

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВНУТРИ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНА

*Наведено результати чисельного розрахунку задачі проникнення імпульсного електричного поля, що супроводжує розряд блискавки, у тонкостінну циліндричну оболонку, що має кінцеві розміри та різноманітні отвори. Розв'язання задачі отримане двома методами: методом кінцевих елементів та гібридним методом, що розроблений автором. Результати чисельного моделювання зіставлені з результатами експериментальних досліджень.*

*Представлены результаты численного решения задачи проникновения импульсного электрического поля, сопровождающего молниевый разряд, в тонкостенную цилиндрическую оболочку конечных размеров с различными отверстиями. Решение задачи получено двумя методами: методом конечных элементов и гибридным методом, разработанным автором. Результаты численного моделирования сопоставлены с результатами экспериментальных исследований.*

### ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные экраны являются одним из наиболее эффективных средств защиты радиоэлектронного оборудования (РЭО) от воздействия мощных электромагнитных полей (МЭМП), к числу которых относятся поля, сопровождающие молниевый разряд. В квазистационарном приближении процессы проникновения электрического и магнитного полей можно рассматривать независимо. Электромагнитное поле, сопровождающее разряд атмосферного электричества (молнии), удовлетворяет условиям квазистационарности, если размеры рассматриваемого объекта не превышают 50 м. В рамках данной статьи рассматривается проникновение электрической составляющей электромагнитного поля молнии в корпуса РЭО, размеры которых удовлетворяют указанному выше условию.

Известно [1-4], что защитные свойства электромагнитного экрана определяются не столько толщиной и электрофизическими свойствами проводящего материала, из которого он изготовлен, сколько наличием в нем структурных неоднородностей, их формой и размерами, а также ориентацией относительно вектора напряженности электрического поля.

Практика создания реальных проводящих корпусов-экранов показывает, что создать идеальный однородный корпус-экран не представляется возможным, поскольку в его структуре, как правило, присутствуют неоднородности, такие как стыки экранирующих пластин, отверстия для органов индикации и управления, вентиляционные решетки и т.д. В данной статье рассматриваются структурные неоднородности, оказывающие наиболее существенное влияние на защитные свойства проводящего корпуса-экрана, а именно отверстия произвольной формы, а также щели.

**Цель работы.** Экспериментальная оценка точности результатов, получаемых при расчете электромагнитной обстановки внутри структурно-неоднородного проводящего электромагнитного экрана гибридным методом, а также ее сравнение с результатами, получаемыми при расчете численным методом.

**1. Требования, предъявляемые к методам математического моделирования задач электромагнитного экранирования.**

Уровни электромагнитного излучения в современном мире неуклонно растут, в то же время миниа-

туризация элементной базы приводит к снижению порога ее чувствительности к МЭМП. В связи с этим, актуальной является задача повышения точности результатов расчета эффективности экранирования разрабатываемых проводящих корпусов-экранов. Понятие коэффициента экранирования для реального корпуса существенно усложняется, поскольку поле внутри экранируемой области является резко неоднородным.

Для описания реальной ситуации внутри экранируемой области введен термин "электромагнитная обстановка" (ЭМО). Под ЭМО в определенной области пространства понимается совокупность электромагнитных полей, влияющая на качество функционирования РЭО, вызывая сбои, кратковременные отказы в работе или полный его выход из строя [1]. Снижение степени дестабилизирующего воздействия проникающего поля может достигаться за счет изменения компоновки РЭО внутри корпуса-экрана, например, размещения более чувствительных компонентов и цепей в более защищенных областях экранируемого пространства, а также за счет изменения конструкции корпуса-экрана. В любом из перечисленных случаев, должна решаться задача оптимизации, выполнение которой на реальных макетах является достаточно трудоемким и затратным.

В мировой практике для решения задач оптимизации широко применяются методы математического моделирования, способные на основании геометрических и электрофизических параметров структурно-неоднородного проводящего экрана, а также с учетом напряженности поля помехи, выполнять расчет ЭМО внутри экранируемой области. Причем, для эффективного применения соответствующих программных средств моделирования, к ним предъявляется ряд требований:

**Работа с трехмерными экранами.** Большинство методов, хорошо известных в данной области науки и техники, предполагают расчет проникающего поля в двумерном случае. Примерами таких методов могут служить формулы, полученные Г. Каденом для щелей бесконечной длины [5]. Применение таких методов на практике связано с рядом трудностей и не позволяет добиться высокой точности при расчете проникающего поля внутри реальных проводящих корпусов-экранов.

