

Электромагнитная совместимость РЭС (АСОНИКА-ЭМС). Расчет эффективности экранирования электрического и магнитного поля

*А.С. Шалумов, Генеральный директор ООО «НИИ «АСОНИКА», профессор, доктор технических наук
als@asonika-online.ru*

О.Е. Куликов, кандидат технических наук

1. Электромагнитные помехи и их источники

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». В концепции ЭМС выделяются источники и рецепторы помех, а также среда их распространения 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.

На все функционирующие радиоэлектронные устройства могут действовать два типа электромагнитных помех (ЭМП): естественного и искусственного происхождения. Причины их возникновения обусловлены различными явлениями как природного характера, так и созданными человеком системами и оборудованием (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 (рис. 2). Механизмом связи называют физический принцип передачи энергии электромагнитных процессов от источника к рецептору помех.

Гальваническая связь осуществляется через ток или напряжение. Электрическое и магнитное поля характеризует квазистатический диапазон, в котором эти поля независимы друг от друга. Связь через излучение имеет место тогда, когда приемник находится в дальнем поле, а электрическое и магнитное поля возникают одновременно и связаны между собой.

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.

На практике в большинстве случаев связь устанавливается одновременно по нескольким путям, и, кроме того, один путь может использоваться несколькими механизмами связи. Все это существенно затрудняет правильное объяснение появления помех.

В настоящее время из-за постоянного роста парка электронной аппаратуры все большее значение приобретают вопросы защиты РЭС от внешних электромагнитных воздействий и минимизации помех, создаваемых аппаратурой. Сегодня восприимчивость к помехам характерна для 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).



Рис. 1. Виды источников ЭМП



Рис. 2. Виды механизмов связи источников и приемников помех

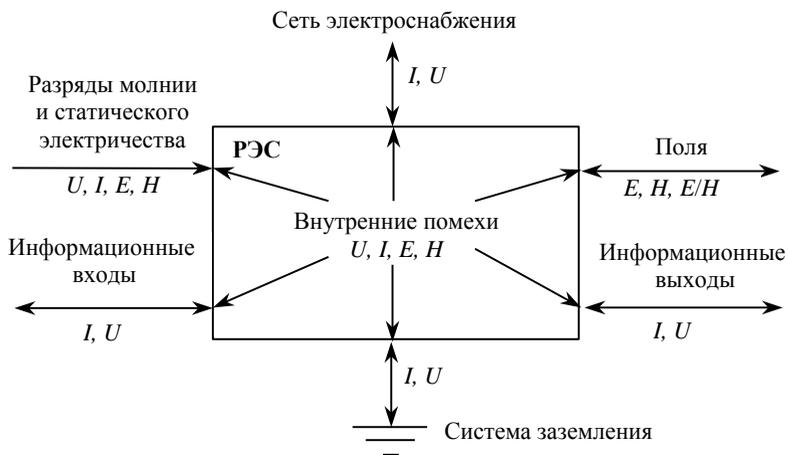


Рис. 3. Пути проникновения и излучения помех в электронное устройство:
 I, U – ток и напряжение (гальваническая связь);
 $E, H, E/H$ – электрическое, магнитное и электромагнитное поля

2. Испытания на ЭМС и устойчивость к электромагнитным воздействиям

При проектировании радиоэлектронной аппаратуры 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 создаваемых им помех во внешнюю среду.

В общем случае, техническое задание на разрабатываемое устройство содержит требования к помехоустойчивости и помехоэмиссии согласно ГОСТ и ОСТ. В различных областях техники действуют собственные 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. К электромагнитным помехам относятся:

- прерывание, провалы, выбросы и колебания напряжения электропитания;

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

- радиочастотные электромагнитные поля как импульсные (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 РЭС к помехам зави-

сит 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).

Проанализировать устойчивость РЭС 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. В общем случае, для проведения испытаний опытный образец проектируемого изделия помещается в соответствующую электромагнитную обстановку (ЭМО). Цель испытаний – определить, может ли изделие надлежащим образом функционировать в соответствующей ЭМО.

Несомненным достоинством натурных испытаний на воздействии ЭМП является достоверность полученных результатов. В настоящее время сертификат соответствия требованиям ЭМС может быть выдан производителю изделия только на основании положительных результатов испытаний согласно ГОСТ в аттестованной государством лаборатории.

Однако для решения комплексной задачи обеспечения стойкости проектируемой РЭС к электромагнитным воздействиям недостаточно проведения испытаний лишь на этапе опытного образца. Спектр электромагнитных воздействий при испытаниях может быть не совсем полным, не учитывать специфики конкретной ЭМО, в которой предполагается эксплуатировать изделие. Испытания на стойкость к ЭМП в большинстве случаев выявляют несоответствие проектируемой РЭС требованиям ГОСТ. 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).

Альтернативой такому подходу является математическое моделирование паразитных электромагнитных процессов, происходящих

в РЭС. К достоинствам математического моделирования относятся прежде всего его дешевизна по сравнению с натурными испытаниями – не нужно изготавливать опытный образец, а также скорость – вносить изменения в схему и конструкцию можно за несколько часов, ведь изменяется только модель. Кроме того, можно значительно сократить персонал, занятый на испытаниях, поскольку весь процесс моделирования может выполнять один человек соответствующей квалификации. Однако применение моделирования электромагнитных процессов требует очень тщательного выбора метода математического моделирования и реализующего его программного обеспечения, и правильной постановки задачи. При неправильно выбранном выборе метода либо неправильно поставленной задаче можно получить расхождение с экспериментом на несколько порядков.

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. Среди них имеются как узкоспециализированные инструменты, призванные решать конкретную проблему (например, расчет антенн в программе MAGMAS 3D), так и поистине универсальные программные комплексы, охватывающие практически весь спектр задач электродинамики, вплоть до расчета заряженных частиц (CST STUDIO SUITE).

На сегодняшний день все четче прослеживается тенденция к сокращению числа узкоспециализированных программ, к расширению спектра решаемых задач, к усложнению пользовательского интерфейса, и как следствие, к существенному увеличению стоимости программного обеспечения (ПО), а также к значительному увеличению времени, необходимого специалисту, 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.

