

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНА НА ЕГО ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА

Розроблено методику аналітичного розрахунку електромагнітного поля, що проникає до корпусу-екрану крізь його структурні неоднорідності. Методика враховує довільну форму структурної неоднорідності та товщину стінки екрану. Розроблена комп'ютерна програма, що реалізує методику для довільного числа структурних неоднорідностей типів "отвір" та "щілина".

Разработана методика аналитического расчета электромагнитного поля, проникающего внутрь корпуса-экрана через его структурные неоднородности. Методика учитывает произвольную форму структурной неоднородности и толщину стенки экрана. Разработана компьютерная программа, реализующая методику для произвольного числа структурных неоднородностей типов "отверстие" и "щель".

Постановка задачи. Задача электромагнитного экранирования является актуальной для многих областей науки и техники. Одной из таких областей являются телекоммуникации. Наиболее актуальной проблемой, решаемой с помощью электромагнитного экранирования в телекоммуникациях, является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) телекоммуникационных систем (ТКС), отдельных узлов, либо же структурных блоков в составе узла ТКС.

Применение электромагнитного экранирования с одной стороны позволяет снизить влияние полевых помех, существующих в окружающей среде, на радиоэлектронное оборудование (РЭО), находящееся внутри экранируемой области, а с другой стороны снижает интенсивность полевых помех излучаемых работающим РЭО в окружающей среде. Причем, в обоих случаях, физические процессы, лежащие в основе эффекта электромагнитного экранирования, идентичны. Поэтому, как правило, рассматривают случай защиты РЭО, находящегося внутри экранируемой области от внешнего воздействия, подразумеваемая существование и обратного эффекта.

Основными факторами, оказывающими влияние на защитные свойства проводящих экранов, согласно теории экранирования, являются геометрические параметры экрана, а также электрофизические свойства материала, из которого он изготовлен; кроме того, защитные характеристики экрана зависят от амплитудно-временных параметров помехонесущих полей.

На практике, экранирующие свойства корпусов РЭО зависят не столько от толщины и материала, из которого изготовлен электромагнитный экран, сколько от наличия в нем структурных неоднородностей, их размера, формы и взаимного расположения, а также от ориентации по отношению к ним вектора помехонесущего поля [1-3]. Таким образом, при решении задач электромагнитного экранирования особое внимание должно уделяться именно учету влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства.

Цель работы. Разработка методики, а также прикладных средств для оценки влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства.

1. Влияние структурных неоднородностей экрана на его защитные свойства.

При определении термина "структурная неодно-

родность", следует выделить основные типы неоднородностей (рис. 1):

- отверстия,
- щели,
- решетки (системы отверстий),
- стыки.

Неоднородности различных типов оказывают неодинаковое влияние на экранирующие свойства корпуса, и от того, насколько точно учтены все их параметры, зависит точность оценки реальных уровней полевых помех, воздействующих на РЭО внутри экранируемой области.

Для оценки защитных свойств электромагнитных экранов сравнивают напряженности электрического и магнитного полей снаружи экрана с соответствующими физическими величинами внутри экранируемой области. Таким образом, задача оценки влияния структурных неоднородностей на защитные свойства электромагнитного экрана сводится к оценке напряженности поля, проникающего сквозь рассматриваемую неоднородность в определенной точке внутри экранируемой области.

Методы оценки напряженности поля, проникающего через структурные неоднородности проводящего экрана условно делятся на численные и аналитические. Применение численных методов при правильной постановке задачи, позволяет добиться высокой точности. Однако их использование связано с большим объемом вычислений ввиду необходимости трехмерного моделирования экрана, а также исследуемых неоднородностей в его структуре.

На практике, для решения инженерных задач, зачастую бывает достаточно оценки влияния неоднородностей в структуре экрана с погрешностью до 20 %. В таком случае, целесообразным является применение аналитических методов, которые значительно менее требовательны к вычислительным ресурсам и, в то же время, позволяют получить результат с допустимым уровнем погрешности.