**Работа с экранами сложной формы.** Большинство аналитических выражений, полученных в теории экранирования [1-6], хорошо применимы для экранов простой формы (сфера, цилиндр, две плоскости). Для их практического применения, необходимо выполнить аппроксимацию сложной формы реального корпуса-экрана к известной простой. Однако, для неоднородных корпусов, даже небольшое изменение формы экрана может приводить к существенному изменению его защитных свойств.

**Высокая точность расчета.** Применение некоторых аналитических методов, требующих, например, аппроксимации формы реального корпуса-экрана, может приводить к существенным погрешностям в результатах вычисления. На практике, для большинства инженерных задач, погрешность вычисления не должна превышать 20 %.

**2. Методы расчета проникающего электрического поля.** Существует достаточно много методов расчета защитных характеристик электромагнитных экранов. Их условно можно разделить на аналитические [5, 6] и численные [7-9]. Рассмотрим примеры таких методов, применимых для расчета ЭМО внутри проводящего электромагнитного экрана, содержащего структурные неоднородности типов "отверстие произвольной формы" и "щель".

**Численные методы.** Наибольшее распространение на практике приобрел метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM) [8, 9]. В рамках проведенных исследований использовался вариант метода, реализованный в программном продукте COMSOL Multiphysics [10]. Этот метод позволяет в процессе решения задачи осуществить расчет всех связанных физических параметров, таких как заряд на поверхности экрана, электрический потенциал и др. для каждой точки исследуемой области пространства. Для повышения точности результатов важно создать трехмерную модель, детально отражающую структуру и электрофизические свойства реального объекта, для которого выполняется расчет. **Преимуществами** численных методов являются потенциальная возможность достижения высокой точности, а также возможность работы с трехмерными объектами произвольной формы и конструктивных особенностей. Основным же **недостатком** являются чрезвычайно высокие требования к вычислительным ресурсам, которые могут расти в экспоненциальной прогрессии при усложнении структуры исследуемого объекта.

**Аналитические методы.** В отличие от численных, аналитические методы не требуют точного отражения всех деталей исследуемого корпуса, а также не выполняют расчет сопутствующих физических параметров. Расчетные формулы, связывающие ЭМО внутри корпуса с его определенными геометрическими и электрофизическими параметрами, как правило, получены теоретически, либо, в некоторых случаях, эмпирически, и имеют узкоспециализированное применение (например, для корпусов-экранов лишь определенной формы). **Преимуществами** аналитических методов являются их простота, а также высокая скорость вычисления и низкие требования к вычислительным ресурсам. Основными же их **недостатками**

являются ограниченная точность и применимость лишь к корпусам-экранам простых геометрических форм. Примером аналитического метода, применимого для расчета проникающего поля сквозь проводящий экран, содержащий структурные неоднородности, является "Методика оценки влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства" [11]. Особенностью данной методики является необходимость задания напряженности электрического поля в точке на поверхности эквивалентного однородного корпуса, совпадающей с центром реальной неоднородности на исследуемом корпусе. Данная методика практически реализована автором в программном продукте "Screening Orifices Analytics" (SOA) [12].

Исходя из практики применения как численных, так и аналитических методов для расчета проникающего электрического поля сквозь структурные неоднородности реальных электромагнитных экранов, был разработан "Гибридный метод расчета влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства" [13]. Данный метод сочетает в себе преимущества численных и аналитических методов, позволяя моделировать проводящие электромагнитные экраны произвольной формы, рассматривать влияние отверстий произвольной формы и щелей в их структуре на защитные характеристики экрана. В [13] было показано, что применение гибридного метода для решения практических задач моделирования реальных экранов позволяет, по сравнению с FEM, существенно снизить временные затраты, как на разработку, так и на расчет модели. В дополнение к этому, в данной статье приводится экспериментальная оценка точности результатов, получаемых при расчете гибридным методом, а также ее сравнение с результатами, получаемыми при расчете численным методом.

**3. Постановка задачи.** Для сравнительной оценки точности расчета напряженности проникающего электрического поля различными методами, использована модель реального электромагнитного экрана – макета корпуса ракеты-носителя (рис. 1). Параметры численной и гибридной моделей задаются в соответствии с реальными геометрическими и электрофизическими параметрами корпуса-экрана, на котором затем выполняется экспериментальная проверка. Напряженность электрического поля в модели также соответствует реальным значениям напряженности в экспериментах.

