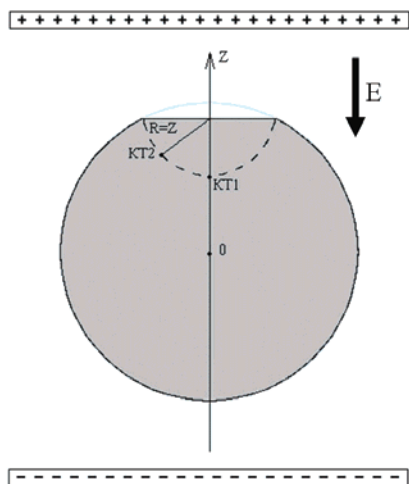


Рисунок 2 – Пространственное распределение зон равной напряженности проникающего электрического поля при расчете гибридным методом

3. Параметры компьютерных моделей. Для исследования погрешности, вносимой перечисленными источниками в результаты гибридного расчета, разработано 9 моделей, объединенных в 3 группы, причем одна и та же модель может входить в различные группы.

В моделях **1 группы** рассматривается электромагнитный экран кубической формы, со стороной 1 м и толщиной стенки 2 мм, помещенный в однородное электрическое поле напряженностью 100 кВ/м. Электрическое поле создается системой из двух заряженных пластин, линейные размеры, а также расстояние между которыми в 3 раза превышают линейные размеры исследуемого экрана, за счет чего обеспечивается условие однородности электрического поля. Данная полеобразующая система используется в моделях всех 3

групп. В исследуемом экране, в центре поверхности, обращенной к положительно заряженной пластине, прорезаны отверстия различной формы и площади (рис. 3):

- отверстие квадратного сечения со стороной 0,2 мм (рис. 3, а);
- отверстие круглой формы диаметром 0,2 мм (рис. 3, б);
- отверстие эллиптической формы с длинами полуосей: 0,1 м и 0,05 м (рис. 3, в);
- щель длиной 0,2 м и шириной 1 см (рис. 3, г).

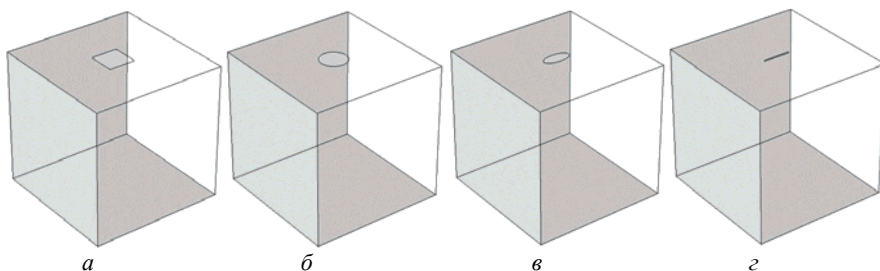


Рисунок 3 – Внешний вид моделируемых корпусов (группа 1)

В **группе 2** объединены модели, предназначенные для исследования влияния формы корпуса экрана на погрешность получаемых результатов.

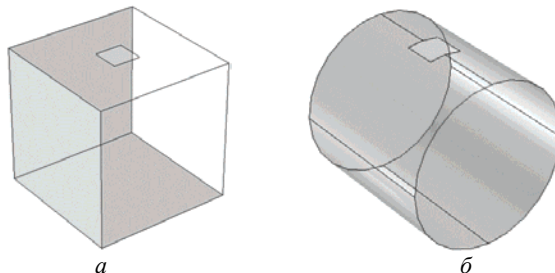


Рисунок 4 – Внешний вид моделируемых корпусов (группа 2)

Данная группа содержит две модели (рис. 4):

- экран кубической формы со стороной 1 м и толщиной стенки 2 мм, в верхней грани которого прорезано квадратное отверстие со стороной 0,2 м (рис. 4, а);
- экран цилиндрической формы, длина цилиндра равна 1 м, радиус цилиндра 0,5 м. В боковой поверхности цилиндра, обращенной к верхней ползающей пластине, прорезано прямоугольное отверстие со стороной 0,2 м (рис. 4, б).

Модели, относящиеся к **группе 3**, позволяют исследовать зависимость результатов оценки напряженности электрического поля гибридным методом

от ориентации неоднородности по отношению к вектору внешнего поля помехи.

