

4. Аналоговые и цифровые блоки, высокочастотные и низкочастотные узлы следует располагать отдельно друг от друга.

5. Проектируя высокочастотные блоки следует располагать компоненты наиболее компактно используя сигнальные трассы минимальной длины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боцман А.С. Обеспечение ЭМС радиоэлектронных модулей на этапе трассировки печатных плат / Боцман А.С., Жарикова И.В. // Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи. – 2016. – С. 31–33.

2. Сабунин А.Е. Размещение компонентов на плате и трассировка печатных проводников // Современная электроника. – 2009. – № 2. – С. 2–11.

3. Щерба А. Проектирование печатной платы для динамически программируемых аналоговых микросхем Anadigm // Компоненты и технологии. 2011. – № 11. – С. 57–60.

4. Мазжерина О.В. Многослойная печатная плата как основа конструкции / Филичев Г.О., Левченко В.И. // Наука, образование, бизнес. – 2014. – С. 333–336.

ОБЗОР СПОСОБОВ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СЕТОК

М.А. Зуева, магистрант

*Научный руководитель С.П. Куксенко, к.т.н., доцент каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, zueva_ria@mail.ru*

Жизнь современного человека сегодня практически невозможно представить без различных электронных, электротехнических и радиоэлектронных устройств, разнообразие которых с каждым годом становится все больше. Вместе с тем, работа этих технических средств (ТС), создает в большей или меньшей степени различные электромагнитные помехи. В результате действия таких помех возникают различные нарушения в работе оборудования, приводящие к выходу его из строя, авариям и сбоям. Поэтому обеспечение требований электромагнитной совместимости на сегодня одна из основных задач проектирования таких ТС. Часто прибегают к компьютерному моделированию, которое представляет огромный интерес, поскольку позволяет проводить предварительный расчет и анализ исследуемой модели. При этом одним из требований является обеспечение высокой точности расчетов при адекватных вычислительных затратах. Эта проблема может быть решена с помощью адаптивных сеток [1].

Цель работы – обзор особенностей построения адаптивных сеток.

При моделировании требуемой структуры, она, прежде всего, заменяется геометрической моделью и далее создается начальная расчетная сетка. Построение сетки, т.е. дискретизация (сегментация) – это процесс разделения модели на небольшие части (симплексы). Сеть узлов и элементов называется сеткой.

В зависимости от типа структуры для построения сетки используются следующие геометрические симплексы: отрезки, треугольники, прямоугольники – при двумерной геометрии; тетраэдры, гексаэдры, призмы, пирамиды – при трехмерной. Выбор симплекса обусловлен типом поставленной задачи, объемами вычислительных ресурсов и требуемой точностью решения. Отрезки применяются при анализе, основанном на поперечном сечении исследуемого объекта. Треугольники дают возможность более точного описания структуры практически любой формы, однако, в данном случае требуются существенные вычислительные ресурсы, поскольку будет построено и рассчитано большее число ячеек, чем при использовании прямоугольников. Также возможно их комбинирование.

По умолчанию, большинство систем проектирования строит равномерную сетку, которая не всегда обеспечивает заданную точность решения. Измельчение сетки на всей исследуемой структуре также не является уместным, поскольку неоправданно сильно увеличивает вычислительные ресурсы и время решения. Поэтому целесообразным является использование адаптивной сетки. При этом сначала строится грубая сетка, затем итерационно добавляются новые узлы в местах, характеризующихся высокой погрешностью (рис. 1 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

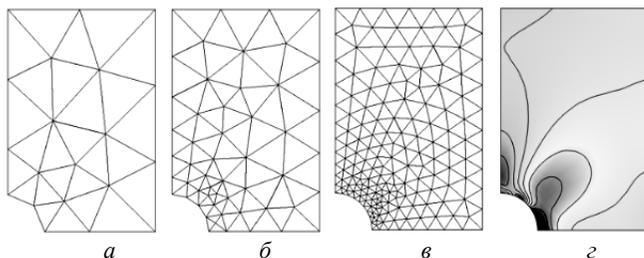


Рис. 1. Грубая сетка (а), процесс измельчения (б–в) и рассчитанная картина поля (г)

На сегодняшний день известно множество методов адаптивной сегментации, однако, большинство из них недостаточно надежны, а некоторые и вовсе весьма трудоемки и не могут быть универсально использованы для моделирования сложных структур. В большинстве

случаев, применение методов построения сетки сводится к заданию исходных условий требуемой точности (индикаторов), далее формируется массив точек, по которым в последствие строится сетка, и проверяется соответствие заданных условий и сходимость решения. На основе индикаторов, выбирается некоторый набор точек для учащения сетки. В качестве индикатора может выступать некоторый параметр (заряд, ток, плотность заряда, плотность тока, электрический потенциал и др.), на основании значений которого, точки, по которым будет проведено дальнейшее учащение сетки, могут быть выбраны таким образом, чтобы решение сходилось при наименьшем количестве ячеек в сетке [2].