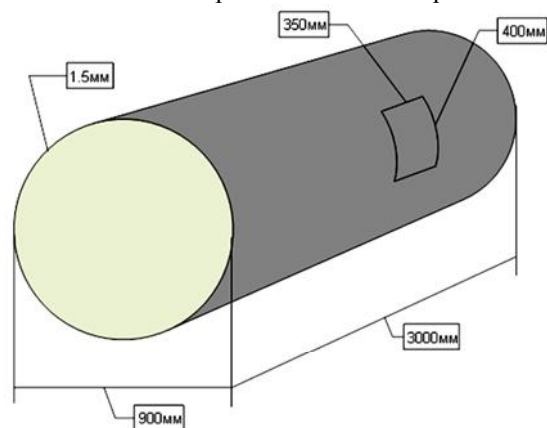


Рис. 1. Линейные размеры исследуемого корпуса-экрана

**Параметры исследуемого экрана:** Экран представляет собой полый цилиндр с однородными торцами (рис. 1), выполненный из сплава АМц ( $\sigma = 2,9 \times 10^7$  См/м), длиной 3 м и радиусом 0,45 м. Толщина стенок: 1,5 мм. В боковой поверхности цилиндра, на расстоянии 0,225 м от середины его образующей, вырезано отверстие прямоугольного сечения, размером 0,35×0,4 м (далее "базовое отверстие"). На данное отверстие могут крепиться 3 различные накладки (рис. 2):

- Накладка А – заглушка для обеспечения однородности стенки корпуса;
- Накладка В – квадратное отверстие размером 0,2×0,2 м;
- Накладка С – система из 4 отверстий диаметром 0,1 м, удаленных на 0,15 м друг от друга.

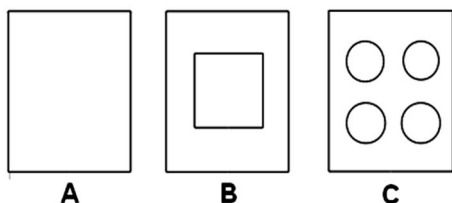


Рис. 2. Накладки для базового отверстия

Напряженность внешнего электрического поля равняется 165 кВ/м. В испытательной установке поле задается системой параллельных заряженных пластин с линейными размерами 3,63×5,21 м, удаленными друг от друга на 3 м, между пластинами располагается исследуемый объект отверстием вверх (рис. 3 и 4). Для определенности, рассчитано и измерено  $z$ -компоненту электрического поля в двух точках (рис. 3):

- в точке пересечения оси симметрии цилиндра и его радиуса, проходящего через центр базового отверстия (КТ 1);
- в точке, лежащей на радиусе, проходящем через центр базового отверстия, и удаленной на 0,25 м от оси симметрии цилиндра (КТ 2).

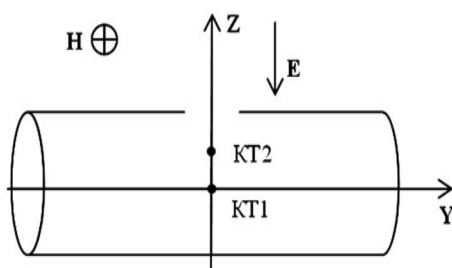


Рис. 3. Направление вектора напряженности электрического поля

Значения других компонент в этих точках пренебрежимо мало, и находится ниже порога чувствительности измерительного устройства. Задача расчета  $z$ -компоненты связана с выбором системы координат, где ось  $OZ$  антипараллельна вектору напряженности электрического поля созданного полеобразующей системой. Выбор точек внутри корпуса-экрана, в которых выполняется расчет, связан с конечными габаритами реального измерительного датчика, а также особенностями его установки внутри корпуса-экрана

(рис. 5). Точка отсчета выбранной системы координат совпадает с геометрическим центром цилиндра.