Три модели данной группы содержат экран кубической формы, со стороной 1 м, в центре одной из поверхностей которого прорезано прямоугольное отверстие со стороной 0,2 м. Отверстие ориентировано под различным углом к верхней полеобразующей пластине (рис. 3):

- плоскость, содержащая отверстие, параллельна полезадающей пластине (рис. 5, *а*);
- плоскость, содержащая отверстие, находится под углом 45 градусов к полезадающей пластине (рис. 5, *б*);
- плоскость, содержащая отверстие, перпендикулярна полезадающей пластине (рис. 5, *в*).

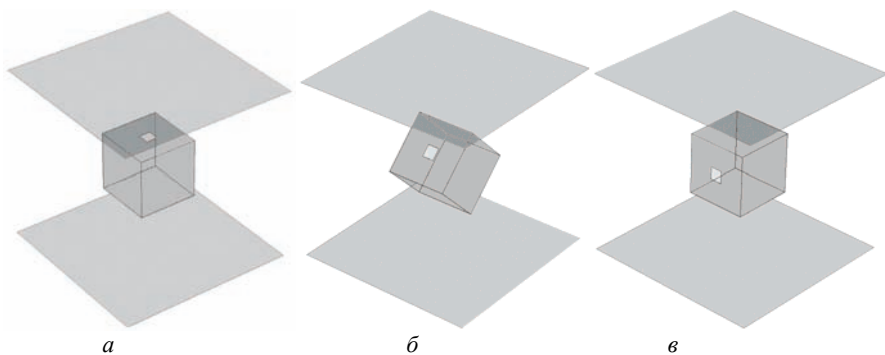


Рисунок 5 – Внешний вид моделируемых корпусов (группа 3)

Во всех моделях начало координат совпадает с геометрическим центром исследуемого экрана, координатная плоскость XOY параллельная полеобразующим пластинам, ось OZ направлена в сторону положительной пластины (на рис. 3-5 вверх)

4. Результаты моделирования. Для детального анализа точности гибридного метода, сравнивались значения напряженности проникающего электрического поля в двух ортогональных плоскостях XOZ и YOZ .

Сетка контрольных точек в экранируемой области исследуемых корпусов выбрана таким образом, что ее шаг был в 5-10 раз мельче радиуса исследуемых неоднородностей, что позволило добиться достаточного пространственного разрешения для детального исследования погрешностей гибридного метода во всех областях экранов.

Для расчета приведенных моделей численным (FEM) методом, использована программа COMSOL Multiphysics 4.0a [13]. Гибридные модели рассчитаны с использованием программ COMSOL Multiphysics 4.0a и разработанной автором программы SOA [14].

