

ЗНАКОМСТВО С СИСТЕМОЙ СВЧ-МОДЕЛИРОВАНИЯ EMPIRE XPU 7.6

В статье рассматривается проект микрополосковой линии как пример для иллюстрации возможностей EMPIRE XPU при работе с печатными платами с топологией СВЧ-диапазона.

EMPIRE XPU™ — это симулятор 3D электромагнитного поля, основанный на мощном методе конечных разностей во временной области (FDTD), который стал стандартом для разработки компонентов СВЧ. Его применение простирается от анализа многослойных структур, межсоединений и многопортовых устройств до волноводов, антенн и решения проблем ЭМС.

Система EMPIRE XPU предоставляет все необходимые функции волнового решателя, такие как импорт и экспорт, простая настройка структуры, автоматическое разбиение, параметризация, запуск в пакетном режиме, удаленное управление и оптимизация, что делает возможными быструю разработку и анализ радиочастотных компонентов и схем. Благодаря его уникальной компиляции «на лету» и многоступенчатому представлению времени эта система может экстенсивно использовать современные процессорные архитектуры, что позволяет достигать производительности до 20 млрд ячеек в секунду.

Размер ячеек формируется исходя из требуемой точности вычислений. Например, для первоначальной оценки можно задать «грубую сетку»; затем,

для получения более точных результатов, следует перейти на «точную сетку». В первом случае ниже точность вычислений, но производится более быстрая оценка анализируемой структуры. Поскольку предусмотрено несколько градаций точности, решение можно получить с помощью итераций. Заметим, что модель стационарна, не зависит от времени, но можно задать на вход структуры возбуждающие импульсы с привязкой по времени.

Высокая производительность EMPIRE XPU позволяет осуществлять анализ таких большеразмерных структур как ячеистые волноводные антенны, автомобильные антенны, а также выполнять симуляцию ЭМС и безопасности человека, рассеивающих полигонов и больших антенных решеток в разумное время. Система работает и под ОС Windows, под Linux. Чтобы установить 30-дневную под демоверсию системы, следует обратиться на сайт производителя [1].

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

При запуске EMPIRE XPU через пиктограмму на рабочем столе появляется стартовое окно (рис. 1), которое позво-

- создать новый проект;
- открыть существующий проект;
- запустить один из множества встроенных шаблонов или примеров.

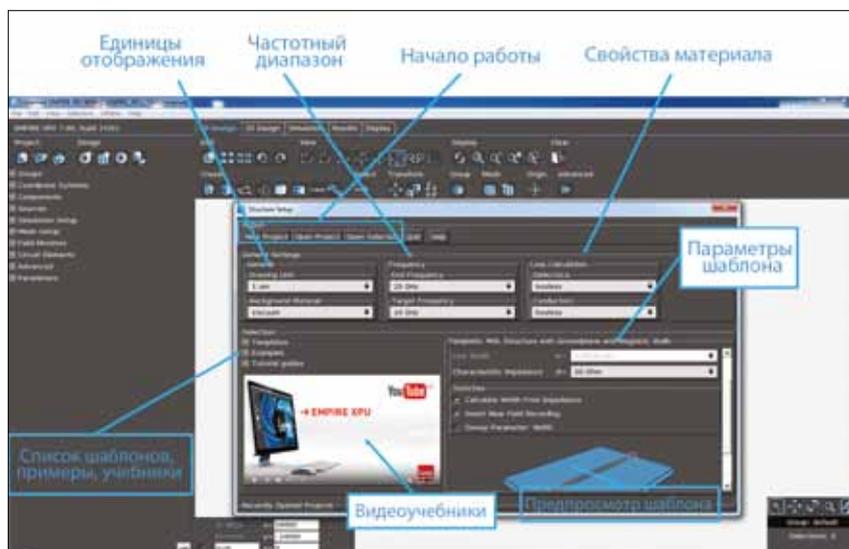
Пользователь может начать «с чистого листа» или выбрать пошаговый учебник, уже смоделированный пример или шаблон-заготовку. В стартовом окне можно установить некоторые общие параметры для нового проекта (единицы отображения, диапазон частот, точность и т. д.). Частотный диапазон и разрешение определяют ширину импульса, который используется как сигнал для возбуждения порта. Во время моделирования значения напряжений и токов записываются, что и определяет частотные параметры при постобработке.