Таким образом, актуальным становится создание удобного в работе и простого в изучении программного комплекса, позволяющего на уровне пользователя–разработчика РЭС быстро решать

наиболее распространенные вопросы обеспечения стойкости РЭС к внешним электромагнитным воздействиям и оперативно, в процессе разработки, принимать решение о внесении изменений в конструкцию. Для примера рассмотрим методическое, лингвистическое и программное обеспечение, предназначенное для определения эффективности экранирования корпусом РЭС внешнего радиочастотного электромагнитного поля.

Чтобы решить эту задачу, необходимо создать модель, в которой нашли бы отражение все необходимые для электродинамического моделирования параметры реальной РЭС, такие как ее пространственная конструкция, электрофизические характеристики материалов, из которых состоит РЭС, а также параметры воздействия и граничные условия. Изначально необходимо разбить объем модели на конечные элементы с условием соответствия конечно-элементной модели исходной. На сегодняшний день не существует методики автоматизированного синтеза моделей РЭС 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 – требует длительного времени для изучения всех возможных настроек и параметров, что является серьезным недостатком.

Чтобы написать эффективную программу для расчета экранов, необходимо сначала разработать методику создания модели РЭС, пригодной для анализа.

3. Методика моделирования электромагнитных процессов

Эффективность экранирования электрического поля вычисляется с помощью следующей формулы:

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

где E_0 – напряженность электрического поля в отсутствие корпуса; E_3 – напряженность электрического поля внутри корпуса.

Аналогично определяется эффективность экранирования магнитного поля. Таким образом, чтобы оценить 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. Мы применим метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM).

Создание трехмерной модели конструкции ЭА

Применяемые сегодня электронные приборы представляют собой довольно сложные конструкции (рис. 4), состоящие из двух и более крышек, имеющие скругления, ребра, отверстия произвольной формы, проушины для крепления. Такую модель невозможно рассчитать в приемлемые сроки на современных рабочих станциях, так как она содержит большое число деталей, размер которых мал по сравнению с размером всей модели и которые требуют огромного числа конечных элементов (порядка нескольких миллионов). Поэтому перед инженером-расчетчиком стоит нетривиальная задача – создать модель РЭС, пригодную для электрофизического моделирования, позволяющую с приемлемой точностью и в разумные сроки провести расчет результата электромагнитных воздействий на прибор. Такие модели, с одной стороны, не должны быть слишком детальными, а с другой – не должны быть слишком упрощены, поскольку в противном случае результаты моделирования и натурального эксперимента могут значительно (на порядок или больше) различаться.

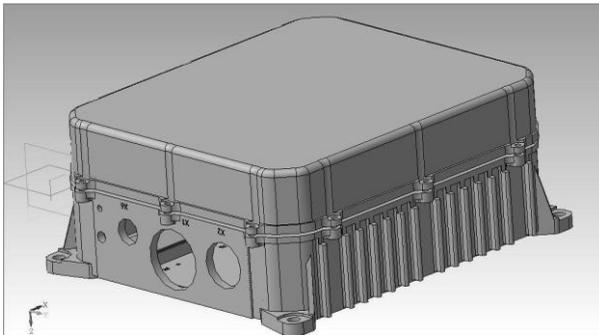


Рис. 4. Трехмерная модель корпуса РЭС

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

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.

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 влияют на поле внутри корпуса, поэтому их можно смело исключать из модели для уменьшения числа конечных элементов.

Третьим шагом является анализ несквозных 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:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}},$$

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, равной

$$f_{\text{ср}} = \frac{1,75 \cdot 10^5}{D} \text{ либо } f_{\text{ср}} = \frac{1,5 \cdot 10^5}{W}.$$

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

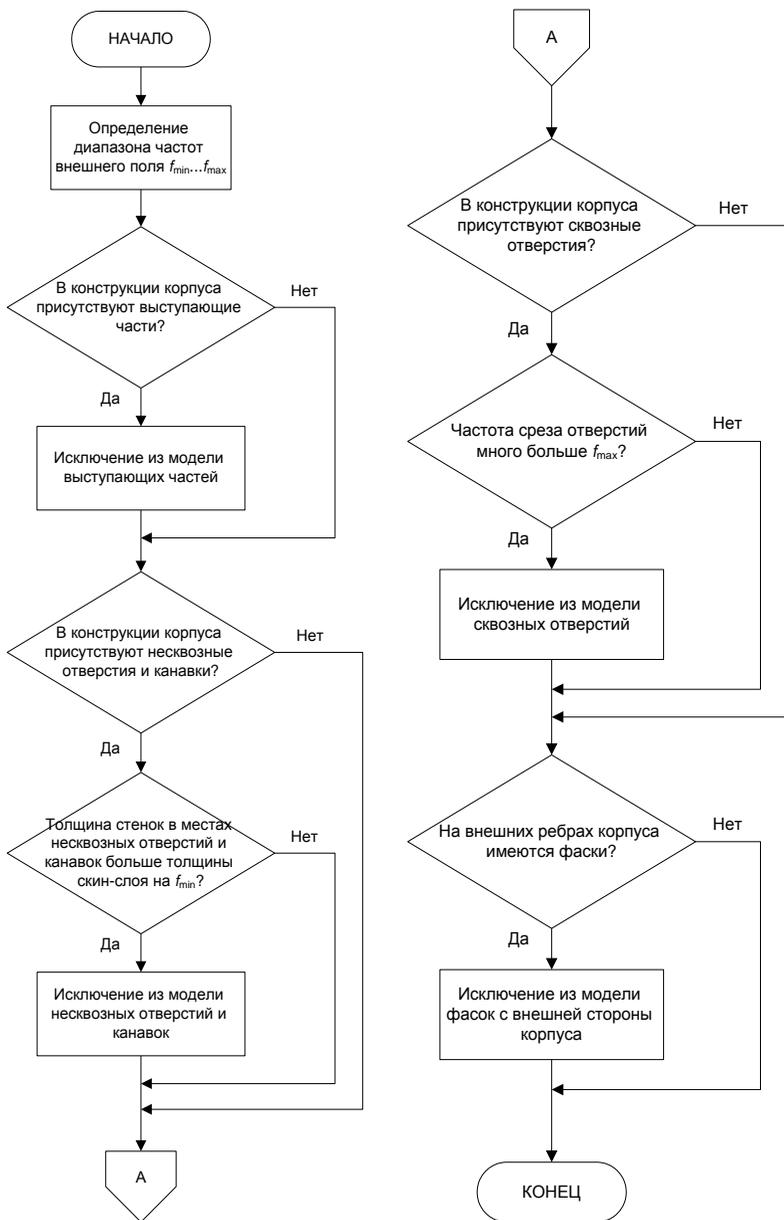


Рис. 5. Алгоритм моделирования корпуса РЭС для расчета эффективности экранирования электромагнитного поля методом конечных элементов

