

РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ АСОНИКА-ЭМС ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОБЛЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

© Авторы, 2011

О.Е. Куликов – аспирант, ассистент, кафедра «Приборостроение»,
Ковровская Государственная Технологическая Академия им. В.А. Дегтярева
E-mail: oleg.kulikov.inc@gmail.com

А.С. Шалумов – Генеральный директор ООО «CALS-технологии», д.т.н., профессор,
зав. кафедрой информационных технологий, Владимирский филиал
Российской академии государственной службы при Президенте Российской Федерации
E-mail: ALS140965@mail.ru

Рассмотрены основные концепции электромагнитной совместимости (ЭМС) электронной аппаратуры (ЭА). Поставлена задача замены натуральных испытаний на ЭМС компьютерным моделированием. Рассмотрены алгоритм создания модели ЭА и разработка подсистемы АСОНИКА-ЭМС для проведения моделирования.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электронная аппаратура, электромагнитные воздействия, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

The article deals with basic concepts of electromagnetic compatibility (EMC) of electronic equipment (EE), seeks to replace full-scale tests on the EMC computer simulation, the algorithm of model creation and development of the ASONIKA-EMC subsystem for EMC simulation.

Keywords: electromagnetic compatibility, electronic equipment, electromagnetic effects, computer simulation, finite element method.

Введение

Электромагнитная совместимость (ЭМС) определяется как «способность устройства, оборудования или системы функционировать удовлетворительно в их электромагнитной обстановке, не создавая недопустимых электромагнитных помех чему-либо в этой обстановке» [1].

В концепции ЭМС выделяются источники и рецепторы помех, а также среда распространения помех от источника к рецептору. В общем случае источник помеховых электромагнитных возмущений может находиться как вне рассматриваемой электронной системы, так и внутри нее. В этом случае одна часть системы будет выступать в качестве источника, а другая – в качестве рецептора [2].

На все функционирующие радиоэлектронные устройства могут действовать два типа электромагнитных помех (ЭМП): естественного и искусственного происхождения. Их источниками являются различные явления природного характера и системы и оборудование, созданные человеком (рис. 1).

В любом случае источник возбуждает электромагнитное поле с определенной частотой или, что наиболее типично, в широком диапазоне частот. При взаимодействии переменного электромагнитного поля с цепями электронного средства, имеющими вполне конкретную физическую реализацию, в этих цепях наводятся токи и напряжения соответствующих интенсивностей. При превышении наведенными токами и напряжениями определенных пороговых уровней в рецепторе происходят события, приводящие к нарушениям функционирования.

Источники и рецепторы помех могут иметь различные механизмы связи. Механизмом связи называют физический принцип передачи энергии электромагнитных процессов от источника к рецептору помех. Рис. 2 дает представление о принципиально возможных механизмах связи.

Гальваническая связь осуществляется через ток или напряжение. Связи через электрическое поле и через магнитное поле относятся к квазистатическому диапазону, когда электрическое и магнитное поля независимы друг от друга. Связь через излучение возникает, если приемник находится в дальнем поле, а электрическое и магнитное поля возникают одновременно и связаны между собой.

Помимо механизмов различают пути связи. Помехи могут проникать в устройство или, наоборот, передаваться в окружающую среду различными путями (рис. 3):

в виде гальванической связи через сеть электроснабжения, информационные входы и выходы, через систему заземления, через разряды атмосферного и статического электричества;
 в виде емкостной, магнитной и электромагнитной связей через поля в окружающем пространстве.

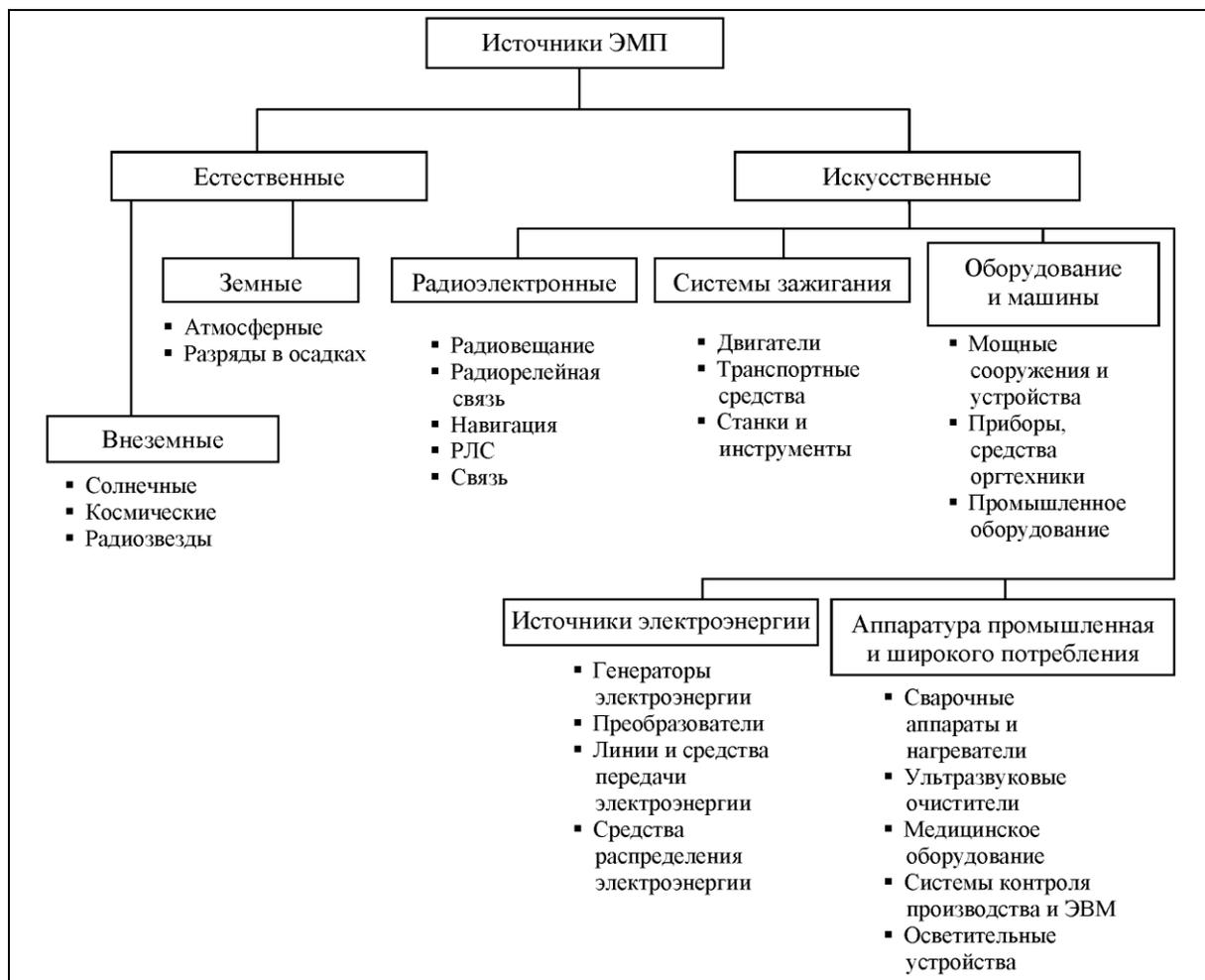


Рис. 1. Виды источников ЭМП [3]