Одним из методов аналитической оценки влияния структурных неоднородностей на защитные свойства экрана является их замена эквивалентными дипольными моментами. Такой подход позволяет достаточно точно рассчитать напряженность поля в дальней зоне неоднородности. В ближней же зоне, точность полученных решений снижается. Для ближней зоны существуют более точные аналитические выражения [4, 5].

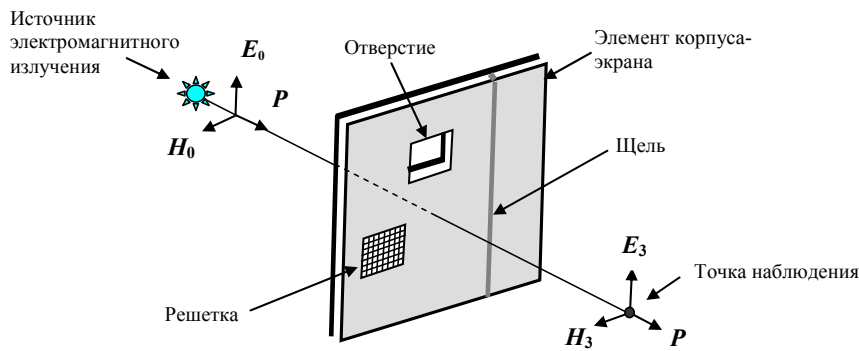


Рис. 1. Типы структурных неоднородностей экрана

Описанный двойственный подход использован в разработанной методике замены структурных неоднородностей эквивалентными эллиптическими отверстиями, которая позволяет оценить напряженность поля, проникающего через неоднородности типа "отверстие" и "щель", с достаточно высокой точностью. Далее рассмотрим основные положения разработанной методики оценки влияния структурных неоднородностей электромагнитного экрана на его защитные свойства, с учетом внесенных усовершенствований.

2. Методика замены неоднородностей эквивалентными эллиптическими отверстиями. Рассматриваемая методика применима для оценки уровня электрического (магнитного) поля внутри металлического корпуса при помещении его в квазистационарное электрическое (магнитное) поле и позволяет учитывать влияние неоднородностей типа "отверстие" и "щель".

Условия квазистационарности в таком случае накладывают ограничение на линейные размеры неоднородностей, которые должны быть значительно меньше длины волны внешнего электромагнитного поля. Поскольку электромагнитный экран оказывает различное влияние на электрическую и магнитную составляющие электромагнитного поля, то в квазистационарном приближении задачу электромагнитного экранирования можно разделить на две независимые задачи: задачу экранирования электрического поля и задачу экранирования магнитного поля.

Для применения методики должна также существовать возможность рассчитать, измерить или оценить экспертно напряженность поля в точке, совпадающей с центром неоднородности, в предположении, что экран является однородным.

Перечисленные условия достаточно легко выполняются в большинстве случаев экранирования РЭО, в том числе при экранировании узлов ТКС, поэтому данная методика, в частности, может быть использована для приближенного аналитического расчета коэффициента экранирования шасси радиоэлектронного оборудования узла ТКС.

Методика предполагает следующую последовательность действий:

1. Изначально необходимо классифицировать неоднородности по их форме, относя их либо к группе 1 ("отверстия"), либо к группе 2 ("щели"), определяя координаты центра каждой неоднородности (X_i , Y_i , Z_i). Критерием для классификации неоднородностей является отношение минимального размера неоднородности к максимальному ($P = b / a$) (рис. 2).

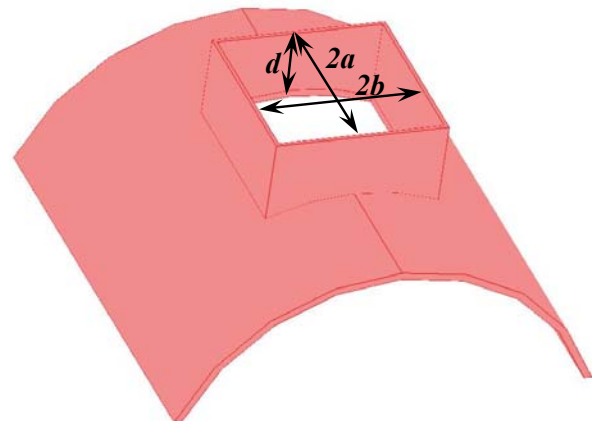


Рис. 2. Геометрические параметры отверстия с экранирующей насадкой

2. Каждую неоднородность, вне зависимости от группы, заменить эквивалентным эллиптическим отверстием. Порядок замены для отверстий (группа 1) таков:

- определить площадь реального отверстия (S);
- определить толщину экрана в районе реального отверстия, либо определить длину специальной экранирующей насадки (d) (см. рис. 2);
- полуосям эквивалентного эллиптического отверстия большей (a) и меньшей (b) соответственно присвоить значения:

$$a = \sqrt{\frac{S}{\pi P}}, \quad (1)$$

$$b = \sqrt{\frac{PS}{\pi}}. \quad (2)$$

- геометрический центр эквивалентного эллиптического отверстия совместить с центром реального отверстия.

3. Для каждой щели (группа 2) определить:

- ширину щели ($2b$);
- длину щели ($2a$);
- толщину экрана в районе щели (d), либо длину специальной экранирующей насадки (по аналогии с отверстиями произвольной формы)

После того, как рассчитаны параметры эквивалентных эллиптических отверстий, которыми будут заменены реальные неоднородности, переходят непосредственно к решению задач влияния рассматриваемых неоднородностей на защитные свойства электромагнитного экрана, при воздействии на него электрического и/или магнитного поля.

Для этого внутри экранируемой области размещают произвольное число рассматриваемых точек с координатами X_j, Y_j, Z_j . При задании координат следует учитывать, что и координаты центров реальных неоднородностей корпуса и координаты рассматриваемых точек задаются в единой трехмерной декартовой системе координат, причем точку начала координат выбирают произвольно.

3. Расчет электрического поля внутри корпуса.

Напряженность электрического поля в каждой из рассматриваемых точек внутри экранируемой области рассчитывается как суперпозиция полей, проникающих через каждую из рассматриваемых неоднородностей:

$$E_j = \sum_{i=1}^N E_r^i, \quad (3)$$

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, проникающего через i -тую неоднородность корпуса.

$$E_r^i = \frac{E_0}{2E(k)} \left\{ E(\varphi, k) - \frac{r \cdot a}{\sqrt{(r^2 + a^2)(r^2 + b^2)}} \right\} e^{-\alpha d}, \quad (4)$$

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; $E(\varphi, k), E(k)$ – 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.

$$\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{a^2}{r^2 + a^2}}, \quad (5)$$

$$k^2 = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}. \quad (7)$$

Расстояние между двумя точками в трехмерной декартовой системе координат определяется соотношением:

$$r = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2}. \quad (8)$$

Для полного эллиптического интеграла приближенное выражение, погрешность которого не превышает 5 % во всем диапазоне изменения модуля, имеет следующий вид [6]:

$$E(k) \approx 1 + 0,5k', \quad (9)$$

где $k' = b/a$ – дополнительный модуль эллиптического интеграла.

Неполный интеграл может быть заменен приближенным выражением, погрешность которого не превышает 10 % во всем диапазоне изменения параметров [6]:

$$E(\varphi, k) \approx \frac{k^2 \cdot r \cdot a}{4(a^2 + r^2)} + \left(1 - \frac{k^2}{4}\right) \operatorname{arctg} \frac{a}{r}. \quad (10)$$

Значения напряженности электрического поля E_0 в каждой точке, совпадающей с центром реальной неоднородности, получаются из решения соответствующих задач рассеяния на однородных корпусах. Значения могут быть оценены экспертно.

Математические выкладки, лежащие в основе приведенной методики расчета напряженности электрического поля, проникающего сквозь структурные неоднородности корпуса, подробно изложены и обоснованы в [4]. Отметим, что в формуле (4) следовало бы записать не модули вектора E , а сами вектора. Однако, это существенно усложняет процесс вычислений, не приводя к значимому изменению результата для практически важных случаев. К тому же, как правило, интерес представляют оценки максимального уровня напряженности проникшего поля.