Поскольку при построении адаптивной сетки имеется возможность ее учащения только на выборочных участках, чаще всего применяют именно треугольную сегментацию (триангуляцию). Известно, что для получения достоверных результатов, необходимо, чтобы качество треугольника сетки стремилось к единице [3], т.е. треугольники должны быть равносторонними, насколько это возможно, поскольку элементы с острыми углами и существенно различающимися сторонами дают больше ошибок. Качество треугольника определяется как:

$$q = \frac{4S\sqrt{3}}{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2},$$

где h_1, h_2, h_3 – стороны треугольника, S – его площадь. Приемлемым считается коэффициент качества $q > 0,6$. Когда $q < 0,6$ треугольники измельчаются посредством добавления новых узлов сетки в центре ребер. Возможны два случая: добавляются три новых узла на трех ребрах любого из рассматриваемых треугольников или новые узлы добавляются только на основаниях и на смежном ребре двух рассматриваемых треугольников. Узлы на всех ребрах, включая старые и новые, могут быть добавлены к массиву новых узлов.

Теоретически, чем больше использовано элементов, тем точнее решение, но выше вычислительные затраты. Однако после определённой малости размеров сетки погрешность начинает снова увеличиваться, поскольку отдельные её элементы становятся очень маленькими, и из-за ошибок округления некоторые числа не могут быть точно представлены на компьютере. Эта проблема присуща всем вычислительным методам.

Многие численные методы, используемые при моделировании, такие как метод моментов, метод конечных элементов, метод граничных элементов, метод конечных разностей и метод конечных разностей во временной области, используют алгоритмы построения адаптивных сеток при решении различных задач [2–5].

Таким образом, рассмотрены основные подходы к построению адаптивных сетей, широко используемые в системах автоматизированного проектирования. Они позволяют итерационно в местах сильного изменения анализируемого параметра утачать сегментацию и тем самым при незначительном увеличении вычислительных затрат существенно повысить точность моделирования.

Работа выполнена в рамках проекта 8.9562.2017/8.9 Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев А.С. Разработка методов построения адаптивных сетей / А.С. Лебедев, В.Д. Лисейкин, Г.С. Хакимзянов // Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7, №3. – С. 29–43.

2. Das A. Efficient adaptive mesh refinement for MoM-based package-board 3D full-wave extraction / A. Das, R.R. Nair, D. Gope // IEEE 22nd. Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS). – 2013. – P. 239–242.

3. Makarov S.N. Low-frequency electromagnetic modeling for electrical and biological systems using MATLAB / S.N. Makarov, G.M. Noetscher, A. Nazarian // John Wiley & Sons Inc. – 2016.

4. Objective selection of minimum acceptable mesh refinement for EMC simulations / A.P. Duffy, Z. Gang, S. Koziel, W. Lixin // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2015. – Vol. 57, No. 5. – P. 1266–1269.

5. Захарова А.А. Минимизация размерности трехмерных моделей нефтегазовых месторождений / А.А. Захарова // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 7. – С. 55–59.

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

М.Д. Дягилев, инженер-конструктор, АО «НПЦ «Полюс»; И.А.

Козырев, студент, каф. РЗИ, ТУСУР

Научный руководитель Л.А. Гоголина, с.н.с., к.т.н.

г. Томск, АО «НПЦ «Полюс», info@polus-tomsk.ru

Существуют многочисленные способы борьбы с помехами в информационных каналах автоматических устройств [1]. Эффективность их применения при обеспечении работоспособности устройств электропривода имеет свои особенности, поскольку рассматриваются несколько каналов связи различного назначения и аппаратного исполнения в условиях близкого расположения источников внутренних помех (силовой ключ, контакторы, двигатель-коммутатор) и дополнительных внешних помех (нормального и общего вида) [2]. В заданных условиях помеховой обстановки на множество линий связи воздейст-