Если рассчитанная частота среза много больше f_{\max} , то отверстие можно исключить из модели, так как колебания с частотой, меньшей частоты среза, значительно ослабляются и практически не влияют на картину поля внутри корпуса. 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 (см. 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 электродинамического моделирования.

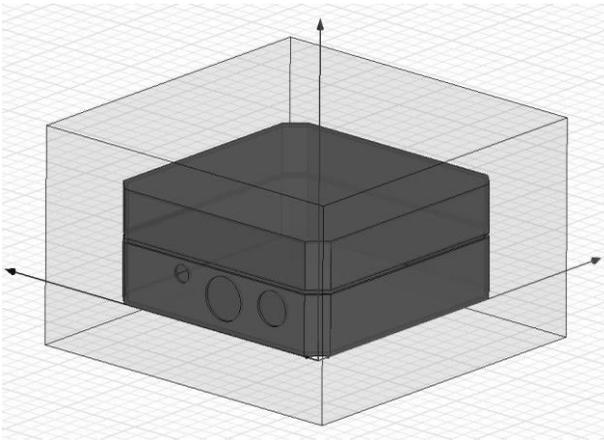


Рис. 6. Трехмерная модель корпуса прибора с окружающим пространством для конечно-элементного расчета

В трехмерную модель конструкции следует также 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.

Например, если частота падающей плоской волны равна 1 ГГц, то $\lambda = 0,3$ м, следовательно, расстояние до границы воздушного пространства должно составлять 0,05 м.

Следующим шагом создания электродинамической модели является назначение электрофизических свойств материалов объемам счетной области.

Назначение материалов

Чтобы решить граничную задачу электродинамики, т.е. найти векторы **E** и **H**, в некоторой области удовлетворяющие 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: $\hat{\epsilon}_a$, $\hat{\mu}_a$, $\hat{\sigma}^e$, $\hat{\sigma}^m$. В данном случае тензор – 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 :

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

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. Мнимые части, определяемые тензорами электрической и магнитной проводимостей, описывают свойство среды рассеивать электромагнитную энергию, т.е. поглощать ее, преобразуя в тепловую энергию.

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 моделирования 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 (рис. 7).

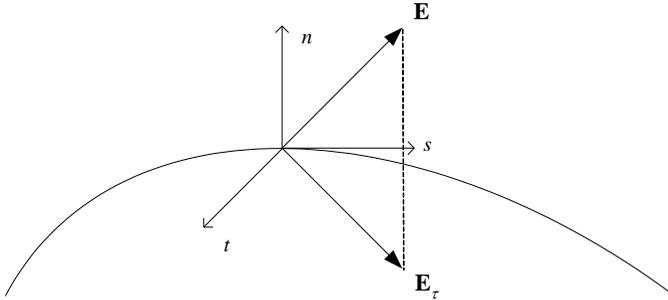


Рис. 7. Поверхность и локальная система координат

В этом случае произвольный вектор \mathbf{E} раскладывается на нормальную компоненту E_n и тангенциальный вектор \mathbf{E}_τ , лежащий в плоскости tOs , а тангенциальный (касательный) \mathbf{E}_τ – на компоненты E_t, E_s . Обычно граничные условия формулируются для компонент E_t, E_s и для касательных компонент магнитного поля.

Поверхность раздела двух сред. Граничные условия для поверхности раздела двух сред с разными диэлектрическими и магнитными свойствами, которые могут быть также анизотропными средами, описываются следующими соотношениями:

$$\mathbf{E}_{\tau 1} = \mathbf{E}_{\tau 2}, \quad \mathbf{H}_{\tau 1} = \mathbf{H}_{\tau 2},$$

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

Идеальная электрическая и идеальная магнитные стенки. В наиболее простой форме граничные условия записываются для

идеализированных поверхностей магнитной и электрической стенок. Идеальная электрическая стенка является моделью поверхности металла без потерь, т.е. металла с бесконечной проводимостью. Для нее граничные условия имеют следующий вид:

$$\mathbf{E}_\tau = 0.$$

Хотя магнитные проводники пока не известны из-за отсутствия в природе магнитных зарядов, понятие магнитной стенки оказывается полезным при решении электродинамических задач: с ее помощью можно вводить плоскости симметрии модели, т.е. рассчитывать поле только в одной половине (при центральной симметрии, например). Граничные условия для магнитной стенки имеют следующий вид:

$$\mathbf{H}_\tau = 0.$$

Особенностью идеальных проводников является то, что поле не проникает внутрь таких сред. Это приводит к тому, что поле, пересекая поверхность идеального проводника (и не только), скачкообразно меняется (рис. 8).

Из рис. 8 видно, что на поверхности идеальной электрической стенки возникает скачок касательного магнитного поля при непрерывном касательном электрическом поле. Наоборот, на поверхности магнитного проводника касательное электрическое поле разрывно.