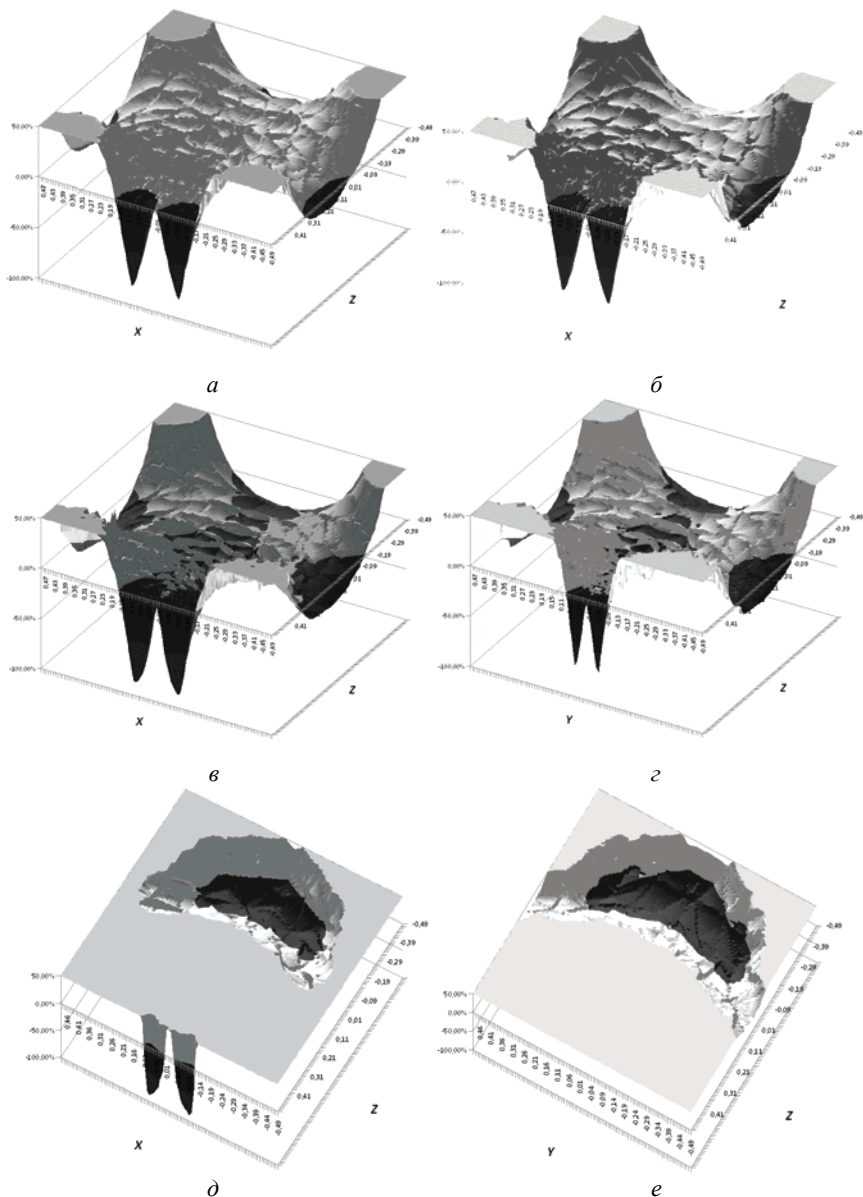


Рисунок 6 – Результаты сравнения расчета моделей первой группы гибридным и численным методами (а – квадратное отверстие, б – круглое отверстие, в – эллиптическое отверстие (вдоль большой полуоси), г – эллиптическое отверстие (вдоль малой полуоси), д – вдоль щели, е – поперек щели)

Для анализа утверждений сделанных в [11], в качестве основной исследуемой характеристики выбрана степень завышения результатов оценки напряженности электрического поля, рассчитанной гибридным методом, по отношению к результатам численного расчета, вычисляемая в каждой точке сетки по следующей формуле:

$$K = \frac{E_h - E_n}{E_n} \times 100\%, \quad (3)$$

где K – коэффициент превышения оценки напряженности электрического поля, полученной гибридным методом по отношению к численному методу; E_h – напряженность проникающего электрического поля в точке по результату гибридной оценки; E_n – напряженность проникающего электрического поля в точке, полученная численным методом.

Результаты сравнения представлены графически в виде трехмерных графиков, по двум из осей которых отложены координаты (X и Z или Y и Z), а третья координата отражает различия в результатах, полученных гибридным и численным методом в процентах. Значение в процентах имеет положительный знак – светлая часть графиков, если гибридный метод дает худший прогноз (завышение значения напряженности электрического поля) и отрицательный знак – темная часть графиков, если значение напряженности, полученное гибридным методом меньше значения в той же точке, полученного численным методом.

Для первой, второй и третьей групп моделей, результаты сравнительной оценки приведены соответственно на рис. 6-8.

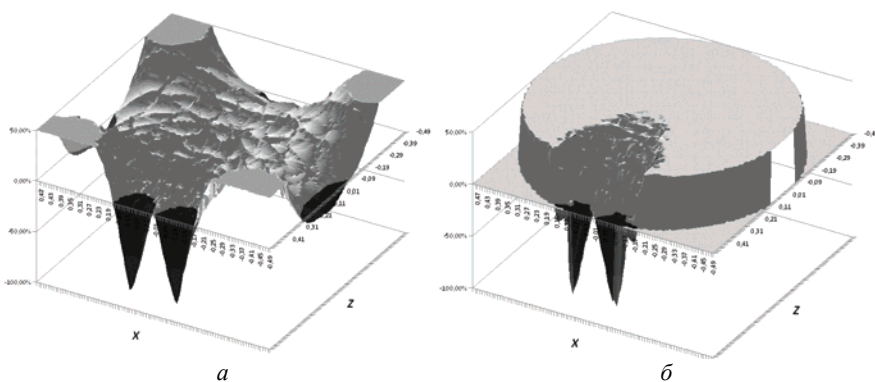


Рисунок 7 – Результаты сравнения расчета моделей второй группы гибридным и численным методами (a – экран кубической формы, b – экран цилиндрической формы)