4. Расчет магнитного поля внутри корпуса. Напряженность магнитного поля в каждой из рассматриваемых точек внутри экранируемой области рассчитывается как суперпозиция полей, проникающих через каждую из рассматриваемых неоднородностей:

$$H_j = \sum_{i=1}^N H_r^i, \quad (11)$$

где H_j – напряженность магнитного поля в j -той рассматриваемой точке внутри экранируемой области; N – количество рассматриваемых структурных неоднородностей экрана; H_r^i – напряженность магнитного поля, проникающего через i -тую неоднородность корпуса.

$$H_r^i = \frac{H_{0x}}{2D(k)} \cdot D(\varphi, k) \cdot e^{-\beta d}, \quad (12)$$

где H_{0x} – вектор напряженности внешнего магнитного поля, направленный вдоль большей оси эквивалентного эллиптического отверстия.

H_{0x} равен модулю тангенциальной составляющей к поверхности объекта в точке, совпадающей с центром отверстия. Значения напряженности магнитного поля H_{0x} в каждой точке, совпадающей с центром реальной неоднородности, получаются из решения соответствующих задач рассеяния на однородных корпусах. Значения могут быть оценены экспертно.

$D(\varphi, k), D(k)$ – неполный и полный эллиптические интегралы, $D(k) = D(\pi/2, k)$,

$$D(\varphi, k) = \int_0^\varphi \frac{\sin^2 \varphi d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (13)$$

где φ – аргумент эллиптического интеграла, вычисляемый по формуле (5); k^2 – модуль эллиптического интеграла, вычисляемый по формуле (6).

β – декремент затухания магнитного поля

$$\beta = \frac{1,84}{a}. \quad (14)$$

При расчете напряженности магнитного поля, проникающего через неоднородность типа "щель" (группа 2), неполный и полный эллиптические интегралы можно рассчитать по приближенным формулам:

$$D(k) = \ln\left(\frac{4a}{b}\right) - 1 + 0,75\left(\ln\left(\frac{4a}{b}\right) - \frac{4}{3}\right)\left(\frac{b}{a}\right)^2, \quad (15)$$

$$D(\varphi, k) = \ln\left|\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)\right| - \sqrt{\frac{a^2}{a^2 + r^2}}. \quad (16)$$

Аналитических формул для расчета декремента затухания для щели конечной длины, пока не получено, поэтому, в данной методике ослабление магнитного поля за счет конечной толщины экрана для неоднородностей типа "щель" не учитывается ($\beta=0$).

Математические выкладки, лежащие в основе приведенной методики расчета напряженности магнитного поля, проникающего сквозь структурные неоднородности корпуса, подробно изложены и обоснованы в [5].

5. Компьютерная программа Screening Orifices Analytics. Приведенная методика замены реальных неоднородностей корпуса эквивалентными эллиптическими отверстиями, по сравнению с численными методами, значительно упрощает учет влияния структурных неоднородностей экрана на его защитные свойства, тем не менее, она все же требует проведения достаточно большого объема вычислений, которые являются однотипными для каждой из рассматриваемых неоднородностей. Ввиду этого, применение данной методики на практике до последнего момента было сопряжено с рядом сложностей, среди которых можно выделить следующие:

- большие трудозатраты по расчету влияния структурных неоднородностей на защитные свойства экрана;
- сложность вычислений значений несобственных интегралов;
- высокая вероятность возникновения ошибок, вызванных влиянием человеческого фактора.

Использование вычислительных ресурсов ПК позволяет упростить практическое применение данной методики и решить перечисленные проблемы.

Компьютерная программа Screening Orifices Analytics (SOA) (рис. 3), в основу которой положена усовершенствованная методика замены реальных структурных неоднородностей эквивалентными эллиптическими отверстиями, приведенная выше, позволяет оценить и прогнозировать влияние структурных неоднородностей на защитные свойства проводящих экранов.