ОБЗОР ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА

Новый релиз EMPIRE XPU имеет обновленный пользовательский интерфейс, который организован в соответствии со стандартным маршрутом моделирования (рис. 2). Этот маршрут, встроенный в пользовательский интерфейс, можно описать такой последовательностью действий.

- Создать модель:
 - создать новый проект или загрузить проект, пример или шаблон;
 - установить единицы, геометрические характеристики, материалы и параметры.
- Задать порты.
- Задать параметры моделирования:
 - частотный диапазон, точность, граничные условия.
- Задать сетку:
 - ручная сетка, или параметры для авторазбиения.
- Определить мониторы поля.
- Запустить моделирование:
 - одиночная симуляция, качание параметров или оптимизация.
- Проверить результаты:
 - S-параметры, импедансы, ближнее поле, дальнее поле.

Рассмотрим назначение элементов пользовательского интерфейса (рис. 3).



▲ Рис. 1. Стартовое окно САПР Empire XPU

Дерево навигации (Navigation Tree)

В дереве навигации можно получить доступ к СВЧ-структуре и редактировать каждый элемент модели. Можно также задать параметры симуляции, сетку и получить доступ к дополнительным параметрам редактора («Импорт», «Экспорт», «Графические настройки», «Свойства курсора и привязки»). Кроме того, в этой части пользовательского интерфейса можно создавать мониторы поля. Доступны также дополнительные параметры задания сеток, список текущих выбранных объектов и последний скопированный фрагмент. Координаты объектов и значения свойств, например диэлектрическую проницаемость, можно задать параметрически. Дерево навигации содержит список параметров с опциями качания (сви́пирования) параметров.

Кнопки настроек (Set Up Buttons)

Кнопки настроек предоставляют гибкий способ доступа к наиболее часто используемым функциям, чтобы настроить параметры моделирования, сетку и выбрать опции редактора.

Окно помощи и полоса индикации процесса (Help and Progress bar)

Это окно отображает информацию о функциях графического интерфейса EMPIRE XPU, доступ к которым осуществляется с помощью левой, средней и правой кнопок мыши. Полоса индикации процесса моделирования отображается во время его выполнения.

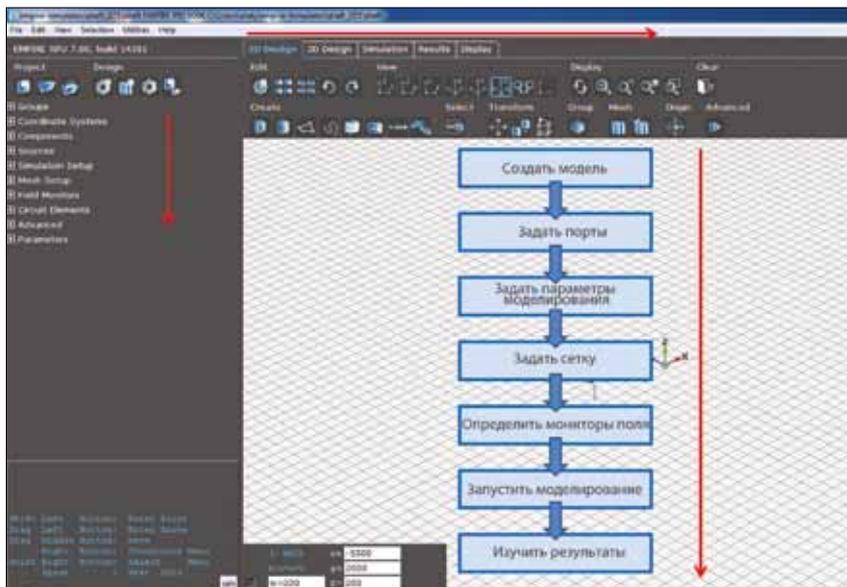
Для работы рекомендуется использовать трехкнопочную мышь с колесиком. Если средняя кнопка мыши недоступна, ее функцию можно сымитировать:

- колесико: Shift + правая/левая кнопка мыши;
- средняя кнопка: Ctrl + левая кнопка мыши.

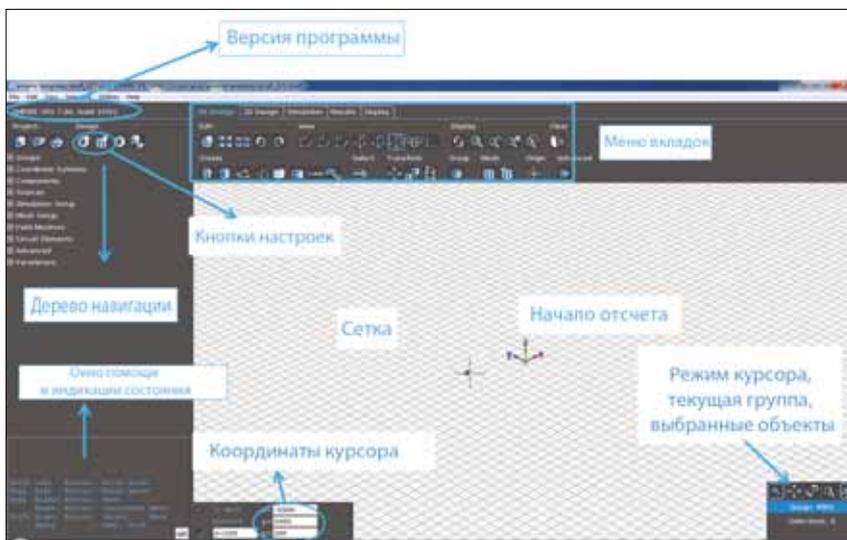
Вкладки (Tabs Menu)

Вкладки (рис. 4) организованы в соответствии с маршрутом моделирования. Используя их, можно переключаться между разными функциональными блоками EMPIRE XPU. Вкладка 2D Design активизирует лист схематического представления, на котором можно рисовать и редактировать структуру в двумерных видах. Проекционный геометрический вид можно просмотреть и отредактировать во вкладке 3D Design. Вкладка Display используется для отображения всей модели и анимаций поля в 3D после симуляции. Чтобы отобразить графики ближнего и дальнего полей, следует определить мониторы поля.

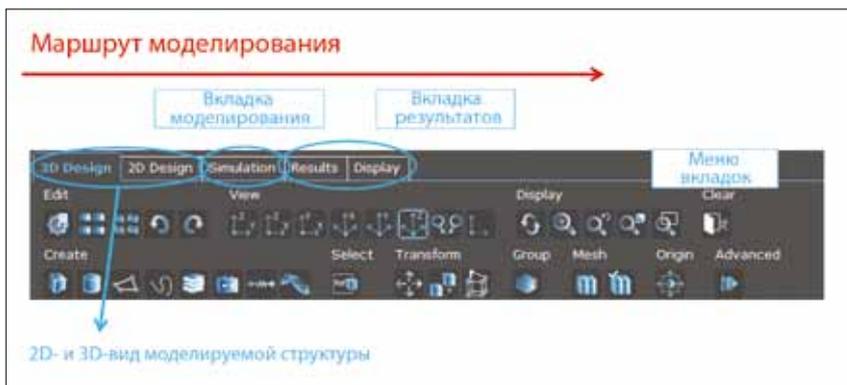
Перед моделированием доступны только вкладки 2D, 3D и Display. После запуска моделирования режим отображения меняется на вкладку Voltage, и отображаются временные последовательности изменения напряжения в портах. После завершения моделирования