В электродинамике разрыв компонент поля эквивалентен появлению токов. В случае разрыва тангенциальных компонент в бесконечно тонком слое, распределенном вдоль поверхности, возникают поверхностные токи, связанные с тангенциальными компонентами полей следующим образом:

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

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

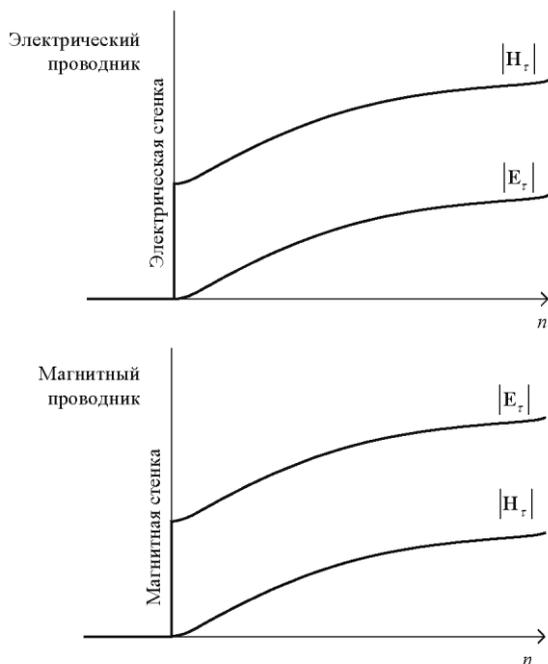


Рис. 8. Поля вблизи поверхности идеальных проводников

Идеально согласованные слои. Говоря об определении поля, наведенного внешним источником в закрытых структурах, каковыми являются большинство корпусов РЭС, нельзя не упомянуть об излучении волны в свободное пространство. Дело в том, что число конечных элементов, применяемых в модели, ограничено, т.е. невозможно напрямую смоделировать излучение волн в бесконечность. Поэтому в численной электродинамике широко применяют граничные условия для поглощения излучаемых и переотраженных волн из счетной области. Такие условия получили название идеально согласованных слоев (Perfectly Matched Layers, PML).

Источники возбуждения

В тот момент, когда построена трехмерная модель исследуемой области, а также назначены материалы и граничные условия, встает вопрос о передаче энергии электромагнитной волны в структуру, т.е.

о ее возбуждении. Решая такую электродинамическую задачу, следует иметь в виду, что существует несколько способов ввода энергии в вычислительный объем, зависящих от типа решаемой задачи: с помощью волноводного порта, дискретного порта, падающей волны, источника напряжения, источника тока, внутреннего поля смещения. При оценке наведенного поля внутри таких замкнутых структур, как корпуса РЭС, используется только возбуждение падающей волной.

Обратим внимание на падающую (плоскую) волну, которая распространяется в одном направлении и однородна в направлении, перпендикулярном к ее распространению. Угол, под которым волна падает на структуру, называется углом падения. Падающая волна описывается соотношением

$$E_{\text{inc}} = E_0 e^{-jk_0(\hat{k}\cdot r)},$$

где E_{inc} – падающая волна; E_0 – вектор поляризации электрического поля; $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ – волновое число свободного пространства; \hat{k} – единичный вектор направления распространения; $r = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$ – вектор позиции.

Дискретизация пространства счетной области

Как уже было сказано, для решения трехмерных задач электродинамики использован 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 $\lambda/10$, где λ – длина волны в среде, в которой ищется решение, нежелательно). Эти коэффициенты определяются с помощью уравнений Максвелла и граничных условий. В результате решение электродинамической задачи сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно этих коэффициентов. Решение СЛАУ легко реализуется на ЭВМ. Однако в ходе разбиения форма отдельных элементов структуры искажается. Это относится, в первую очередь, к элементам с искрив-

ленной поверхностью. Поэтому ограничения на размер тетраэдра накладывает не только точность определения поля, но и точность аппроксимации исходной структуры новой структурой, составленной из тетраэдров.

Для оптимизации сетки используется итерационный процесс, в котором шаг между ячейками автоматически уменьшается в критических областях. На первом этапе построения тетраэдров используются вершины объектов анализируемой структуры. Тем самым создается начальное разбиение, для которого ищется грубое распределение поля. Анализ этого поля позволяет установить наличие областей, в которых скорость изменения поля наиболее велика. Выявив такие области, поле снова дробят, но уже на 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.

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

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 $\lambda/10$).

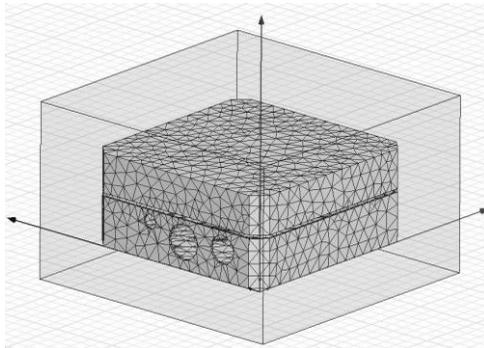


Рис. 9. Пример дискретизации пространства

Выполнение расчета

После 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. В результате определяются напряженности поля в узлах конечно-элементной сетки. Подставляя эти значения, рассчитанные для различных частот, в формулу (1), получаем зависимость эффективности экранирования от частоты падающей волны (рис. 10).

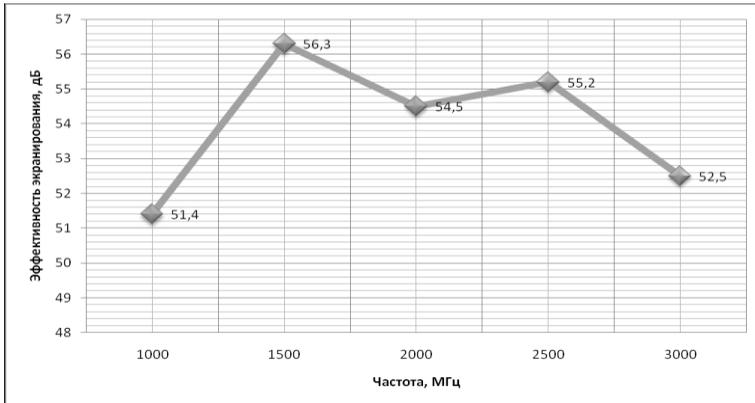


Рис. 10. Зависимость эффективности экранирования электрического поля корпусом РЭС от частоты падающей волны

4. Автоматизация синтеза модели для расчета эффективности экранирования РЭС

Методика создания модели РЭС для расчета эффективности экранирования состоит из следующих этапов:

1) создание трехмерной твердотельной модели РЭС по приведенному 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 много времени даже у подготовленных специалистов и требует учета множества нюансов. Следовательно, необходимо максимально упростить и автоматизировать процесс синтеза и оптимизации модели, чтобы инженер-конструктор, не знакомый с тонкостями электродинамического моделирования, мог провести анализ эффективности экранирования электромагнитного поля корпусом РЭС, 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.