Рис. 4. Внешний вид испытательной установки

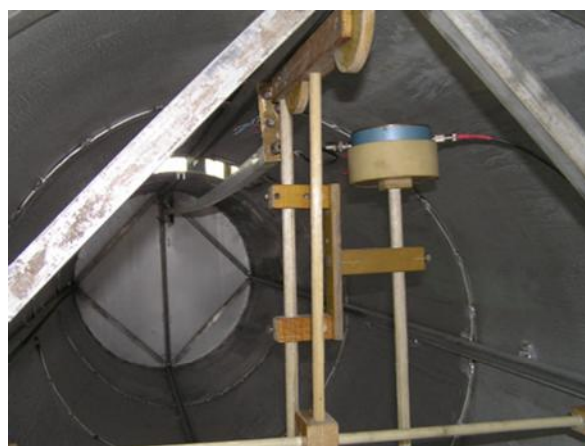


Рис. 5. Внешний вид датчика электрического поля, установленного внутри корпуса-экрана

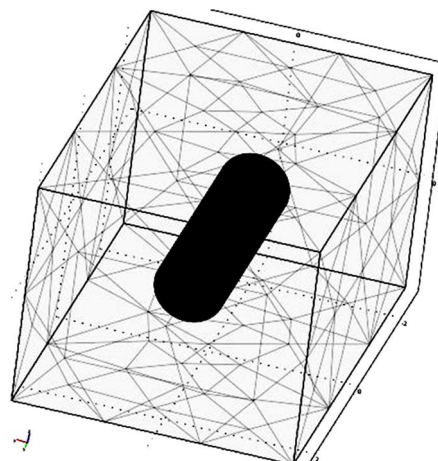


Рис. 6. Трехмерная численная модель исследуемого экрана

#### 4. Результаты моделирования.

**Численная модель.** В COMSOL Multiphysics 3.5 в режиме 3D - AC/DC Module - Statics, Electric - Electrostatics была создана модель испытательной установки с установленным исследуемым корпусом-экраном (рис. 6). Полученная сетка содержит 116871



элементов. Выбор итерационного решателя позволяет снизить требования к объему ОЗУ. Аналогичным образом были созданы и рассчитаны модели корпуса-экрана с накладками А-С. Результаты моделирования численным методом приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты численного расчета  $z$ -компоненты  $E$ -поля, В/м

Точка	Без накладок	С накладкой		
		А	В	С
КТ 1	4845,01	1,54e-4	525,01	259,35
КТ 2	37528,28	9,57e-4	6500,08	1446,51

Примечательным является то, что результаты расчета напряженности электрического поля численным методом с помощью программы COMSOL Multiphysics 3.5 могут быть легко представлены в графическом виде (рис. 7), позволяя получить общее представление о распределении напряженности электрического поля вдоль оси, проходящей через центр базового отверстия.

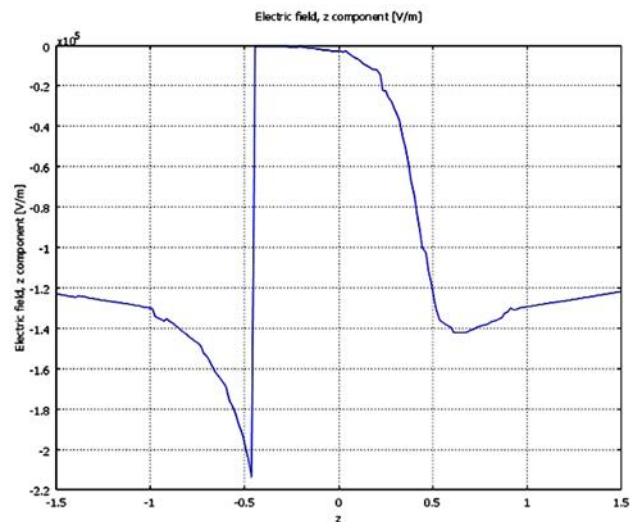


Рис. 7. Распределение напряженности  $E_z$  вдоль линии, проходящей через центр базового отверстия в радиальном направлении. Вектор  $E$  антипараллелен оси  $OZ$ . Макет РКТ размещен в полеобразующей системе отверстием вверх. Поле внутри макета соответствует диапазону изменения координаты  $-0,45 < Z < 0,45$

**Гибридная модель.** В гибридной модели вычисление проникающего поля осуществляется согласно "Методике оценки влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства" [11] на корпусе произвольной формы. Для получения точного значения напряженности электрического поля в точке на поверхности однородного экрана, совпадающей с центром реального отверстия, используется численный метод. В таком случае, первым этапом является расчет напряженности электрического поля на поверхности однородного цилиндра в точке, совпадающей с центром базового отверстия с помощью COMSOL Multiphysics.