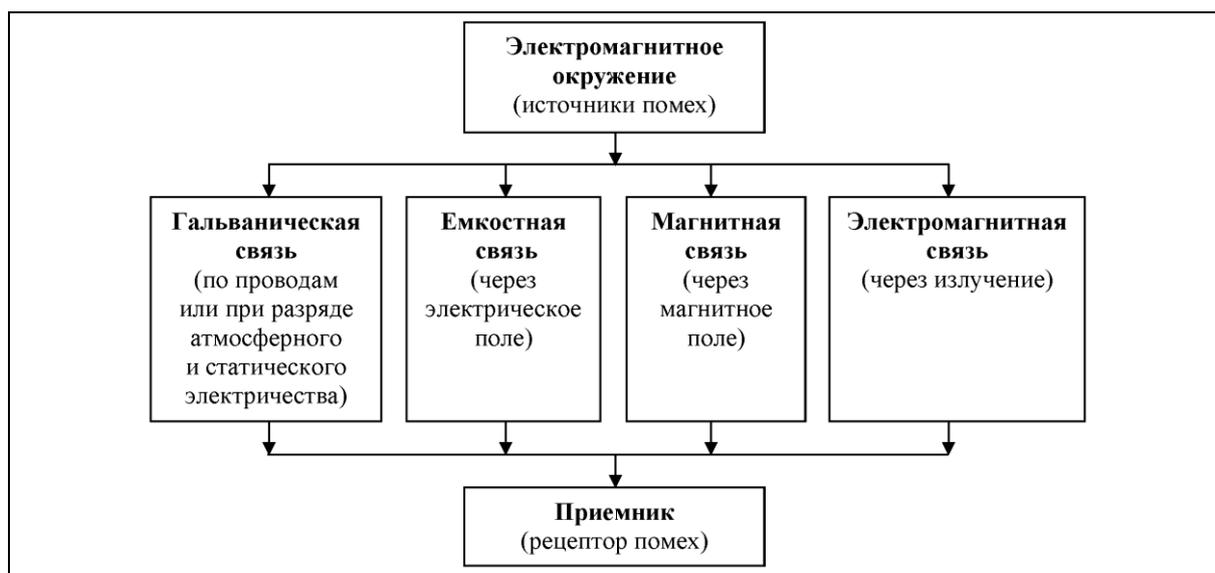


Рис. 2. Механизмы связи источников и приемников помех

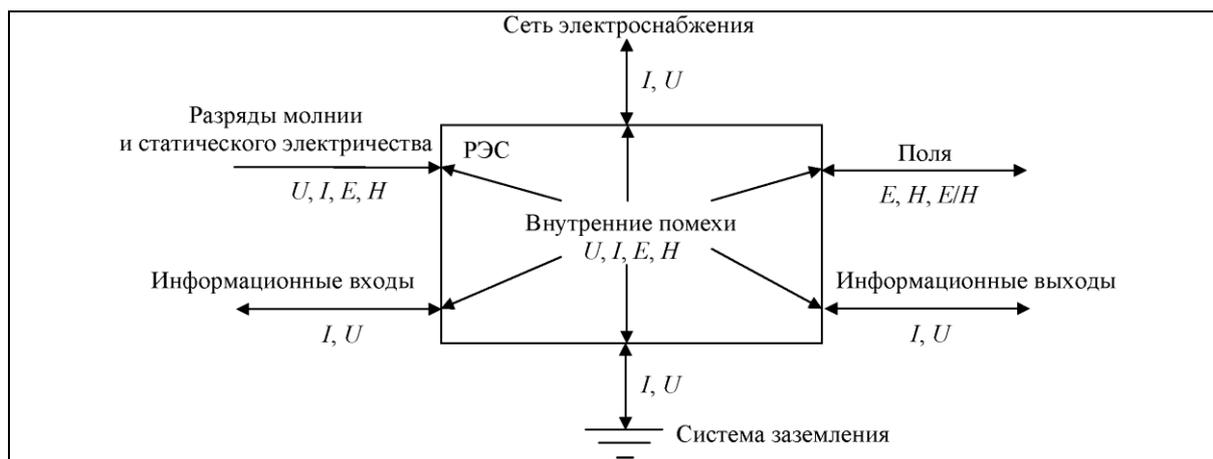


Рис. 3. Пути проникновения и излучения помех в электронное устройство: I, U – ток и напряжение (гальваническая связь); $E, H, E/H$ – электрическое, магнитное и электромагнитное поля

На практике в большинстве случаев действуют одновременно несколько путей связи, и один путь может содержать несколько механизмов связи, что существенно затрудняет правильное объяснение появления помех.

В настоящее время вследствие постоянного увеличения количества разнообразной электронной техники все большее значение приобретают проблемы защиты радиоэлектронной аппаратуры от внешних электромагнитных воздействий, так как в окружающей среде становится все больше и больше источников электромагнитных помех и минимизации помех, создаваемых аппаратурой. Восприимчивость к помехам сегодня является основной проблемой электронных устройств многих видов, особенно тех, для которых обеспечение нормального функционирования является жизненно важным по причинам, связанным с безопасностью (например, системы управления полетами) или экономикой (банковское дело и телекоммуникационные сети) [4].

Испытания на ЭМС и устойчивость к электромагнитным воздействиям

При проектировании электронной аппаратуры (ЭА) принципиально невозможно добиться ее полной защиты от всех электромагнитных воздействий и исключения создаваемых ею помех. Однако можно спроектировать изделие так, что оно будет функционировать в 80...90 % случаев и не создавать помех другим устройствам, т.е. защищая изделие от внешних электромагнитных возмущений, мы, тем самым, одновременно препятствуем выходу помех, создаваемых устройством, во внешнюю среду.

В общем случае, техническое задание на разрабатываемое устройство содержит требования на помехоустойчивость и помехоэмиссию согласно ГОСТ и ОСТ. Для различных областей техники существуют соответственно различные стандарты, объединенные названием «Совместимость технических средств электромагнитная».

Согласно требованиям ГОСТ 29073-91, технические средства должны сохранять работоспособность в условиях эксплуатации при воздействии электромагнитных помех, создаваемых промышленным оборудованием различного назначения, сетью электропитания, молниевыми и электростатическими разрядами [5]. К электромагнитным помехам относятся [1]:

прерывания, провалы, выбросы и колебания напряжения электропитания;

переходные (импульсные) напряжения в линиях электропитания, сигнальных линиях и линиях управления;

радиочастотные электромагнитные поля как импульсного характера (создаваемые радиолокационными станциями), так и непрерывные, воздействующие непосредственно на оборудование или на присоединенные кабели;

электростатические разряды (ЭСР), создаваемые заряженными объектами или людьми;

низкочастотные электрические или магнитные поля.

Таким образом, перед проектировщиком стоит задача на раннем этапе проектирования, на стадии технического проекта, проанализировать устойчивость создаваемой аппаратуры к электромагнитным

помехам указанных видов. Устойчивость ЭА к помехам зависит от качества фильтрации входных сигналов управления и питания (импульсные электромагнитные помехи, динамические изменения напряжения сети электропитания), качества экранирования (излучаемые радиочастотные электромагнитные помехи) и качества заземления (помехи, генерируемые электростатическими разрядами) [6].

Проанализировать устойчивость ЭА к воздействию ЭМП можно двумя путями: путем постановки эксперимента (натурных испытаний) и путем математического моделирования.

Методика проведения испытаний на воздействие ЭМП и необходимое для этого оборудование подробно описаны в соответствующих ГОСТ и ОСТ [5,7,8,9,10,11]. В общем случае, для проведения испытаний опытный образец проектируемого изделия помещается в соответствующую электромагнитную обстановку (ЭМО), которая оказывает на него некоторое влияние. Целью испытаний является задача определить, может ли изделие функционировать надлежащим образом в соответствующей ЭМО.

Несомненным достоинством натурных испытаний на воздействие ЭМП является достоверность полученных результатов. В настоящее время только положительные результаты испытаний согласно ГОСТ в аттестованной государством лаборатории являются основанием для выдачи производителю изделия сертификата соответствия требованиям ЭМС.

Однако для решения комплексной задачи обеспечения стойкости проектируемой ЭА к электромагнитным воздействиям не достаточно лишь проведения испытаний на этапе опытного образца. Спектр электромагнитных воздействий при испытаниях может быть не совсем полным, не учитывать специфики конкретной ЭМО, в которой предполагается эксплуатировать изделие [12]. К тому же испытания на стойкость к ЭМП в большинстве случаев выявляют несоответствие проектируемой ЭА требованиям ГОСТ. Вследствие этого разработчикам приходится вносить соответствующие изменения в конструкцию либо электрическую схему изделия (зачастую и в конструкцию, и в электрическую схему), вновь изготавливать доработанный образец и подвергать его испытаниям. Такая процедура может повторяться не один раз, что приводит к очень большим затратам времени (до нескольких лет) и денежных средств (до нескольких миллионов рублей) [13].

Альтернативой такому подходу является математическое моделирование паразитных электромагнитных процессов, происходящих в ЭА. Достоинствами математического моделирования являются прежде всего его дешевизна по сравнению с натурными испытаниями, ведь не нужно изготавливать опытный образец; скорость – вносить изменения в схему и конструкцию можно за несколько часов, ведь изменяется только модель; также возможно значительное сокращение персонала, занятого на испытаниях – все работы по моделированию может выполнять один человек должной квалификации. Однако применение моделирования электромагнитных процессов требует очень тщательного выбора метода математического моделирования и программного обеспечения, его реализующего, и правильной постановки задачи. В случае неправильного выбора метода либо неправильной постановки задачи можно получить расхождение с экспериментом на несколько порядков [14].

В общем случае, оценка влияния внешнего электромагнитного поля на исследуемое изделие сводится к решению граничных задач электродинамики – т.е. задач о распространении электромагнитных волн в неоднородной среде.

На данный момент на мировом рынке представлено около 150 различных программ и программных комплексов, так или иначе решающих задачи электродинамики [15]. Среди них имеются как узкоспециализированные инструменты, призванные решать конкретную задачу или класс задач (например, расчет антенн в программе MAGMAS 3D [16]), так и поистине универсальные программные комплексы, охватывающие практически весь спектр задач электродинамики, вплоть до расчета заряженных частиц (CST STUDIO SUITE [17]).

На сегодняшний день все четче отслеживается тенденция к сокращению числа узкоспециализированных программ, решающих задачи электродинамики, к расширению спектра решаемых задач, к усложнению пользовательского интерфейса, и как следствие, существенному увеличению цены на программное обеспечение (ПО), а также значительному увеличению времени, необходимого инженеру, чтобы начать эффективно использовать тот или иной программный комплекс. Анализ существующих решений на рынке программного обеспечения также показал, что на данный момент отсутствуют программные комплексы, специализированные под задачи ЭМС.

Постановка задачи исследования

Таким образом, актуальной становится задача создания программного комплекса, позволяющего на уровне пользователя-разработчика ЭА быстро решать наиболее распространенные задачи по обеспечению стойкости ЭА к внешним электромагнитным воздействиям, удобного в работе и простого в изучении, и оперативно в процессе разработки принимать решение о внесении изменений в конструкцию. В работе рассматривается методическое, лингвистическое и программное обеспечение, разработанное для решения задачи определения эффективности экранирования корпусом ЭА внешнего радиочастотного электромагнитного поля.