Конструктор взаимодействует с конечно-элементной CAE-системой моделирования (CAE – Computer Aided Engineering – программное обеспечение для инженерных расчетов) и САD-системой проектирования (CAD – Computer Aided Design – программное обеспечение для проектирования) посредством понятного ему языка проектирования. Различают входной и выходной языки проектирования. Входной язык делится на язык описания объектов моделирования и язык описания заданий. С помощью первого осуществляется ввод модели конструкции в САD-систему, а с помощью второго задаются параметры моделирования (диапазон частот, напряженность воздействующего поля, параметры 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 САD-систему, с помощью программы-конвертора переводятся в данные, понятные программе-препроцессору CAE-системы. После расчетов CAE-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.

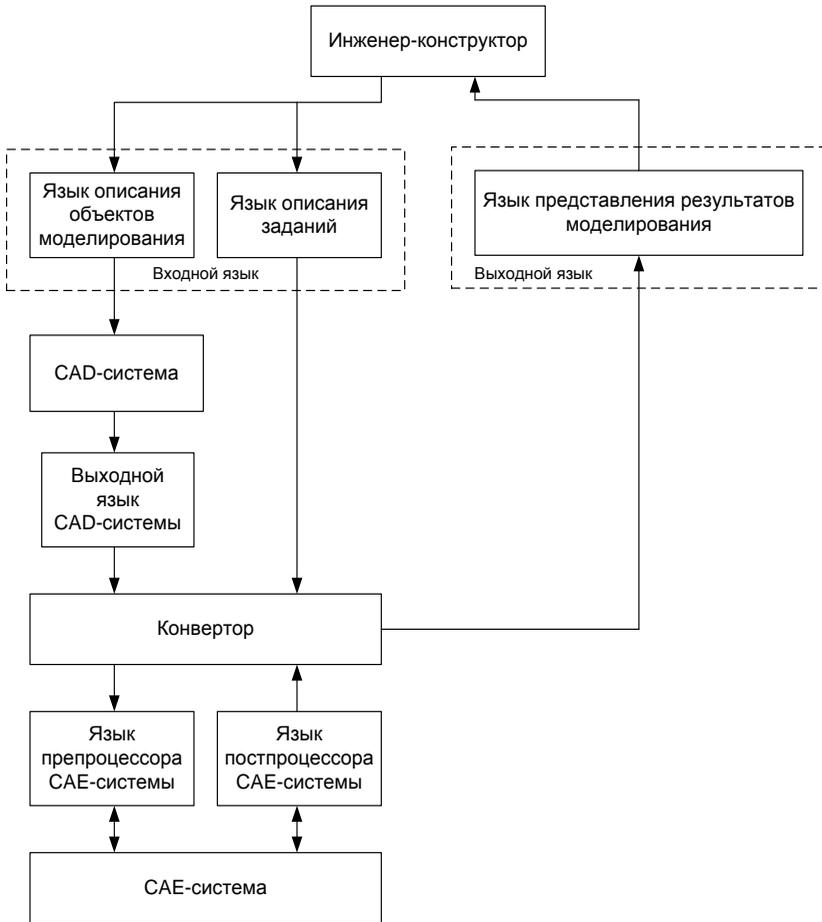


Рис. 11. Схема взаимодействия конструктора с системой моделирования электромагнитных процессов в процессе синтеза модели

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

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

5. Структура подсистемы АСОНИКА-ЭМС

Подсистема трехмерного электромагнитного моделирования АСОНИКА-ЭМС была создана в рамках автоматизированной системы обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА для замены натуральных испытаний на устойчивость к электромагнитному полю электронных приборов и их систем на ранних стадиях проектирования. Вид главного окна программы показан на рис. 12.

На данном этапе развития в АСОНИКА-ЭМС можно рассчитывать:

- напряженность электрического и магнитного полей в трех измерениях внутри типового корпуса электронного блока при воздействии электромагнитных волн;

- напряженность 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;

- эффективность экранирования электрического и магнитного полей корпусом типового блока;

- эффективность 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 две задачи: с его помощью можно ввести ручную геометрические параметры испытуемого типового изделия (блока, шкафа) либо нетипового, взяв их из файла, созданного в системах трехмерного проектирования, а также задать параметры электромагнитного поля, воздействию которого подвергается изделие.

Чтобы создать трехмерную модель типового блока, состоящего из верхней и нижней крышек, необходимо в меню «Расчет» выбрать подменю «Модель», а затем «Добавить модель типового бло-

ка». На экране отобразится диалоговое окно ввода параметров типового блока (рис. 14). Кроме геометрических размеров, в этом окне необходимо также указать материалы верхней и нижней крышек корпуса.