В данном случае, число элементов сетки составляет всего 20230, что существенно меньше, чем в численной модели, следовательно, требования к вычислительным ресурсам снижаются. Напряженность

электрического поля в искомой точке, совпадающей с центром базового отверстия, равна  $E_z = -3,59e5$  В/м. Данное значение может применяться на втором этапе расчета гибридной модели во всех случаях, кроме случая использования насадки С, где аналогичным образом из уже рассчитанной модели определяется напряженность электрического поля в точках, совпадающих с центрами каждого из 4 отверстий.

Далее, на основании напряженности электрического поля на поверхности однородного экрана с помощью программы SOA (рис. 8), вычисляется напряженность проникающего поля в контрольных точках КТ 1 и КТ 2. Значения параметров  $S$ ,  $p$ ,  $a$ ,  $b$  определяются размерами и формой отверстий. Обоснование выбора этих параметров приведено в [11].

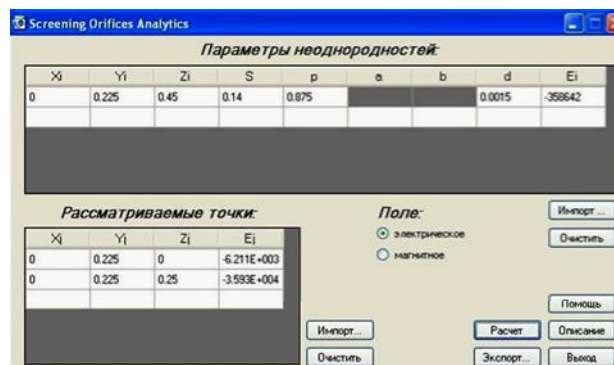


Рис. 8. Окно программы SOA при расчете  $z$ -компоненты  $E$ -поля для исследуемого корпуса без накладок

Результаты гибридного моделирования приведены в табл. 2. Следует отметить, что для накладки А расчет не выполнялся, поскольку разработанный гибридный метод применим только к корпусам, содержащим структурные неоднородности.

Таблица 2

Результаты расчета гибридным методом  $z$ -компоненты  $E$ -поля, В/м

Точка	Без накладок	С накладкой		
		А	В	С
КТ 1	6211,27	–	796,9	382,26
КТ 2	35928,51	–	7346,36	3281,03

**5. Результаты измерений.** Экспериментальные исследования проведены в высоковольтном зале НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" на макете корпуса-экрана ракеты носителя. С помощью испытательной установки, схема которой приведена на рис. 9, было создано исходное электрическое поле напряженностью 164,8 кВ/м (с неопределенностью в пределах 7 %).

Результаты измерений представлены в табл. 3. Следует отметить, что достоверность этих результатов подтверждена комиссией, в состав которой входили представители Заказчика – ГП "КБ "Южное". В ходе измерения напряженности поля внутри корпуса с установленной накладкой А не удалось выделить полезный сигнал ввиду его низкого уровня по отношению к собственным шумам датчика.

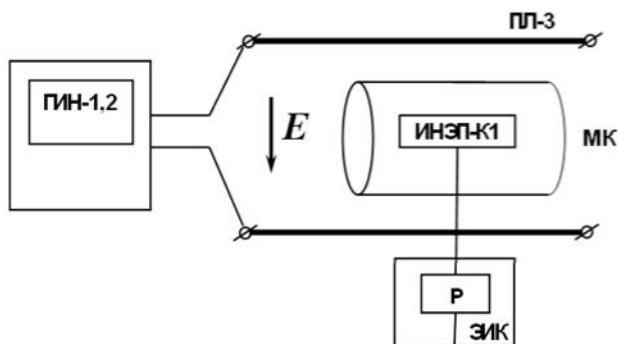


Рис. 9. Схема проведения исследований экранирующих свойств макета при нагружении внешним импульсным электрическим полем (ГИН-1,2 – генератор импульсов электрического поля формы 0,1/10 мс; ПЛ-3 – полеобразующая система; МК – испытываемый макет корпуса; E – вектор напряженности испытательного электрического поля; ИНЭП-К1 – измеритель напряженности электрического поля; ЭИК – экранированная измерительная камера; Р1 – регистратор (осциллограф))

Таблица 3

Результаты измерений, В/м

Точка	Без накладок	Накладка		
		А	В	С
КТ 1	5978	–	776	361
КТ 2	34298	–	5690	2120

**6. Анализ полученных результатов.** В табл. 4 приведены сводные данные экспериментальных исследований и расчетной оценки двумя методами, а также отклонения результатов расчета по отношению к результатам эксперимента.