Для того чтобы решить эту задачу, необходимо создать модель, в которой бы нашли отражение все необходимые для электродинамического моделирования параметры реальной ЭА, такие как ее пространственная конструкция, электрофизические параметры материалов, из которых состоит ЭА, а также параметры воздействия и граничные условия. Затем необходимо произвести разбиение объема модели на конечные элементы, с условием соответствия конечно-элементной модели исходной. На сегодняшний день не существует методики автоматизированного синтеза моделей ЭА для анализа эффективности экранирования. Все современные программные комплексы предлагают пользователю самостоятельно настраивать все параметры модели, что, с одной стороны, позволяет проводить более тонкую настройку, а с другой – для изучения всех возможных настроек и параметров требуется длительное время, что является серьезным недостатком.

Поэтому, для того чтобы написать эффективную программу для расчета экранов, необходимо сначала разработать методику создания модели ЭА, пригодной для анализа.

Методика создания модели ЭА

Эффективность экранирования электрического поля вычисляется с помощью следующей формулы [18]:

$$S = 20 \lg \frac{E_0}{E_3}, \quad (1)$$

где E_0 – напряженность электрического поля в отсутствие корпуса; E_3 – напряженность электрического поля внутри корпуса. Аналогично определяется эффективность экранирования для магнитного поля. Таким образом, чтобы определить эффективность экранирования, необходимо найти напряженность электрического и магнитного полей вне и внутри пространства корпуса. Для решения такой задачи в трехмерной структуре необходимо использовать один из численных методов электродинамики. В работе применяется метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM) [15].

Создание трехмерной модели конструкции ЭА

Применяющаяся в современной технике ЭА представляет собой довольно сложные конструкции (рис. 4), состоящие из двух и более крышек, имеющие скругления, ребра, отверстия произвольной формы, проушины для крепления. Такую модель очень проблематично использовать непосредственно для расчета, так как она содержит большое число деталей, размер которых мал по сравнению с размером всей модели. Наличие таких деталей потребует огромного числа конечных элементов (порядка нескольких миллионов), что делает невозможным расчет такой модели в приемлемые сроки на современных рабочих станциях. Поэтому перед инженером-расчетчиком стоит нетривиальная задача создания модели ЭА, пригодной для электрофизического моделирования, позволяющей с приемлемой точностью и в разумные сроки провести расчет результата электромагнитных воздействий на

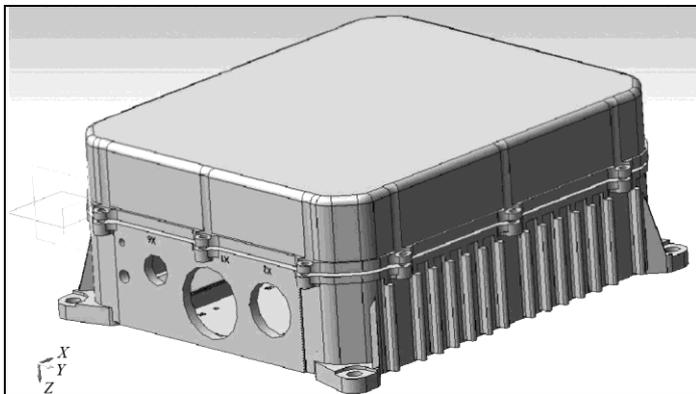


Рис. 4. Внешний вид трехмерной модели корпуса ЭА

прибор. Такие модели не должны быть слишком детальными, а с другой стороны, не должны быть слишком упрощены, в этом случае результаты моделирования и натурального эксперимента могут значительно (на порядок или больше) различаться.

На основе требований, предъявляемых к моделям ЭА различными системами электрофизического моделирования и практическим наблюдениям, описанным в [18] и [2], был разработан алгоритм преобразования трехмерной модели из конструкторской документации в модель, пригодную для расчета методом конечных элементов (рис. 5).

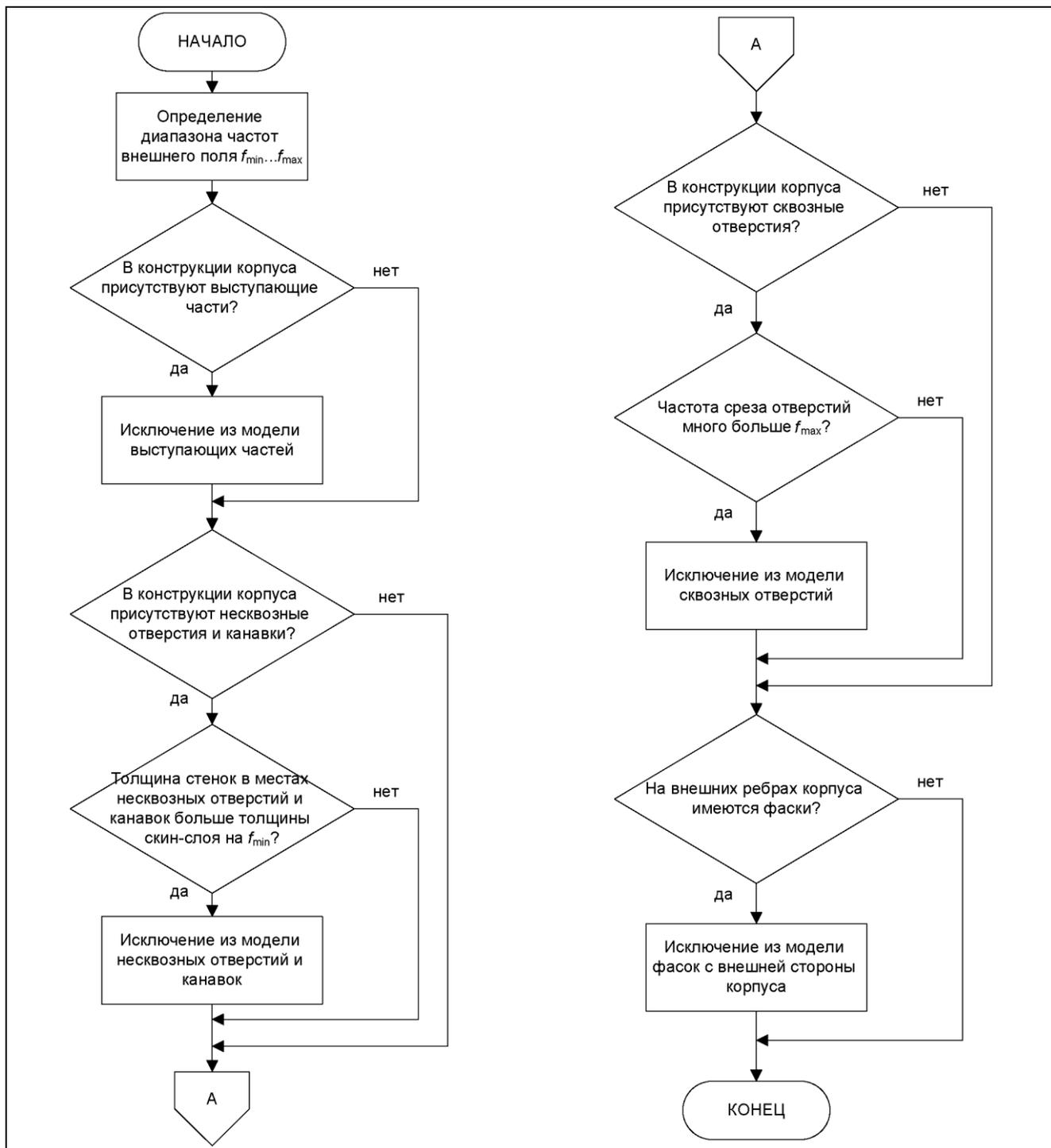


Рис. 5. Алгоритм создания модели корпуса ЭА, предназначенной для расчета эффективности экранирования электромагнитного поля методом конечных элементов

Итак, первым шагом данного алгоритма является определение диапазона частот поля ($f_{\min} \dots f_{\max}$), воздействию которого будет подвергаться данный корпус. Диапазон частот воздействий при испытаниях на устойчивость к электромагнитному полю указан в соответствующих ГОСТ по ЭМС (см. например, [11]). Для каждого типа аппаратуры (оборудование информационных технологий или электроэнергетическое оборудование) и места ее применения (на подвижном объекте или стационарно) существует соответствующий стандарт, определяющий диапазон частот воздействующего электромагнитного излучения.

Вторым шагом является исключение из трехмерной модели корпуса выступающих частей. Такими частями обычно бывают ребра охлаждения, ручки для переноски, проушины для крепления и т.п. Выступающие части не оказывают влияния на поле внутри корпуса, поэтому их можно смело исключать из модели для уменьшения числа конечных элементов.

Третьим шагом является анализ сквозных отверстий и различных канавок на стенках корпуса. Если оставшаяся толщина стенки корпуса больше толщины скин-слоя (глубины проникновения поля в металл) на частоте f_{\min} , то данное отверстие можно исключить из модели. Толщина скин-слоя Δ на частоте f считается по следующей формуле [2]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}, \quad (2)$$

где μ и σ – абсолютные магнитная и удельная проводимость металла.

Затем проводится анализ сквозных отверстий в стенках корпуса. Отверстие в металлической стенке представляет собой волноводный фильтр, с частотой среза, рассчитываемой по формулам [2]

$$f_{\text{ср}} = \frac{1,75 \cdot 10^5}{D}, \text{ МГц}; \quad (3)$$

$$f_{\text{ср}} = \frac{1,5 \cdot 10^5}{W}, \text{ МГц}. \quad (4)$$

С помощью (3) можно рассчитать частоту среза для круглого отверстия (D – диаметр отверстия), с помощью (4) – для прямоугольного, где W – наибольший размер.