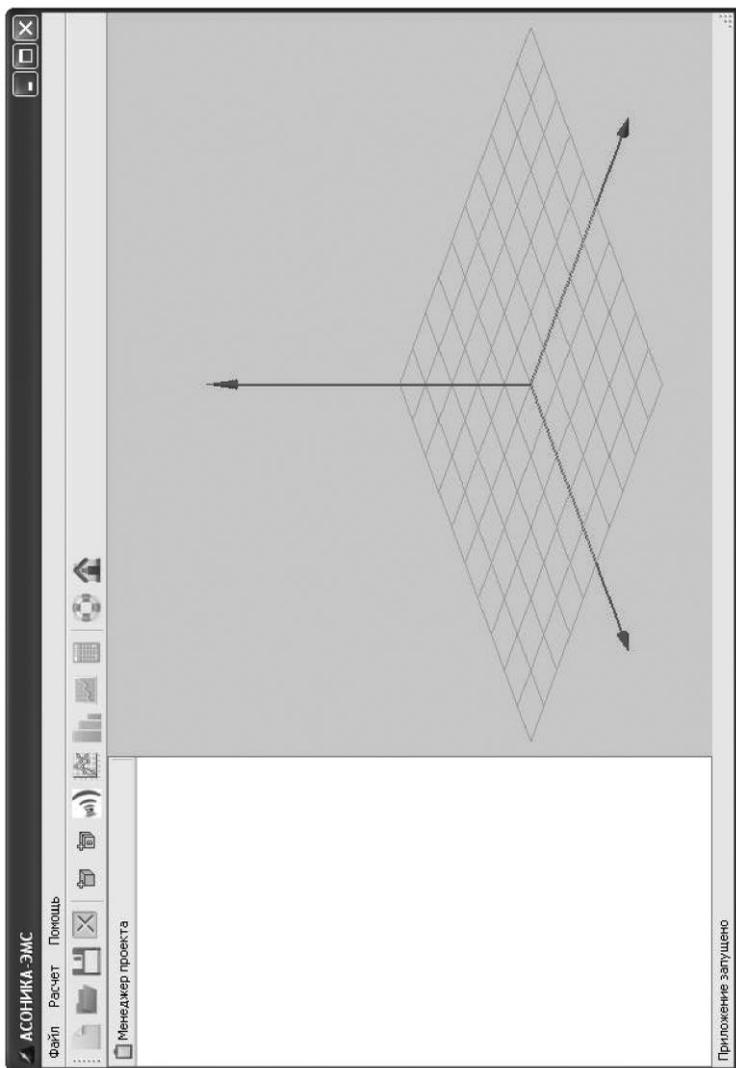


Рис. 12. Главное окно программы АСОНИКА-ЭМС

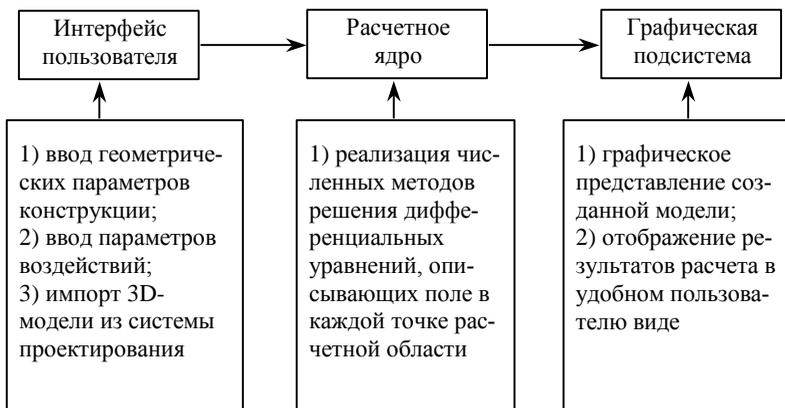


Рис. 4.13. Структура подсистемы трехмерного электромагнитного моделирования АСОНИКА-ЭМС

Кроме задания модели типового блока, в программу можно импортировать модели блоков произвольной формы, выполненные в CAD-системах, в формате SAT (рис. 15).