Таблица 4

Сравнение результатов измерения и расчета E-поля внутри неоднородного экрана

Точка	Эксперимент, В/м	Численный метод		Гибридный метод	
		Значение, В/м	Отклонение, %	Значение, В/м	Отклонение, %
<b>Без накладок</b>					
КТ 1	5978	4845,01	-19	6211,27	+4
КТ 2	34298	37528,28	+9,4	35928,5	+4,7
<b>Накладка В</b>					
КТ 1	776	525,01	-32,3	796,9	+2,7
КТ 2	5690	6500,08	+14,2	7346,36	+29,1
<b>Накладка С</b>					
КТ 1	361	259,35	-28	382,26	+5,9
КТ 2	2120	1446,51	-32	3281,03	+54,8

Анализ результатов, представленных в табл. 4, позволяет сделать следующие выводы:

1. Значения отклонения результатов численной оценки от данных эксперимента возрастают по мере уменьшения размеров отверстия. Это обусловлено тем, что масштаб пространственной неоднородности проникающего поля при малых размерах отверстий становится сравнимым с размерами измерительного преобразователя. При этом, как показано в работе [14], погрешность результата измерения существенно зависит от соотношения размеров датчика и отверстия, а также координат точки измерения.

2. Несмотря на то, что потенциально численный метод может давать более точные результаты, в рассматриваемом случае применение гибридного метода дает более точную оценку реального значения элект-

рического поля. Возможным объяснением такой ситуации может служить недостаточное число элементов сетки, используемой в численном методе. Расчет приведенной численной модели в COMSOL стал возможен лишь при применении итерационного решателя, при объемах ОЗУ 8Гб. Причем, основные затраты ОЗУ приходились именно на этап наложения сетки. Таким образом, даже решение относительно простой задачи требует больших объемов вычислительных ресурсов. Напротив, ту же задачу гибридным методом удалось решить без каких-либо затруднений на ПК с ОЗУ 1 Гб.

3. Даже в случаях, когда отклонение данных, полученных гибридным методом, по абсолютному значению превышает отклонение данных по численному методу, в случае гибридного метода отклонение всегда происходит в сторону больших значений. Таким образом, гибридный метод всегда дает прогноз максимально возможной напряженности полей ЭМО внутри корпуса экрана.

## ВЫВОДЫ

Экспериментальная оценка точности результатов, полученных гибридным методом, показала, что погрешность в расчетах, при корректном измерении однородного поля, как правило, укладывается в 20 %. В тех случаях, когда отклонение выходило за пределы 20 %, пространственная неоднородность измеряемого электрического поля, имела масштаб меньший, чем линейные размеры датчика. Эту зависимость нетрудно проследить по увеличению погрешности расчета гибридным методом по мере приближения контрольной точки к структурным неоднородностям для одних и тех же накладок.

Сравнительная оценка гибридного метода по отношению к численному показала, что результаты, полученные первым, в большинстве случаев, более точны, чем те, что получены вторым методом. Возможной причиной этого является недостаточное число элементов сетки, использованной при выполнении расчета. Усложнение же сетки требует дополнительных вычислительных ресурсов, объем которых уже выходит за пределы объемов, типичных для ПК. Следовательно, для повышения точности результатов расчетов необходимо применение суперкомпьютеров, либо же произведения вычислений на базе вычислительного кластера.

Отклонение данных, полученных в результате расчета гибридным методом, в отличие от численного метода, всегда дает "худший" прогноз напряженности проникающего электрического поля, что, с инженерной точки зрения, является преимуществом, поскольку такой подход позволяет гарантировать некоторый запас защитных свойств разрабатываемого проводящего электромагнитного корпуса-экрана.

Таким образом, результаты данных исследований подтверждают целесообразность практического применения разработанного автором гибридного метода для расчета проникающего электрического поля сквозь структурные неоднородности проводящего электромагнитного экрана произвольной формы.