Если рассчитанная частота среза много больше f_{\max} , то отверстие можно исключить из модели, так как колебания с частотой ниже частоты среза значительно ослабляются и практически не влияют на картину поля внутри корпуса [2]. Например, для круглого отверстия диаметром 5 мм частота среза будет равна 35 ГГц, что значительно превышает максимальную частоту воздействующего поля, которая обычно лежит в пределах 5 ГГц. Таким образом, это отверстие можно исключать из модели.

Если на ребрах исследуемого корпуса имеются фаски, как видно из рис. 1, то в модели, предназначенной для электромагнитного анализа, их делать не стоит, так как это потребует дополнительного числа конечных элементов, что приведет к необоснованному увеличению времени расчета без существенного увеличения точности.

На рис. 6 показана трехмерная модель корпуса прибора, подготовленная к дальнейшим шагам по электродинамическому моделированию.

Также в трехмерную модель конструкции следует включить воздушное пространство как внутри корпуса, так и снаружи. Расстояние от стенок корпуса до границ окружающего воздушного пространства должно быть не менее $1/6\lambda$ на наименьшей частоте [19]. Например, если частота падающей плоской волны равна 1 ГГц, тогда $\lambda = 0,3$ м, следовательно, расстояние до границы воздушного пространства должно составлять 0,05 м.

Следующим шагом по созданию электродинамической модели является назначение электрофизических свойств материалам объемам счетной области.

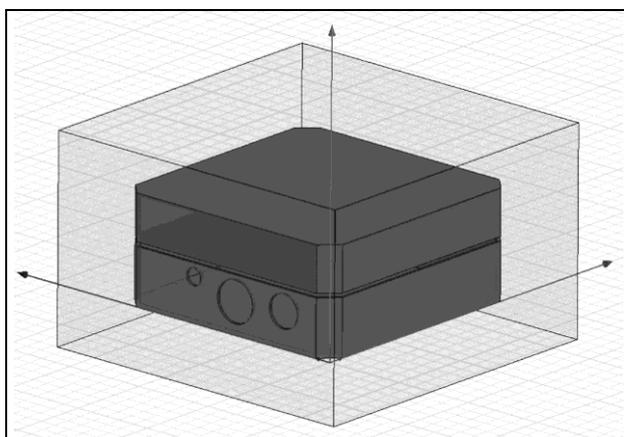


Рис. 6. Трехмерная модель корпуса прибора с окружающим пространством для конечно-элементного расчета

Назначение материалов

Для того, чтобы решить граничную задачу электродинамики, т.е. найти векторы \mathbf{E} , \mathbf{H} , удовлетворяющие в некоторой области уравнениям Максвелла и соответствующим граничным условиям, необходимо знать электрофизические параметры этой области (среды).

Из уравнений Максвелла видно, что в общем случае среда описывается четырьмя тензорами: $\hat{\epsilon}_a$, $\hat{\mu}_a$, $\hat{\sigma}^e$, $\hat{\sigma}^m$. Тензор в данном случае это матрица размерностью 3×3 , связывающая компоненты векторов, определенных в трехмерном пространстве. Запись тензора зависит от того, в какой системе координат это делается. Наиболее распространена прямоугольная система координат с осями Ox , Oy , Oz . В этой системе компоненты тензора характеризуются индексами x , y , z , например:

$$\hat{\epsilon}_a = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Компоненты тензоров $\hat{\epsilon}_a$, $\hat{\mu}_a$, $\hat{\sigma}^e$, $\hat{\sigma}^m$ являются действительными числами, тогда как компоненты тензоров $\hat{\epsilon}_a$, $\hat{\mu}_a$ уже комплексные числа. Мнимые части определяются тензорами электрической и магнитной проводимостей. Они описывают свойство среды рассеивать электромагнитную энергию, т.е. поглощать ее, преобразуя в тепловую энергию [14].

Обычно в программных продуктах, реализующих решение задач электродинамики, тензоры $\hat{\epsilon}_a$, $\hat{\mu}_a$, $\hat{\sigma}^e$, $\hat{\sigma}^m$ для различных материалов содержатся в специальной базе данных, из которой они потом берутся для расчета.

Таким образом, шаг назначения материалов в методике по созданию моделей для расчета эффективности экранирования является не чем иным, как заданием тензоров $\hat{\epsilon}_a$, $\hat{\mu}_a$, $\hat{\sigma}^e$, $\hat{\sigma}^m$ для соответствующих объемов, моделирующих тот или иной материал.

Поверхности и граничные условия на них

Для описания произвольной поверхности вводят локальную систему координат t , s , n как показано на рис. 7 [14].

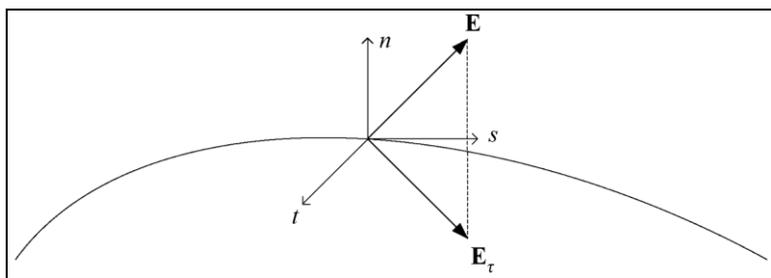


Рис. 7. Поверхность и локальная система координат

Тогда произвольный вектор \mathbf{E} раскладывается на нормальную компоненту E_n и тангенциальный вектор \mathbf{E}_τ , лежащий в плоскости tOs . Тангенциальный (касательный) вектор \mathbf{E}_τ имеет две компоненты E_t , E_s . Граничные условия формулируются обычно для компонент E_t , E_s и аналогично для касательных компонент магнитного поля.

Поверхность раздела двух сред. Граничные условия на поверхности раздела двух сред с разными диэлектрическими и магнитными свойствами, которые могут быть также анизотропными средами, имеют следующий вид:

$$\mathbf{E}_{\tau 1} = \mathbf{E}_{\tau 2}, \quad \mathbf{H}_{\tau 1} = \mathbf{H}_{\tau 2}. \quad (6)$$

Индексы 1,2 соответствуют полям по разные стороны от границы двух сред. Таким образом, касательные компоненты электромагнитного поля на границе раздела сред непрерывны.

Идеальная электрическая и идеальная магнитная стенки. В наиболее простой форме граничные условия записываются для идеализированных поверхностей: идеальной магнитной и идеальной электрической стенок. Идеальная электрическая стенка является моделью поверхности металла без потерь, т.е. металла с бесконечной проводимостью. Для нее граничные условия имеют следующий вид:

$$\mathbf{E}_\tau = 0. \quad (7)$$

Идеальная магнитная стенка является еще более идеализированным объектом. С ее помощью можно было бы моделировать поверхность так называемого идеального магнитного проводника, который имеет бесконечную магнитную проводимость. Однако из-за отсутствия в природе магнитных зарядов магнитные проводники, по крайней мере, пока не известны. Тем не менее, понятие магнитной стенки оказывается полезным при решении электродинамических задач, с ее помощью можно вводить плоскости симметрии модели, то есть считать поле только в одной половине (при центральной симметрии, например). Граничные условия на магнитной стенке имеют следующий вид:

$$\mathbf{H}_\tau = 0. \quad (8)$$

Особенностью идеальных проводников является то, что поле не проникает внутрь таких сред. Это приводит к тому, что поле при пересечении поверхности идеального проводника (и не только) терпит скачок. Появление скачков поля показано на рис. 8, где идеальные проводники располагаются слева. Хорошо видно, что на поверхности идеальной электрической стенки возникает скачок касательного магнитного поля, а касательное электрическое поле непрерывно из-за условия (7). Наоборот, на поверхности магнитного проводника разрывно касательное электрическое поле.

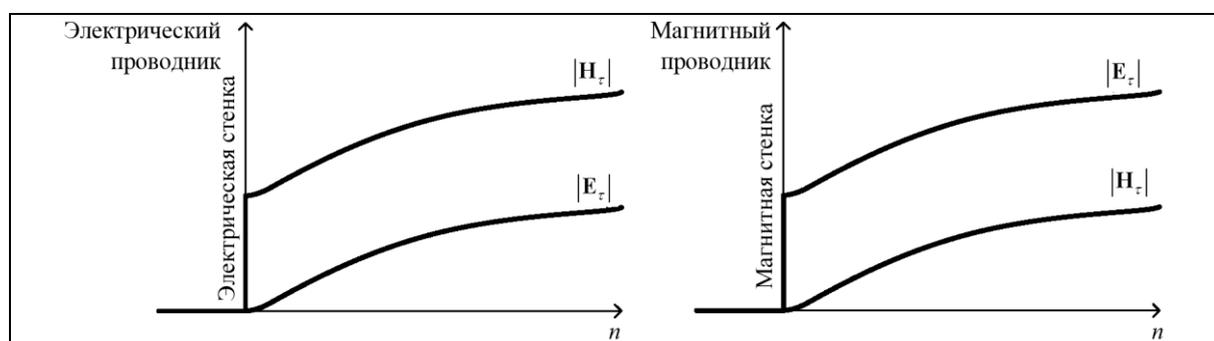


Рис. 8. Поля вблизи поверхности идеальных проводников

В электродинамике разрыв компонент поля эквивалентен появлению токов. В случае разрыва тангенциальных компонент возникают поверхностные токи. На электрической стенке текут электрические токи, а на магнитной – магнитные. Особенностью поверхностных токов является то, что они текут в бесконечно тонком слое, распределенном вдоль поверхности.