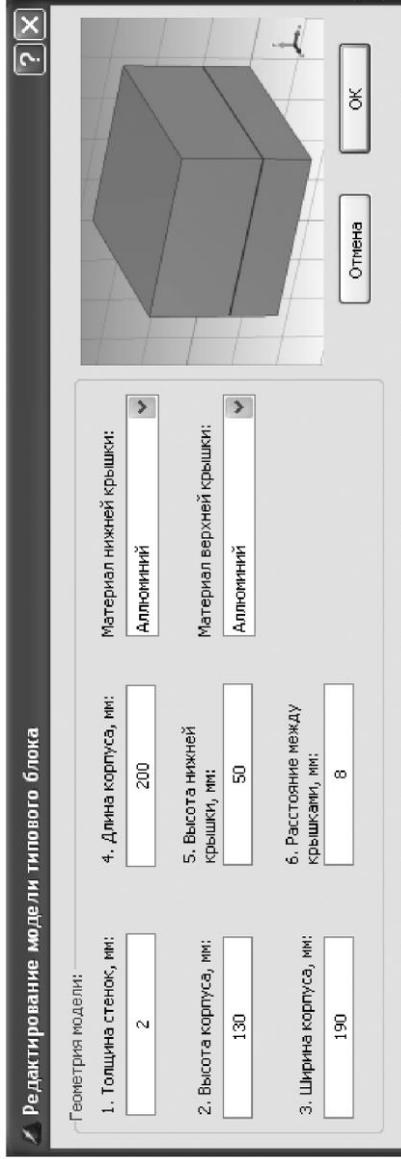


Рис. 14. Диалоговое окно для редактирования параметров модели типового блока

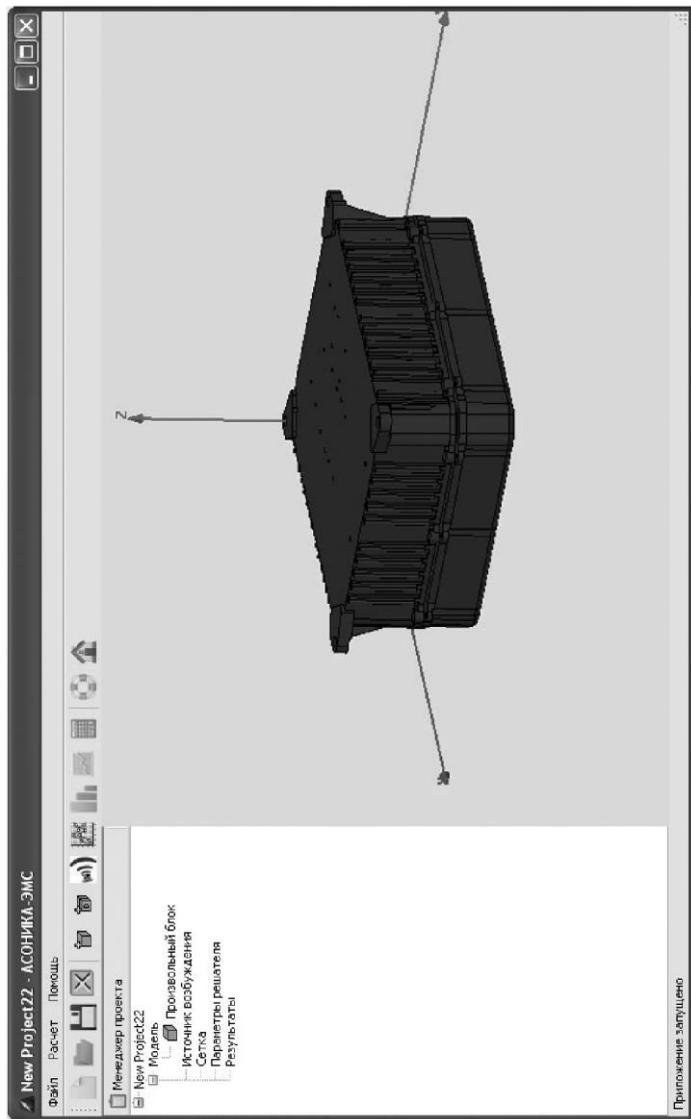


Рис. 15. Диалоговое окно для импорта модели из формата SAT

После того как трехмерная модель конструкции анализируемого корпуса введена в проект, необходимо задать параметры источника возбуждения (плоской электромагнитной волны). Для этого в меню «Расчет» программы АСОНИКА-ЭМС, следует выбрать подменю «Источник возбуждения», а в нем – пункт «Плоская волна» (рис. 16).

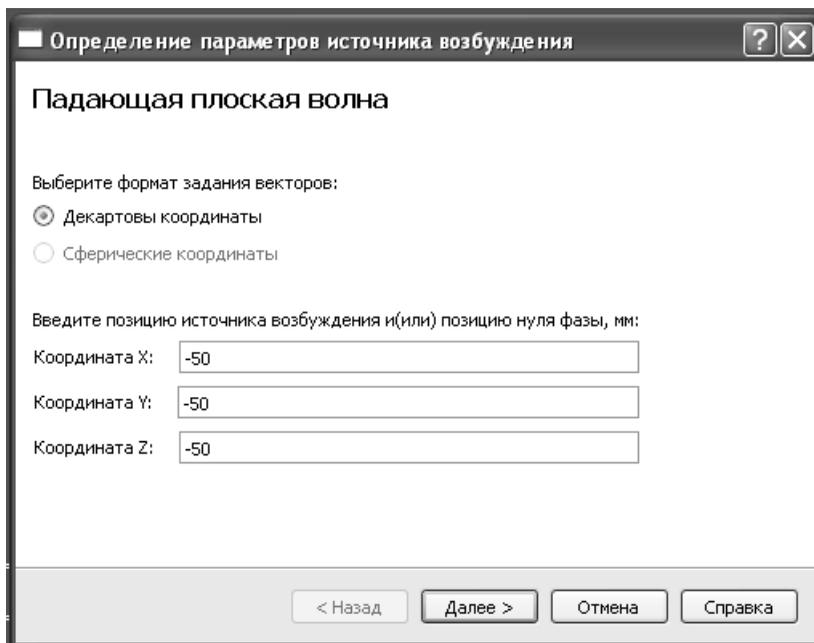


Рис. 16. Диалоговое окно для настройки параметров источника возбуждения

В появившемся диалоговом окне задаются формат ввода векторов (декартовы или сферические координаты), а также позиция источника возбуждения. В зависимости от выбранного формата появляется то или иное окно задания параметров электромагнитной волны (рис. 17, 18), после чего задаются тип плоской волны, а также параметры, зависящие от этого типа (рис. 19).

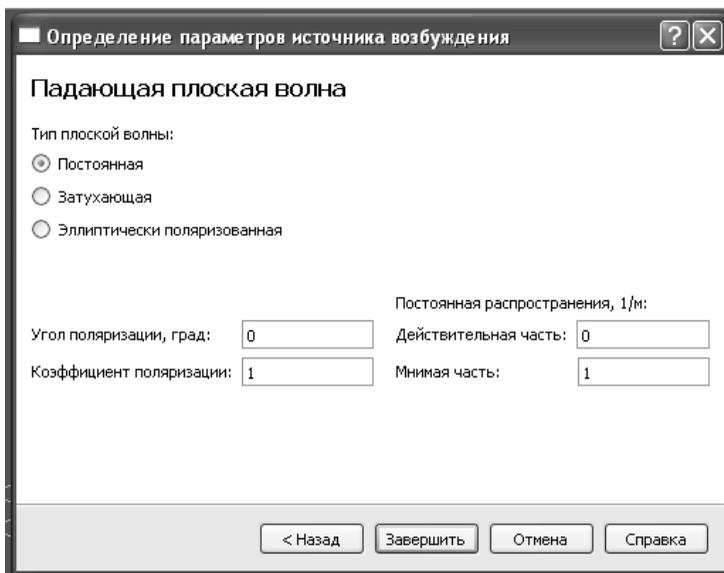


Рис. 19. Диалоговое окно для задания типа плоской волны

После задания параметров 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 мал размер каждого из отдельных элементов (тетраэдров). Решения, в которых используется большее число элементов, точнее, чем решения, выполненные с помощью крупных ячеек, состоящих из относительно небольшого числа элементов. Самым правильным критерием для выбора размеров ячейки является малая вариация поля в ее пределах. В этом случае поле можно корректно аппроксимировать 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. На рис. 20 показано диалоговое окно задания параметров сетки конечных элементов, с помощью которого можно задать ограничения на длину элементов или на их число. Это окно вызывается с помощью меню «Расчет | Параметры сетки КЭ».