5. Анализ результатов моделирования. Результаты, полученные при сравнении значений напряженности проникающего электрического поля, рассчитанных гибридным и численным методами, позволяют сделать следующие выводы:

1. Для неоднородностей класса «отверстие произвольной формы», результа-

ты гибридного и численного моделирования достаточно хорошо совпадают, величина отклонения не превышает 20 % для большей части внутреннего объема электромагнитного экрана. Кроме того, в тех случаях, когда величина отклонения по абсолютному значению превышает 20 %, гибридный метод дает худший прогноз о напряженности проникающего электрического поля.

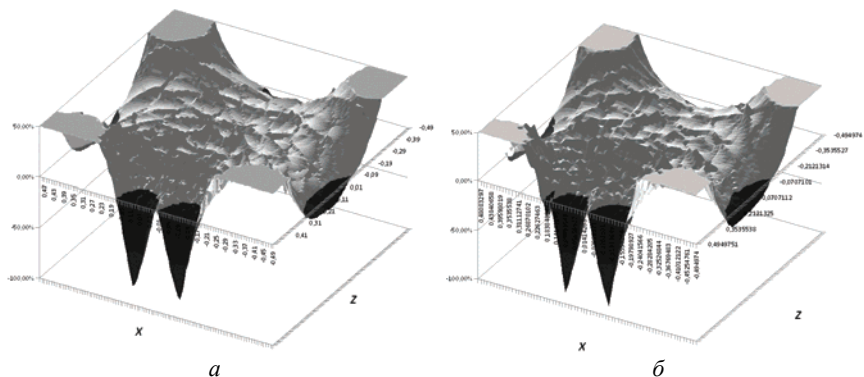


Рисунок 8 – Результаты сравнения расчета моделей третьей группы гибридным и численным методами (*а* – плоскость с неоднородностью параллельна полеобразующей пластине, *б* – плоскость с неоднородностью имеет наклон 45 градусов)

2. Для областей внутреннего объема электромагнитного экрана, расположенных в непосредственной близости от неоднородности – в ближней зоне отверстия, ближе к его краям – гибридный метод дает занижение результатов. Данный эффект наблюдается вследствие того, что гибридный метод не учитывает эффект увеличения концентрации заряда на краях отверстия и, следовательно, усиление электрического поля в данной области. Размер области заниженного прогноза зависит от формы и размера отверстия, а также напряженности внешнего электрического поля помехи.

3. Форма корпуса-экрана оказывает существенное влияние на степень, но не на факт завышения результатов гибридным методом. Внутри корпусов негладкой формы возможно образование областей, в которых гибридный метод дает занижение результатов. Вызвано это отсутствием учета физических процессов в проводящих структурах электромагнитного экрана: заряды, сосредоточенные в выпуклостях экрана, таких, как его углы, формируют внутри корпуса неоднородное электрическое поле, которое не может быть учтено при расчете гибридным методом. Влияние данного эффекта, в первую очередь, проявляется вблизи однородных поверхностей неоднородного электромагнитного экрана.

4. Результаты расчета напряженности проникающего электрического поля, полученные гибридным методом для неоднородностей, относящихся к классу щелей, занижены в дальней зоне по отношению к решениям, полученным численным методом. В ближней же зоне, гибридный метод дает сильное

завышение результатов (более 50%). Результаты сравнения, полученные для щелей, показывают, что применение для данного класса неоднородностей той же упрощенной формулы, что и для отверстий произвольной формы является неприемлемым. Возможным решением является усложнение математического аппарата для более точного учета формы структурной неоднородности.