Поверхностные токи связаны с тангенциальными компонентами полей следующим образом:

$$\mathbf{j}^e = (\mathbf{n} \times \mathbf{H}_\tau), \quad \mathbf{j}^m = -(\mathbf{n} \times \mathbf{E}_\tau), \quad (9)$$

где $\mathbf{j}^{e,m}$ – плотности поверхностных токов.

Идеально согласованные слои. Говоря о решении задачи нахождения величины поля, наведенного внешним источником в закрытых структурах, какими являются большинство корпусов ЭА, нельзя не упомянуть о проблеме излучения волн в свободное пространство. Дело в том, что число конечных элементов, применяемых в модели, ограничено, т.е. невозможно напрямую смоделировать излучение волн в бесконечность. Поэтому широкое применение в численной электродинамике нашли такие граничные условия, которые поглощают излучаемые, а также переотраженные волны из счетной области. Такие условия получили название идеально согласованных слоев (Perfectly Matched Layers, PML). Условия PML впервые опубликованы в статье [20], а затем получили развитие в последующих публикациях этого автора в 1995–1996 гг.

Источники возбуждения

В тот момент, когда построена трехмерная модель исследуемой области, назначены материалы и граничные условия, встает вопрос о передачи энергии электромагнитной волны в структуру, т.е. о ее возбуждении. В вычислительной электродинамике существует несколько способов ввода энергии в вычислительный объем, зависящих от типа решаемой задачи [4,5,7]: волноводный порт, дискретный порт, па-

дающая волна, источник напряжения, источник тока, внутреннее поле смещения. В задачах нахождения наведенного поля внутри замкнутых структур, какими являются корпуса ЭА, используется только возбуждение падающей волной.

Падающая волна. Падающая (плоская) волна – это волна, которая распространяется в одном направлении и однородна в перпендикулярном направлении к его направлению распространения. Угол, под которым волна падает на структуру, называется углом падения. Уравнение падающей волны имеет следующий вид:

$$\mathbf{E}_{inc} = \mathbf{E}_0 e^{-jk_0(\hat{k}\cdot\mathbf{r})}, \quad (10)$$

где \mathbf{E}_{inc} – падающая волна; \mathbf{E}_0 – вектор поляризации электрического поля; $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ – волновое число свободного пространства; \hat{k} – единичный вектор направления распространения; $\mathbf{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$ – вектор позиции.

Дискретизация пространства счетной области

Как уже было сказано выше, для решения трехмерных задач электродинамики в работе взят метод конечных элементов. Основа метода состоит в том, что пространство разбивается на простейшие элементы, имеющие форму тетраэдров. Размер тетраэдра должен быть достаточно мал для того, чтобы поле в его пределах можно было описать простой функцией или набором функций с неизвестными коэффициентами (появление в счетной области ячеек с размерами большими $\lambda/10$ (λ – длина волны в среде, в которой ищется решение) нежелательно) [14]. Эти коэффициенты ищутся из уравнений Максвелла и граничных условий. В результате электродинамическая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно этих коэффициентов. Решение СЛАУ легко реализуется на ЭВМ [14]. Однако в ходе разбиения форма отдельных элементов структуры искажается. Это относится, в первую очередь, к элементам, имеющим искривленную поверхность. Поэтому ограничения на размер тетраэдра накладывает не только точность определения поля, но и точность аппроксимации исходной структуры новой структурой, составленной из тетраэдров.

Чтобы получить оптимальную сетку, используется итерационный процесс, в котором шаг между ячейками автоматически уменьшается в критических областях. На первом этапе для построения тетраэдров используются вершины объектов анализируемой структуры, которые играют роль вершин тетраэдров. Таким образом, создается начальное разбиение, для которого ищется грубое распределение поля. Анализ этого поля позволяет установить наличие областей, в которых поле имеет большую скорость изменения. После выявления таких областей осуществляется повторное разбиение, которое уже содержит ячейки меньшего размера в критических областях.

При этом в качестве вершин новых тетраэдров используются узлы координатной сетки. Далее электродинамическая задача решается повторно для нового разбиения. Процедура повторяется до полной сходимости процесса [14].

На рис. 9 показан пример дискретизации пространства модели корпуса ЭА.

Таким образом, дискретизация пространства счетной области – самый сложный и ответственный шаг при создании модели для электродинамического анализа, при выполнении которого следует учитывать как геометрические свойства объектов в счетной области (сетка конечных элементов в областях, содержащих острые грани, должна быть плотнее), так и параметры воздействия (не должно быть элементов, размер которых превышает $\lambda/10$).

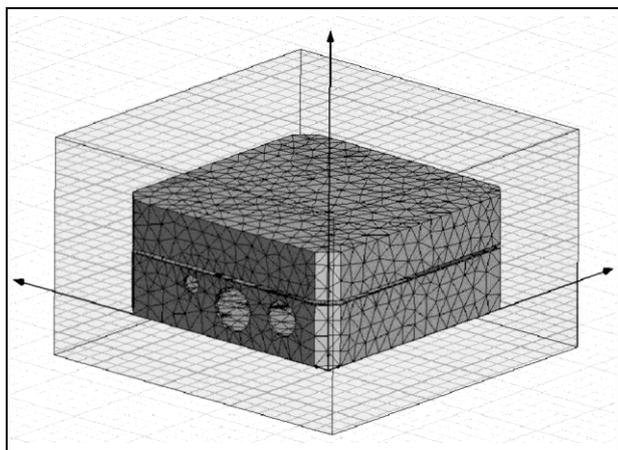


Рис. 9. Пример дискретизации пространства

Выполнение расчета

После выполнения разбиения модели на конечные элементы можно проводить расчет. В зависимости от числа конечных элементов в модели, время расчета может составлять от нескольких минут до нескольких суток и более. Результатом выполнения расчета являются значения напряженности поля в узлах конечно-элементной сетки. Подставляя вычисленные значения напряженности поля для различных частот в формулу (1), получаем график зависимости эффективности экранирования от частоты падающей волны (рис. 10).

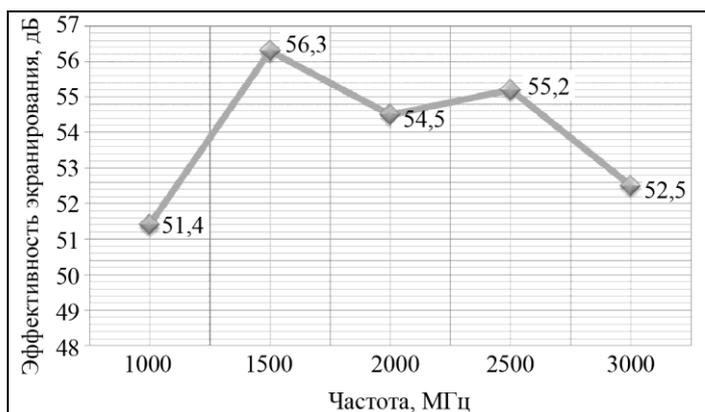


Рис. 10. Эффективность экранирования электрического поля корпусом ЭА

Автоматизация синтеза модели для расчета эффективности экранирования ЭА

Итак, методика создания модели ЭА для расчета эффективности экранирования состоит из следующих этапов:

1. Создание трехмерной твердотельной модели ЭА по приведенному выше алгоритму;
2. Назначение материалов деталям модели (задание тензоров $\hat{\epsilon}_a$, $\hat{\mu}_a$, $\hat{\sigma}^e$, $\hat{\sigma}^m$);
3. Назначение граничных условий на границах раздела сред, а также задание источников возбуждения структуры (в рассматриваемой задаче – плоской электромагнитной волны);
4. Дискретизация счетного пространства конечными элементами;
5. Запуск на расчет.

Каждый из этих этапов при ручном выполнении в программных комплексах электромагнитного моделирования занимает большое количество времени даже у подготовленных специалистов и требует учета множества нюансов. Следовательно, необходимо максимально упростить и автоматизировать процесс синтеза и оптимизации модели, для того чтобы рядовой инженер-конструктор, не знакомый с тонкостями электродинамического моделирования, мог провести анализ эффективности экранирования электромагнитного поля корпусом ЭА а также визуально оценить распределение электромагнитного поля внутри корпуса и на основании этих данных провести оптимизацию конструкции. Предлагаемая схема взаимодействия конструктора с системой моделирования в процессе синтеза модели в терминологии лингвистического обеспечения систем автоматизированного проектирования представлена на рис. 11.