Исследования проведены в рамках выполнения

хозяйственного договора № 351082 между ГП "КБ "Южное" и НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ". Экспериментальные исследования проведены сотрудниками научно-исследовательского отдела № 2 под руководством В.В. Князева.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиозлектронные 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. Уильямс Т., Армстронг К. ЭМС для систем и установок. – М.: Издательский Дом "Технологии", 2004. – 508 с.
4. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиозлектронных 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.И. 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. <http://www.comsol.com>.
11. Скобликов А.Ю. Методика оценки влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства // *Электротехника і електромеханіка*. – 2010. – № 4. – С. 44-48.
12. Свідоцтво №33865 Україна, Комп'ютерна програма аналітичного розрахунку впливу структурних неоднородностей електромагнітного екрана на його екрануючі властивості "Screening Orifices Analytics" / А.Ю. Скобликов, В.В. Князев, 24.06.2010.
13. 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.
14. Knyazev V.V. Prediction and measurement of electromagnetic field, penetrating through the aperture into conducting screen // Proc. of the 10<sup>th</sup> Wroclaw Int. Symposium EMC, 1990. p. 734-739.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kravchenko V.I., Bolotov E.A., Letunova N.I. Radio`elektronnye sredstva i moschnye `elektromagnitnye pomehi / Pod red. V.I. Kravchenko. - M.: Radio i svyaz', 1987. - 256 s., il. 2. Ivkin V.G., Trifonov E.E. Metody i sredstva zashchity ot pomeh v `elektrofizicheskikh ustanovkakh. - L.: Preprint G - 0533 NII `EFA, 1982. - 44 s. 3. Uil'yams T., Armstrong K. `EMS dlya sistem i ustanovok. - M.: Izdatel'skiy Dom "Tehnologii", 2004. - 508 s. 4. Uajt D. `Elektromagnitnaya sovmestimost' radio`elektronnyh sredstv i neprednamerennye pomehi: Per. s angl. / Vyp. 3 / Pod red. A.D. Knyazeva. - M.: Sov radio, 1979. - 464 s. 5. Kaden G. `Elektromagnitnye `ekrany v vysokochastotnoj tehnikе i tehnikе `elektrosvyazi / Per. s nem. V.M. Lavrova. - M.-L.: G`EI, 1957. - 327 s., il. 6. Shvab A.I. `Elektromagnitnaya sovmestimost'. - M.: `Energoatomizdat, 1998. - 423 s., il. 7. Kolecchickij E.S. Raschet `elektricheskikh polej ustrojstv vysokogo napryazheniya. - M.: `Energoatomizdat, 1983. - 168 s., il. 8. Vychislitel'nye metody v `elektrodinamike / Pod red. R. Mitry. - M.: Mir, 1997. - 485 s., il. 9. Chislennye metody teorii difrakcii / Sb. statej. Per. s angl. - M.: Mir, 1982. - 200 s., il. 10. <http://www.comsol.com>. 11. Skoblikov A.Yu. Metodika ocenki vliyaniya strukturnykh neodnorodnostej `elektromagnitnogo `ekrana na ego zashchitnye svoystva // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2010. - № 4. - S. 44-48. 12. Svidoctvo №33865 Ukraina, Komp'yuternaya programma analiticheskogo rascheta vliyaniya strukturnykh neodnorodnostej `elektromagnitnogo `ekrana na ego zashchitnye svoystva "Screening Orifices Analytics" / A.Yu. Skoblikov, V.V. Knyazev, 24.06.2010. 13. Skoblikov A.Yu., Knyazev V.V. Gibridnyj metod rascheta vliyaniya strukturnykh neodnorodnostej `elektromagnitnogo `ekrana na ego zashchitnye svoystva // 20-ya Mezhdunarodnaya Krymskaya konferenciya "SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii" (KryMiKo'2010). Sevastopol', 13-17 sentyabrya 2010 g.: materialy konf. - Sevastopol': Veber. - 2010. - S. 918-919. 14. Knyazev V.V. Prediction and measurement of electromagnetic field, penetrating through the aperture into conducting screen // Proc. of the 10<sup>th</sup> Wroclaw Int. Symposium EMC, 1990. p. 734-739.

Поступила 24.02.2011

Скобликов Алексей Юрьевич  
НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47  
тел. +38 (057) 707-68-68  
e-mail: oleksii.skoblikov@gmail.com

Skoblikov O.Y.

#### **Simulation results for electric field penetration into an electromagnetic screen with structure inhomogeneities.**

Numerical simulation results for penetration of pulsed electric field following a lightning strike into a finite-size thin-wall cylindrical screen with various orifices are given. The solution to the problem is obtained by the means of two methods, namely, a finite element method and a hybrid method developed by the author. The simulation results are compared with experimental data.

**Key words – electric field penetration, thin-wall cylindrical screen with structure inhomogeneities, simulation results, hybrid method, finite element method.**