Программа дает возможность:

- выполнять расчет напряженности электрического (магнитного) поля в произвольном числе точек внутри экранируемой области;
- работать с корпусами-экранами произвольной формы;
- учитывать неограниченное число неоднородностей;
- учитывать толщину экрана или длину специальной экранирующей насадки для отверстий произвольной формы, как для магнитного, так и для электрического поля, что является усовершенствованием исходной

методики.

Следует также отметить, что программа применима для различных форм внешнего поля, как для гармонических, так и для импульсных полей. Однако в последнем случае, необходимо работать с амплитудным значением напряженности поля. Причем, форма поля, проникающего через неоднородности указанных типов, будет совпадать с формой внешнего поля. Для проверки соблюдения условий квазистационарности, в этом случае необходимо выделить частоту, на которой излучается основная энергия внешнего поля.

Максимальная автоматизация пользовательских операций дает возможность снизить временные затраты, необходимые для решения поставленной задачи по оценке влияния неоднородностей экрана.

SOA может использоваться как самостоятельно, так и в составе более сложных программно-аппаратных комплексов. Единственным требованием в таком случае является корректное сопряжение интерфейсов входных и выходных данных.

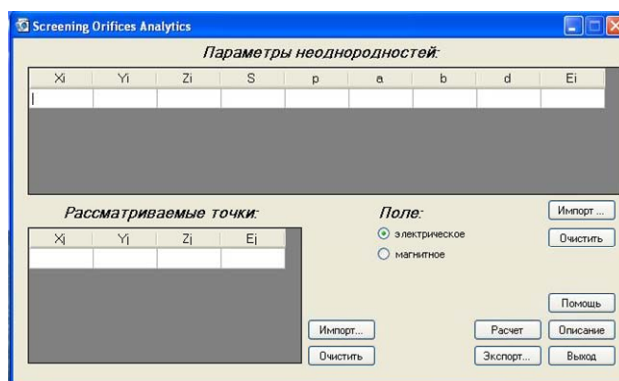


Рис. 3. Главное окно программы Screening Orifices Analytics

На сегодняшний день программа имеет русский и английский пользовательские интерфейсы, однако перечень локализаций может быть легко расширен пользователем, следуя инструкциям, изложенным в руководстве.

Контроль значений, вводимых пользователем для таких величин как площадь реального отверстия, соотношение сторон, значения длины сторон и т.д. позволяет повысить достоверность результатов расчета.

Среди ограничений SOA, связанных напрямую с ограничениями рассмотренной методики, можно выделить следующие: программа учитывает только влияние неоднородностей типов "отверстие" и "щель" и неприменима для расчета влияния других типов неоднородностей. А при расчете напряженности магнитного поля внутри экранируемой области, учитывается только проникновение поля через неоднородности. Проникновение магнитного поля через однородные стенки экрана не учитывается.

Также программа не учитывает эффекты резонанса, которые могут возникать при воздействии на корпус внешнего поля с определенной частотой.

Отдельно следует остановиться на возможностях программы по интеграции как структурного блока в существующие системы моделирования. Теоретически программа легко интегрируется в любую систему численного или аналитического моделирования, где

необходимо оценить влияние структурных неоднородностей корпуса на его экранирующие свойства. В таком случае, функционально программу можно представить как единый блок, имеющий два входящих и один исходящий потоки данных (рис. 4).

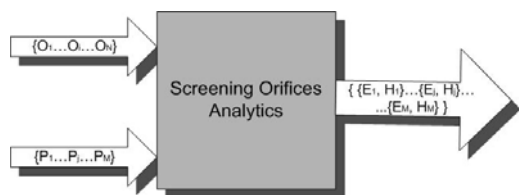


Рис. 4. Функциональная схема программы при интеграции в сложные системы

$\{O_1...O_N\}$ – множество структурных неоднородностей экрана, каждый элемент множества является множеством параметров данной неоднородности:

$$O_i = \{X_i, Y_i, Z_i, (S_i, P_i) v (a_i, b_i), d_i, E_{0i}, H_{0i}\}.$$

$\{P_1...P_M\}$ – множество рассматриваемых точек внутри экранируемой области, в которых необходимо получить значение напряженности электрического (магнитного) поля, каждый элемент множества является множеством координат точки:

$$P_j = \{X_j, Y_j, Z_j\}.$$

Выходной поток представляет собой множество структур вида $\{E_j, H_j\}$. Размер множества структур равен числу рассматриваемых точек внутри экранируемой области. При этом, E_j – напряженность электрического поля в j -той рассматриваемой точке; H_j – напряженность магнитного поля в j -той рассматриваемой точке.