Гибридный метод оказывается малочувствительным к взаимной ориентации вектора электрического поля и плоскости, содержащей неоднородность, в случае, если угол между вектором электрического поля и поверхностью имеющей неоднородность не равен 0.

Выводы. Проведенный сравнительный анализ точности гибридного метода позволяет сделать ряд существенных выводов касательно его применимости для расчета электрического поля, проникающего внутрь электромагнитного экрана, содержащего в своей структуре неоднородности типов «отверстие произвольной формы» и щель.

1. Для тонкостенных полых проводящих электромагнитных экранов, имеющих структурные неоднородности типа «отверстие произвольной формы», гибридный метод дает завышение напряженности проникающего электрического поля для большей части внутреннего объема. Степень завышения зависит от формы экрана и формы отверстия и для большей части внутреннего объема лежит в пределах 20%. Степень завышения слабо зависит от ориентации неоднородной плоскости по отношению к вектору напряженности внешнего поля помехи вплоть до случая, когда плоскость отверстия параллельна вектору электрического поля, где наблюдается аномальная ситуация.

2. Применение гибридного метода в ближней зоне отверстия целесообразно только на оси, перпендикулярной плоскости, содержащей неоднородность. Применение гибридного метода в ближней зоне отверстия вблизи его краев нецелесообразно, поскольку дает заведомо заниженный прогноз напряженности. Таким образом, наиболее эффективным является применение гибридного метода для расчета напряженности проникающего электрического поля во всем внутреннем объеме электромагнитного экрана, кроме ближней зоны отверстия, где правильная работа гибридного метода не гарантируется.

3. Существующая реализация гибридного метода оказывается малоэффективной при расчете в квазистационарном приближении электрического поля, проникающего через щели. Для устранения данного недостатка в дальнейшем необходимо изменить аналитическую формулу таким образом, чтобы она учитывала более точно форму и ориентацию реальной неоднородности.

Таким образом, гибридный метод может успешно применяться практически для оценки напряженности проникающего электрического поля в областях типичного размещения РЭО внутри корпуса-экрана. В отличие от численного метода, незначительное завышение результатов, полученных гибридным методом, является предпочтительным с инженерной точки зрения, поскольку позволяет иметь некоторый запас защитных свойств экрана при его разработке и аттестации.

Список литературы: 1. *Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И.* Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с., ил. 2. *Ивкин В.Г., Трифонов Е.Е.* Методы и средства защиты от помех в электрофизических установках. – Л.: Препринт Г – 0533 НИИ ЭФА, 1982. – 44 с. 3. *Уилльямс Т., Армстронг К.* ЭМС для систем и установок. – М.: Издательский дом «Технологии», 2004. – 508 с. 4. *Уайт Д.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: пер. с англ. / Вып. 3 / Под ред. *А.Д. Князева.* – М.: Сов радио, 1979. – 464 с. 5. *Каден Г.* Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи / Пер. с нем. В.М. Лаврова. – М.-Л.: ГЭИ, 1957. – 327 с., ил. 6. *Шваб А.Й.* Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 423 с., ил. 7. *Колечицкий Е.С.* Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с., ил. 8. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. *Р. Митры.* – М.: Мир, 1997. – 485 с., ил. 9. Численные методы теории дифракции / Сб. статей: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 200 с., ил. 10. *Скобликов А.Ю., Князев В.В.* «Гибридный метод расчета влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства» // 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). Севастополь, 13-17 сентября 2010 г. : материалы конф. – Севастополь : Вебер. – 2010. – С. 918-919 – ISBN 978-966-335-333-3. 11. *Скобликов А.Ю.* Результаты моделирования процесса проникновения электрического поля внутрь структурно-неоднородного электромагнитного экрана // «Электротехника и электромеханика» Научно-практический журнал. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. – ISSN 2074-272X. 12. *Скобликов А.Ю.* Методика оценки влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства // «Электротехника и электромеханика». Научно-практический журнал. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – №4 – С. 44-48. – ISSN 2074-272X. 13. <http://www.comsol.com>. 14. А. с. №33865 Украина, Компьютерная программа аналитического расчета влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его экранирующие свойства «Screening Orifices Analytics» / *А.Ю. Скобликов, В.В. Князев*, 24.06.2010.

Поступила в редакцию 23.03.2011.