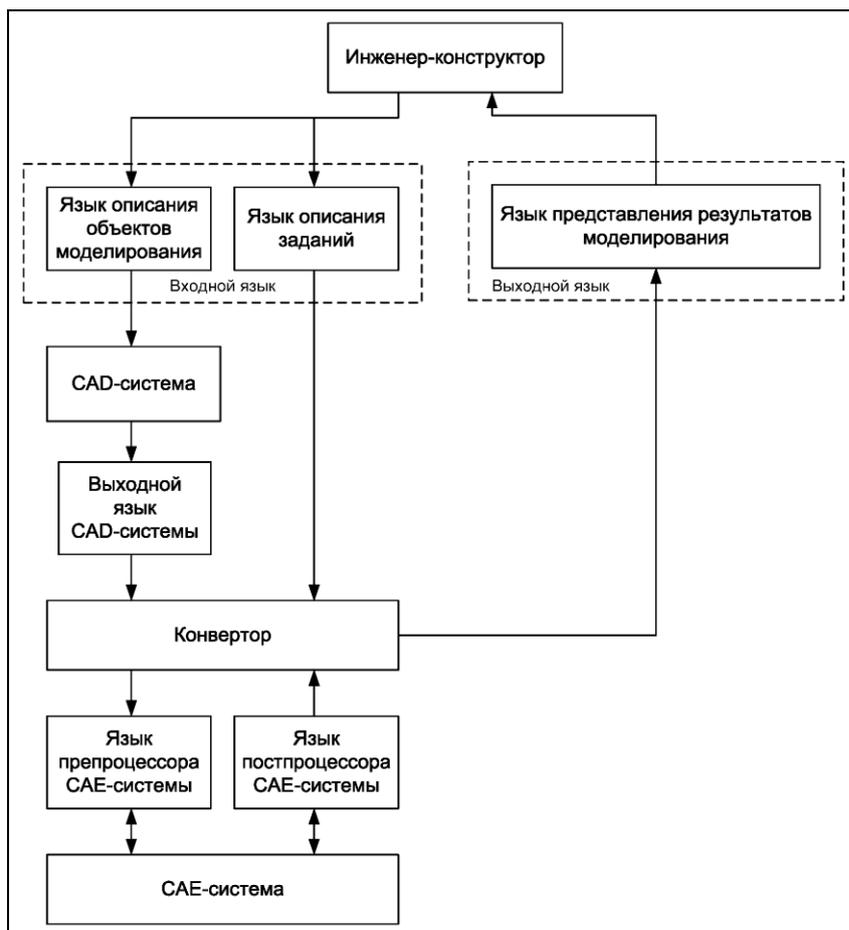


Рис. 11. Схема взаимодействия конструктора с системой моделирования электромагнитных процессов в процессе синтеза модели

Конструктор взаимодействует с конечноэлементной САЕ-системой моделирования (САЕ – Computer Aided Engineering, программное обеспечение для инженерных расчетов) и САД-системой проектирования (САД – Computer Aided Design, программное обеспечение для проектирования) посредством понятного ему языка проектирования. Язык проектирования включает в себя входной и выходной языки. Входной язык делится на язык описания объектов моделирования и язык описания заданий. При помощи языка описания объектов моделирования осуществляется ввод модели конструкции в САД-систему, а язык описания заданий предназначен для задания параметров моделирования (диапазона частот, напряженности воздействующего поля, параметров сетки конечных элементов). Выходной язык используется для отображения результатов анализа электромагнитного процесса (графика зависимости эффективности экранирования от частоты, картин распределения поля внутри корпуса).

Данные, вводимые конструктором на входном языке проектирования в САД-систему, преобразуются с помощью программы-конвертора в данные, понятные программе-препроцессору САЕ-системы. После проведения расчетов САЕ-система формирует результаты, доступ к которым обеспечивается через встроенную программу-постпроцессор. Эти результаты преобразуются в данные, понятные проектировщику, для их анализа и принятия проектных решений.

Таким образом, обеспечивается полноценное взаимодействие конструктора с системами моделирования. Конструктор согласно данной схеме, не обладая знаниями, необходимыми для моделирования, управляет мощным математическим ядром САЕ-системы на доступном ему языке, что повышает эффективность процесса проектирования.

Приведенная выше методика автоматизации создания модели ЭА легла в основу подсистемы АСОНИКА-ЭМС.

Подсистема АСОНИКА-ЭМС

Подсистема трехмерного электромагнитного моделирования АСОНИКА-ЭМС была создана в рамках Автоматизированной системы обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА для решения

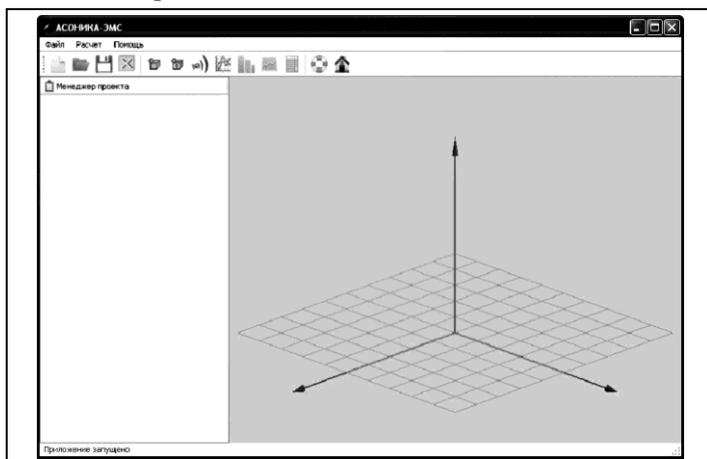


Рис. 12. Главное окно программы АСОНИКА-ЭМС



Рис. 13. Структура подсистемы трехмерного электромагнитного моделирования АСОНИКА-ЭМС

задач замены натуральных испытаний на устойчивость к электромагнитному полю электронных приборов и их систем на ранних стадиях проектирования. Вид главного окна программы представлен на рис. 12.

На данном этапе развития в АСОНИКА-ЭМС можно решать следующие задачи:

1. Расчет величин напряженности электрического и магнитного полей в трех измерениях внутри типового корпуса электронного блока при воздействии электромагнитных волн;
2. Расчет величин напряженности электрического и магнитного полей в трех измерениях внутри произвольного корпуса электронного блока (импорт файлов моделей из САД-систем в формате SAT) при воздействии электромагнитных волн;
3. Расчет эффективности экранирования электрического и магнитного полей корпусом типового блока;
4. Расчет эффективности экранирования электрического и магнитного полей корпусом произвольного блока.

Система АСОНИКА-ЭМС состоит из трех подсистем: интерфейса пользователя, расчетного ядра и графической подсистемы (рис. 13).

Интерфейс пользователя решает следующие задачи: 1) с его помощью можно ввести

вручную геометрические параметры испытуемого типового изделия (блока, шкафа), можно загрузить модель нетиповой конструкции из файла, созданного в системах трехмерного проектирования; 2) задание параметров электромагнитного поля, воздействию которого подвергается изделие.

Для того чтобы создать трехмерную модель типового блока, состоящего из верхней и нижней крышек, необходимо в меню «Расчет» выбрать подменю «Модель», а затем «Добавить модель типового блока». На экране отобразится диалоговое окно ввода параметров типового блока (рис. 14). Кроме геометрических размеров, в этом окне необходимо также определить материалы верхней и нижней крышек корпуса.

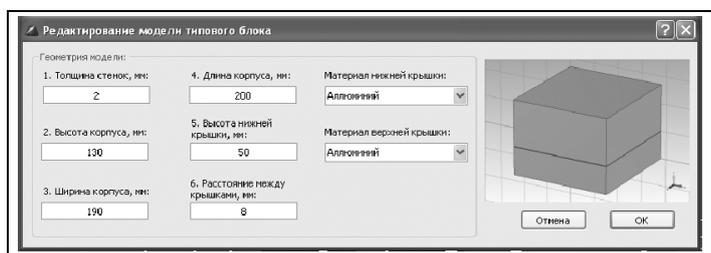


Рис. 14. Редактирование параметров модели типового блока

Кроме задания модели типового блока, возможно импортирование в программу моделей блоков произвольной формы, выполненных в CAD-системах, в формате SAT. На рис. 15 приведен пример импортированной конструкции.

После того, как трехмерная модель конструкции анализируемого корпуса введена в проект, необходимо задать параметры источника возбуждения (плоской электромагнитной волны). В программе