6. Проверка работоспособности программы.

Размеры данной статьи не позволяют привести детальный сравнительный анализ разработанной методики, реализованной в SOA, по отношению к существующим методикам численного моделирования, например, FEM, реализованной в пакете COMSOL Multiphysics 3.5. Такой анализ будет проведен в одной из последующих статей, здесь же следует сказать, что программа Screening Orifices Analytics использована автором для создания гибридной системы численно-аналитического моделирования задач электромагнитного экранирования на базе пакета COMSOL Multiphysics 3.5. В данной системе, пакетом численного моделирования COMSOL Multiphysics 3.5 решается внешняя задача – расчет значений напряженности составляющих помехонесущего электромагнитного поля на поверхности металлического объекта (однородного экрана).

Результаты решения внешней задачи служат входными данными для программы Screening Orifices Analytics, которая затем выполняет расчет электромагнитного поля в заданных точках внутри экранируемой области с учетом группы различных неоднородностей в структуре экрана.

Погрешность полученных результатов не превышает 20 % по сравнению с результатами моделирования аналогичной задачи экранирования, полученными при решении задачи исключительно средствами COMSOL Multiphysics 3.5. В то же время, объем вычислительных ресурсов, в частности ОЗУ, необходимых для решения задачи гибридным методом на несколько порядков ниже, чем при численном решении задачи.

Выводы. Разработанная методика позволяет выполнять оценку влияния неоднородностей типа "отверстие" и "щель" в структуре электромагнитного экрана на его защитные свойства. При этом погрешность полученных решений не превышает 20 %, что является допустимым при решении инженерных задач.

Требования, предъявляемые методикой к исследуемому экрану, допускают ее применение для моделирования задач электромагнитного экранирования широкого класса РЭО, в том числе для анализа существующих, а также на этапе проектирования новых шасси узлов ТКС. Разработанная программа Screening Orifices Analytics позволяет автоматизировать основные действия по расчету влияния структурных неоднородностей на защитные свойства проводящих экранов, а за счет контроля пользовательского ввода позволяет снизить вероятность ошибки вследствие человеческого фактора, что вместе с гибкостью превращает ее в мощный инструмент, применимый в самых различных областях науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. Под ред. В. И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с. ил.
2. 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.
3. Ивкин В.Г., Трифонов Е.Е. Методы и средства защиты от помех в электрофизических установках – Л.: Препринт Г – 0533 НИИ ЭФА, 1982. – 44 с.
4. Князев В.В. Аналитическое решение задачи проникновения электрического поля через эллиптическое отверстие в проводящей плоскости // Вестник НТУ "ХПИ". Сб. научн. трудов. Тем. вып.: "Энергетика и преобразовательная техника". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2004. – № 35. – с. 71-82.
5. Князев В.В. Аналитическое решение задачи проникновения высокочастотного магнитного поля через эллиптическое отверстие в проводящей плоскости // Вестник НТУ "ХПИ". Сб. научн. трудов. Тем. вып.: "Техника и электрофизика высоких напряжений". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – № 37. – с. 19-29.
6. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы: Пер. с нем. / Вып. 2 / Под ред. Н.Х. Розова. – М.: Наука, 1968. – 344 с.

Поступила 21.06.2010

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

A.Y. Skoblikov Methods of estimation of influence of structural heterogeneity of electromagnetic screen on his protective properties

The methods of analytical calculation of the electromagnetic field, penetrating into a corps-screen through his structural to heterogeneity are worked out. Methods take into account the arbitrary form of structural heterogeneity and thickness of wall of screen. The computer program is worked out, realizing methods for the arbitrary number of structural неоднородностей types "opening" and "crack".

Key words – electromagnetic field, corps-screen through his structural, structural heterogeneity.