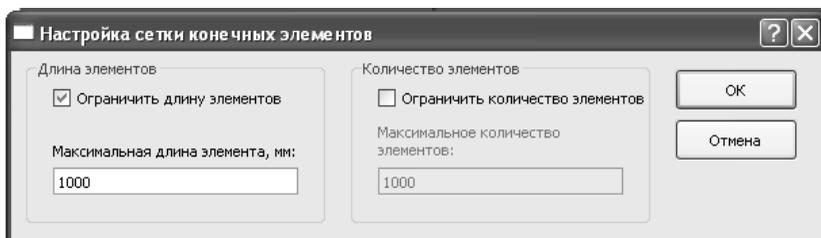


Рис. 20. Диалоговое окно для настройки сетки конечных элементов

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

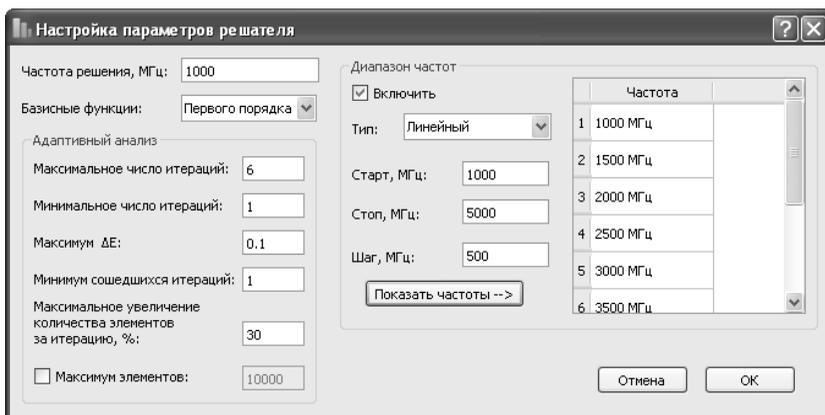


Рис. 21. Диалоговое окно для настройки параметров решателя

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).

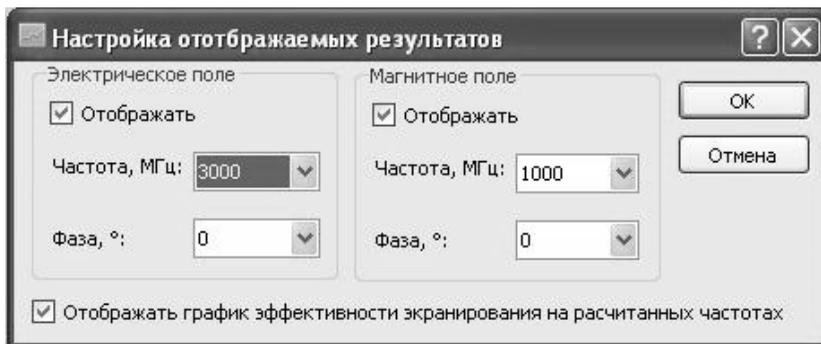


Рис. 22. Диалоговое окно для настройки отображаемых результатов

В этом окне можно задать отображение электрического и магнитного полей для разных частот (если задан их диапазон) и фаз. 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 напряженность) и цветом (от фиолетового к красному). Интерфейс пользователя реализован с помощью легко доступного пакета библиотек Qt.

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

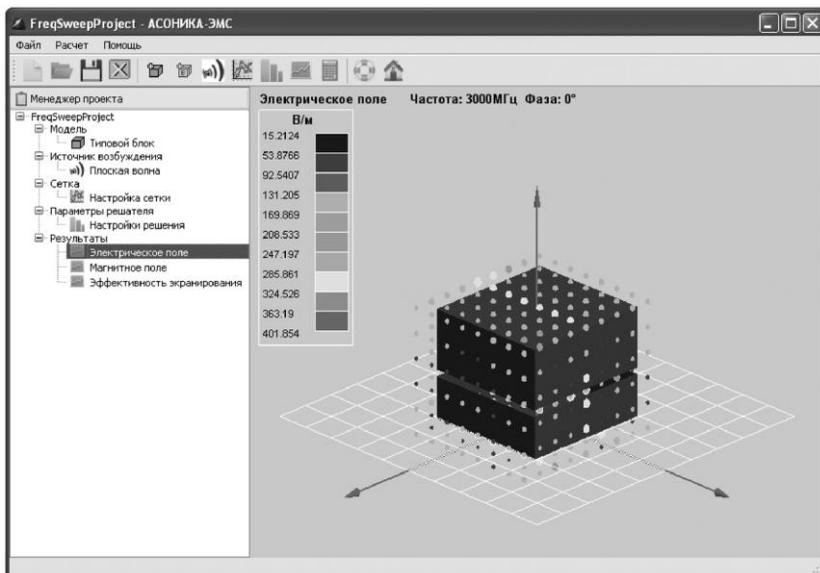


Рис. 23. Диалоговое окно для отображения результатов расчета

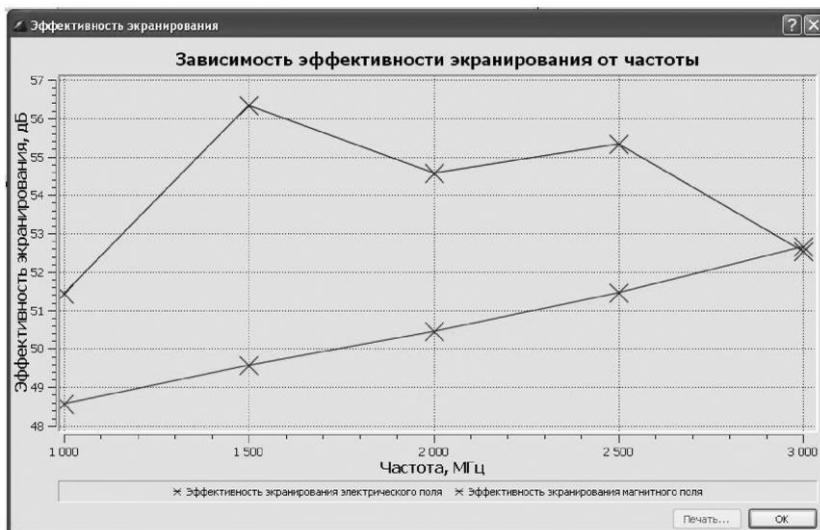


Рис. 24. Зависимость эффективности экранирования от частоты

Информация о модели, введенная с помощью интерфейса пользователя, передается программе-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.

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 трехмерного электромагнитного моделирования АСОНИКА-ЭМС, являясь составной частью системы АСОНИКА, 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.

Система АСОНИКА-ЭМС имеет ряд преимуществ перед зарубежными аналогами. Самое существенное из них – 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 для АСОНИКА-ЭМС планируется реализовать связь с общей базой данных (БД) системы АСОНИКА, в которой содержатся электрофизические параметры материалов, используемых в электронной промышленности. Кроме того, предполагается обеспечить вывод исходных данных и результатов расчета в текстовый процессор Microsoft Office Word, а также разработать программный модуль расчета наведенных помех в кабелях, связывающих электронные устройства.