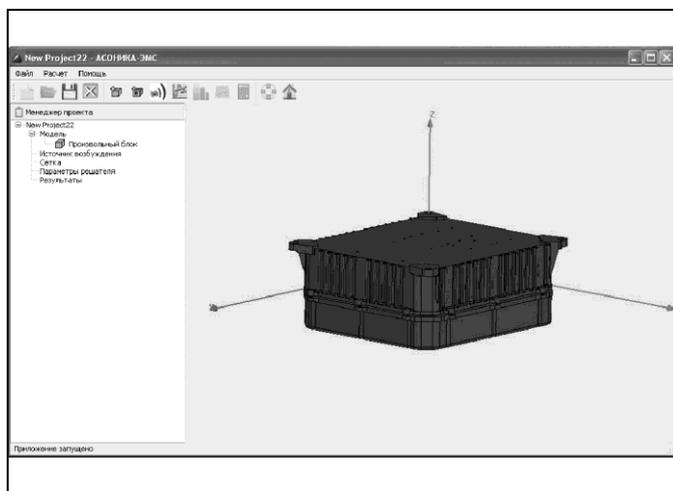


Рис. 15. Импортированная модель из формата SAT

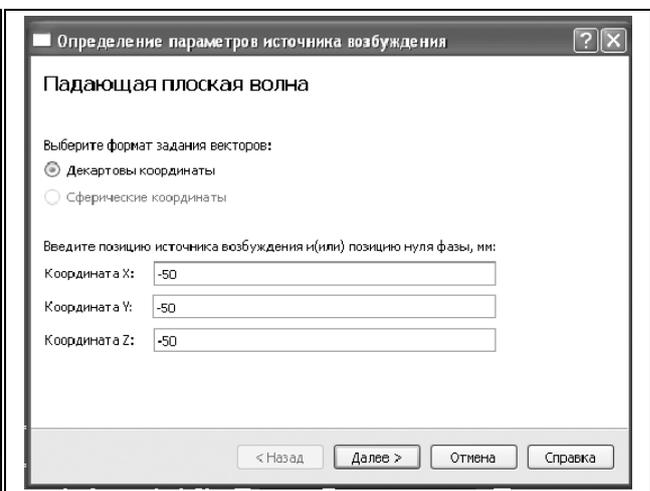


Рис. 16. Первое окно мастера настройки параметров источника возбуждения

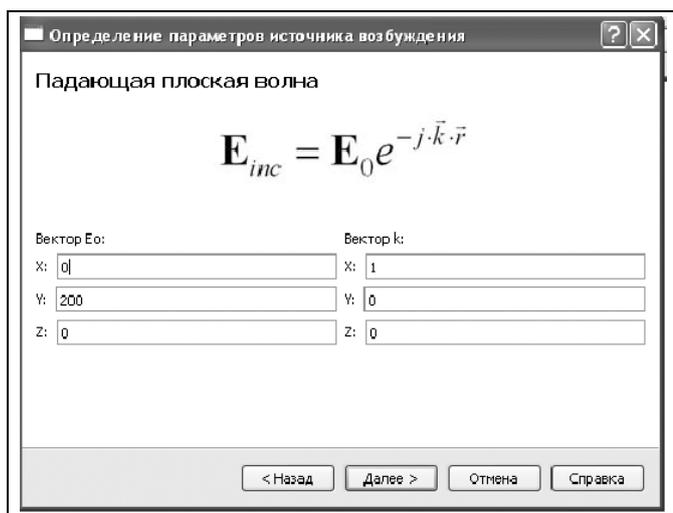


Рис. 17. Задание параметров плоской волны в декартовых координатах

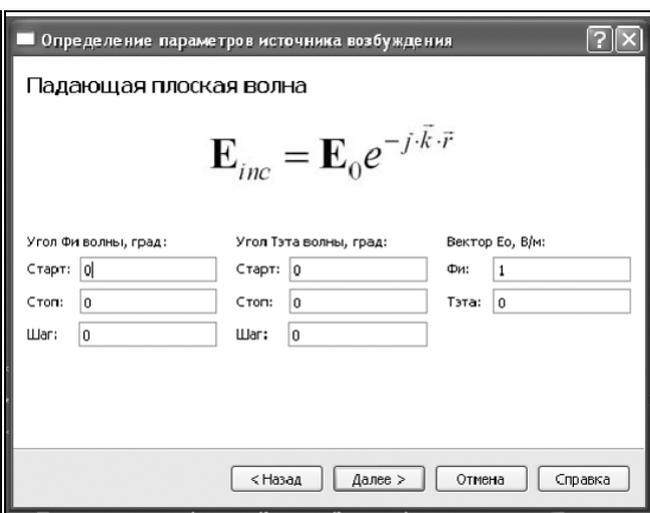


Рис. 18. Задание параметров плоской волны в сферических координатах

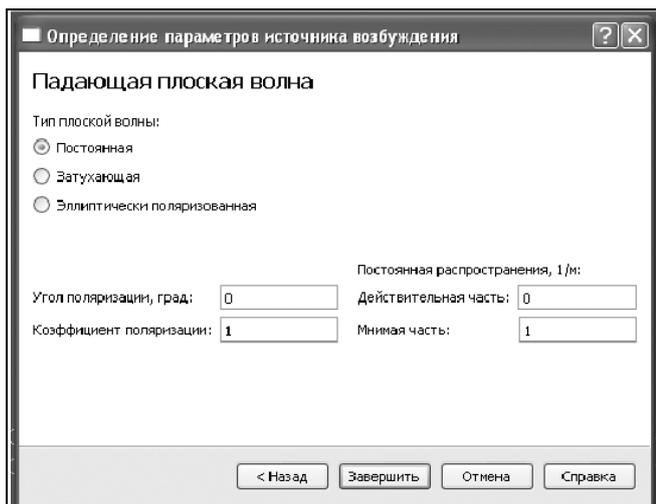


Рис. 19. Задание типа плоской волны

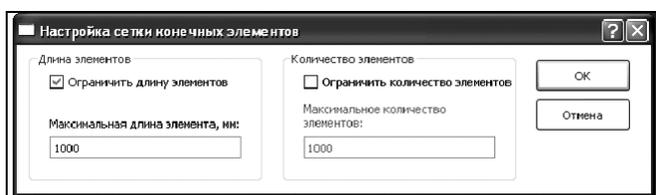


Рис. 20. Настройка сетки конечных элементов

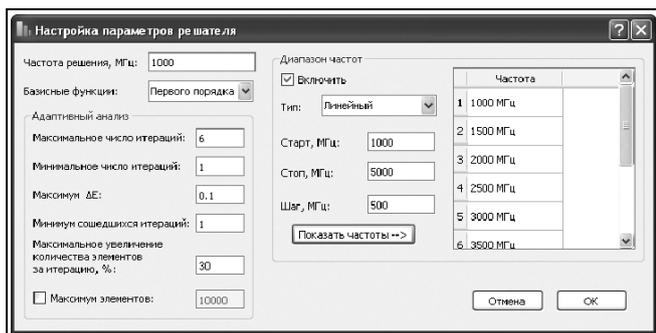


Рис. 21. Настройка параметров решателя

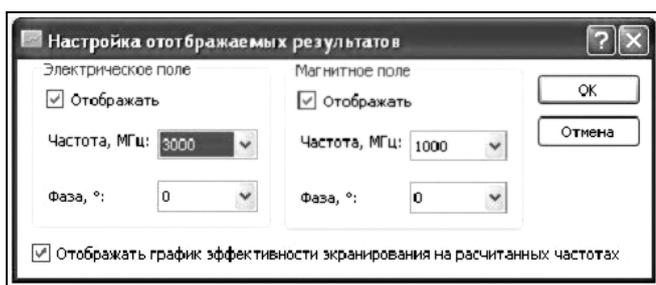


Рис. 22. Настройка отображаемых результатов

элементов или на их число. Это окно вызывается с помощью меню «Расчет | Параметры сетки КЭ»

После определения параметров конечно-элементной сетки необходимо задать частоту решения в диалоговом окне, вызываемом с помощью меню «Расчет | Настройка параметров решения» (рис. 21). Также в этом окне можно задать диапазон частот воздействий, которым подвергается испытываемая конструкция.

Следующим шагом будет указание результатов, которые программа должна будет вывести на экран по завершению расчетов. Диалоговое окно настройки параметров отображаемых результатов вызывается с помощью меню «Расчет | Настройка результатов» (рис. 22).

АСОНИКА-ЭМС для этого есть специальный мастер, вызываемый из меню «Расчет», в котором необходимо выбрать подменю «Источник возбуждения», а в нем пункт «Плоская волна». Первое окно мастера настройки параметров источника возбуждения представлено на рис. 16.

В этом окне задается формат ввода векторов (декартовы или сферические координаты) а также позиция источника возбуждения. В зависимости от выбранного формата, появляется окно задания параметров электромагнитной волны либо в декартовых (рис. 17), либо в сферических (рис. 18) координатах.

На последнем экране мастера задается тип плоской волны, а также параметры, зависящие от этого типа (рис. 19).

После того, как заданы параметры источника возбуждения, необходимо настроить параметры конечно-элементной сетки, создаваемой решателем.

Между размером ячейки конечно-элементной сетки, желательным уровнем точности и имеющимися в наличии вычислительными ресурсами имеется противоречие. С одной стороны, точность решения зависит от того, насколько мала величина каждого из отдельных элементов (тетраэдров). Решения, которые используют большое число элементов, более точны, чем решения, выполненные с помощью крупных ячеек, использующих относительно немного элементов. Самым правильным критерием для выбора размеров ячейки является критерий малой вариации поля в ее пределах. В этом случае поле может быть корректно аппроксимировано линейной функцией. Скорость изменения поля зависит от рабочей частоты и неоднородности среды. С другой стороны, решение задачи при большом числе ячеек требует применения быстродействующих процессоров и большого объема оперативной памяти. Поэтому необходимо искать компромисс между точностью решения и ресурсами, необходимыми для его реализации.

Следует помнить, что появление в счетной области ячеек с размерами большими $\lambda/10$ (λ – длина волны в среде, в которой ищется решение) нежелательно [14]. На рис. 20 показано диалоговое окно задания параметров сетки конечных элементов, с помощью которого можно задать ограничения на длину

В этом окне можно задать отображение электрического и магнитного полей на разных частотах (если задан диапазон частот) и фазах. При выборе пользователем пункта «Отображать график эффективности экранирования на рассчитанных частотах» после завершения расчетов будет выведен на экран в отдельном окне график эффективности экранирования магнитного и электрического полей.

Затем можно запускать проект на расчет. Это делается с помощью пункта «Запуск на решение» в меню «Расчет». После завершения расчета в рабочей области программы отобразится распределение напряженности электрического поля внутри корпуса и в прилегающем пространстве (рис. 23). Значения напряженности в расчетных точках обозначены размером (чем больше размер, тем больше значение напряженности) и цветом (от фиолетового к красному). Интерфейс пользователя реализован с помощью свободно-распространяемого пакета библиотек Qt.

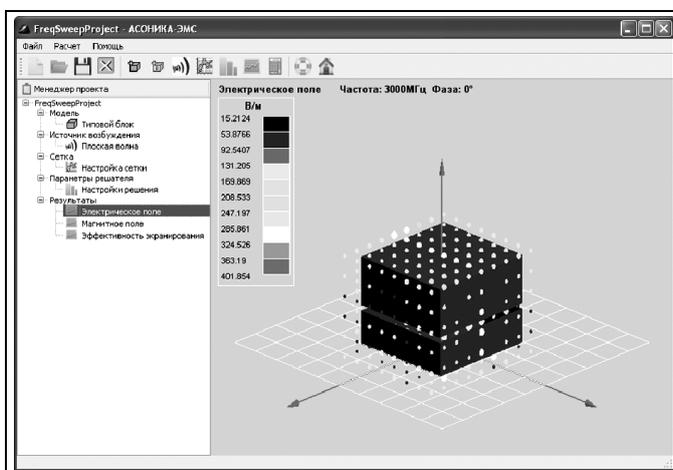


Рис. 23. Отображение результатов расчета

Чтобы вывести на экран график эффективности экранирования, необходимо щелкнуть мышью в дереве проекта пункт «Эффективность экранирования». График эффективности экранирования электрического и магнитного полей появится в отдельном окне (рис. 24).

Информация о модели, введенная с помощью интерфейса пользователя, передается программ-решателю, реализующей метод конечных элементов. Программа-решатель, в свою очередь, передает результаты (значения напряженностей полей в заданных точках пространства) обратно интерфейсу пользователя, который с помощью графической подсистемы отображает их на экране.

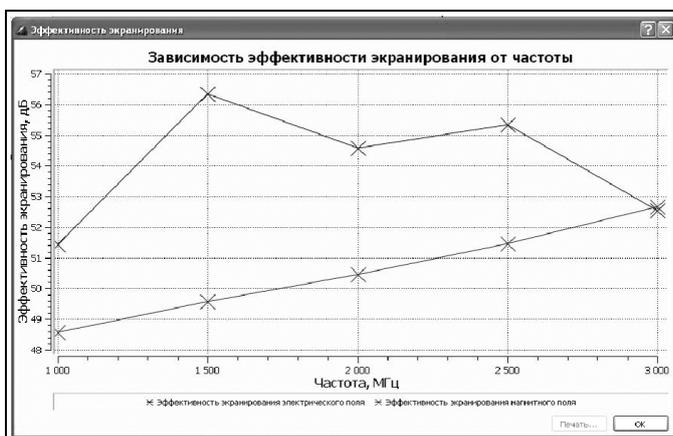


Рис. 24. График зависимости эффективности экранирования от частоты

Графическая подсистема является универсальным постпроцессором, выполняющим задачи визуализации трехмерной модели и результатов расчета в удобном для пользователя виде. Графическая подсистема реализована с помощью API OpenGL.

Система АСОНИКА-ЭМС является составной частью системы АСОНИКА, которая представляет собой целостное решение в области обеспечения качества аппаратуры на принципах CALS-технологий.

Система АСОНИКА – это специальный программный комплекс, который создает структуру электронного (виртуального) макета разрабатываемой РЭС, наполняет данную структуру результатами работы проблемных подсистем системы (подсистемы позволяют моделировать электрические, тепловые, аэродинамические, механические, электромагнитные и радиационные процессы в аппаратуре, осуществляют диагностическое моделирование, анализ показателей надежности, а также позволяют интегрироваться с известными системами топологического проектирования печатных плат и известными CAD-системами).

Система трехмерного электромагнитного моделирования АСОНИКА-ЭМС может использоваться на таких приоритетных направлениях развития науки, техники и технологий в Российской Федерации как:

- информационно-телекоммуникационные системы;
- перспективные вооружения, военная и специальная техника;
- транспортные, авиационные и космические системы;
- энергетика и энергосбережение.

Во всех этих областях использование системы АСОНИКА-ЭМС в рамках системы АСОНИКА позволит добиться высоких показателей надежности и качества изделий, сократить сроки выхода нового продукта на рынок, и, самое главное, снизить затраты на основных стадиях жизненного цикла изделия.

Система АСОНИКА-ЭМС имеет ряд преимуществ перед зарубежными аналогами. Самое существенное преимущество – это стоимость. Естественно, что российские предприятия не могут позволить себе приобретать программные комплексы стоимостью несколько сот тысяч евро, поэтому ориентированная на российского потребителя система АСОНИКА-ЭМС будет стоить на порядок дешевле.

В дальнейшем авторы планируют реализовать в АСОНИКА-ЭМС связь с общей базой данных (БД) системы АСОНИКА, в которой содержатся электрофизические параметры материалов, используемых в электронной промышленности. Также будет реализован вывод исходных данных и результатов расчета в текстовый процессор Microsoft Office Word. Планируется разработка программного модуля расчета наведенных помех в кабелях, связывающих электронные устройства.

Таким образом, в добавлении этих, а также других новых возможностей системе, и в ее сертификации и рекламе авторы видят направление дальнейшей работы.

- Таким образом, рассмотрены основные концепции ЭМС, указано на трудоемкость и дороговизну натурных испытаний на ЭМС. Предложена альтернатива – компьютерное моделирование. Однако, чтобы перейти от натурных испытаний к компьютерному моделированию, необходимо решить ряд важных задач: создать методику синтеза модели ЭА, дающей достоверные результаты и создать программное обеспечение, эту методику реализующее.

Показано, что применяющиеся в настоящее время корпуса ЭА содержат большое число элементов, не влияющих на качество электромагнитного экранирования, однако сильно увеличивающих число конечных элементов в расчетной модели, что ведет к неприемлемому увеличению времени расчета конструкции. Предложен алгоритм создания модели корпуса ЭА, предназначенной для расчета эффективности экранирования электромагнитного поля методом конечных элементов.

Рассмотрен процесс назначения материалов объектам модели с точки зрения вычислительной электродинамики.

Рассмотрены различные виды граничных условий, применяющихся при анализе эффективности экранирования, а также принцип возбуждения расчетной структуры плоской электромагнитной волной.

Рассмотрены основные аспекты дискретизации пространства счетной области трехмерными конечными элементами – тетраэдрами. Приведен принцип адаптивного разбиения пространства на конечные элементы.

Разработан принцип взаимодействия конструктора с системой моделирования электромагнитных процессов. Предложена схема взаимодействия в терминологии лингвистического обеспечения, которая позволяет проектировщику, не обладающему знаниями необходимыми для моделирования электромагнитных процессов, управлять мощным математическим ядром САЕ-системы на доступном ему языке и легко оптимизировать конструкцию по результатам расчета.

Приведена структура разработанной программной подсистемы АСОНИКА-ЭМС, реализующая предложенную авторами методику создания модели ЭА и описанный принцип взаимодействия конструктора с расчетным ядром (САЕ-системой).

Описан процесс расчета эффективности экранирования электромагнитного поля корпусом ЭА, приведены результаты расчетов.

Дано описание места подсистемы АСОНИКА-ЭМС в системе АСОНИКА и перспективы совершенствования программы, а также ее применения на приоритетных направлениях развития науки и техники.

📖 Литература

1. Уилльямс Т., Армстронг К. ЭМС для систем и установок. М.: Издательский Дом «Технологии». 2004. 508 с.
2. Кечиев Л.Н., Акбашиев Б.Б., Степанов П.В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. 2010. 470 с.
3. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Составитель Д.Р.Ж. Vaïm. Джермантаун. Мериленд. 1971 – 1973. Вып.1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. Сокращ. пер. с англ. / под ред. А.И. Сангура. М.: Сов. радио. 1977. 352 с.

-
4. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Издательский Дом «Технологии». 2003. 540 с.
 5. ГОСТ 29073-91. Совместимость технических средств (ТС) измерения, контроля и управления промышленными процессами электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам (ЭП). Общие положения. М.: Издательство стандартов. 2004.
 6. Князев А.Д., Кечев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь. 1989. 224 с.
 7. ГОСТ Р 51317.4.2-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов. 2000.
 8. ГОСТ Р 51317.4.4-2007. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ. 2008.
 9. ГОСТ Р 51317.4.11-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов. 2000.
 10. ГОСТ Р 51317.4.5-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов. 2000.
 11. ГОСТ Р 51317.4.3-2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ. 2007.
 12. Dipak L. Sengupta, Valdis V. Liepa. Applied Electromagnetics and Electromagnetic Compatibility. New Jersey: Wiley Interscience. 2006.
 13. Куликов О.Е., Шалумов А.С. Методика проектирования бортового электронного оборудования с учетом электромагнитной совместимости // Решетневские чтения: материалы XIV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (10–12 нояб. 2010, г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск. 2010. Ч. 1. С. 157 – 158.
 14. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М.: 2008.
 15. Swanson D.G., Hofer W.J.R. Microwave Circuit Modelling Using Electromagnetic Field Simulation. Norwood: Artech House. Inc. 2003.
 16. MAGMAS 3D, <http://www.esat.kuleuven.be/telemic/antennas/magmas/>
 17. <http://www.cst.com>
 18. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио. 1979.
 19. Bruce Archambeault, Omar Ramahi, and Colin Brench, EMI/EMC Computational Modelling Handbook 2nd Edition, 2001, 311.
 20. Berenger J.P. JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS. 114, 185 (1994).

Поступила 31 августа 2011 г.

DEVELOPMENT OF ASONIKA-EMC SUBSYSTEM FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY PROBLEMS SIMULATION

© Authors, 2011

O.E. Kulikov, A.S. Shalumov

This article discusses the basic concepts of electromagnetic compatibility (EMC), pointed to the complexity and high cost of full-scale tests on the EMC. We propose an alternative - a computer simulation. However, to move from field tests to computer simulations, it is necessary to solve some important problems: a method of synthesis of electronic equipment (EE) model, which gives reliable results and to create software that implements this technique. These problems were solved during the creation of ASONIKA-EMC software subsystem. The process of calculating the shielding effectiveness of the electromagnetic field case of EE with the developed program, the calculation results is given. A description of the place ASONIKA-EMC subsystem in the ASONIKA system and prospects for improving the program, as well as its use in priority areas of science and technology.