▲ Рис. 2. Маршрут моделирования СВЧ-структур



▲ Рис. 3. Элементы пользовательского интерфейса



▲ Рис. 4. Меню вкладок

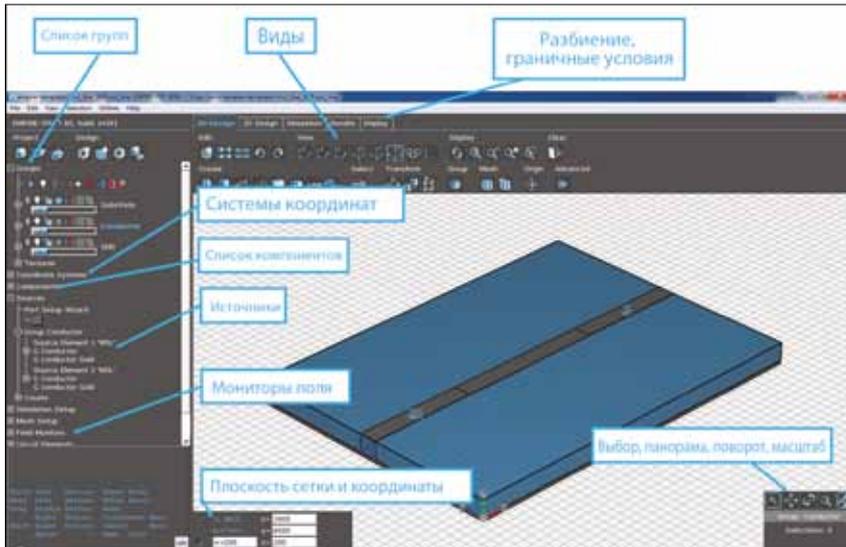
отображаются параметры излучения Scattering Parameters. Пользователь может переключиться в режимы отображения импеданса или дальнего поля, если они доступны.

СОЗДАНИЕ ПРОЕКТА

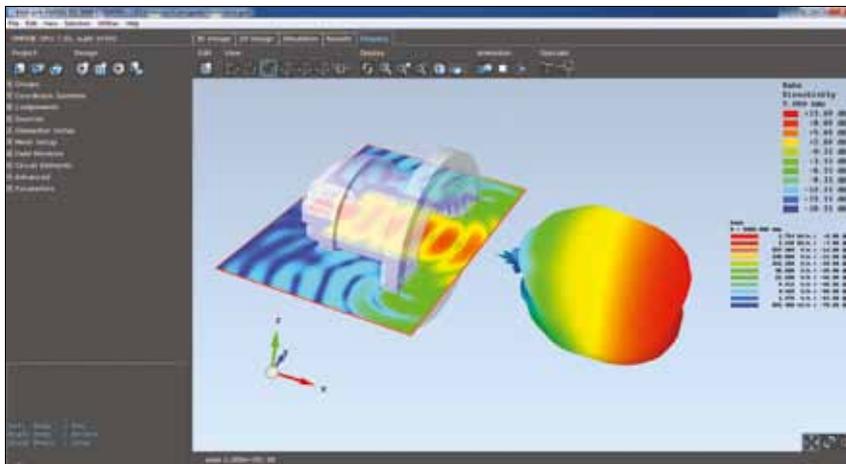
Выбирая на стартовой странице Open Selection, мы открываем шаблон

по умолчанию с настройками (рис. 5). Это шаблон микрополосковой линии с двумя портами. Единицы отображения установлены в 1 мкм, использовано среднее разрешение сетки. Частотный диапазон составляет 0–20 ГГц, и пока считается, что все материалы не вносят потери.

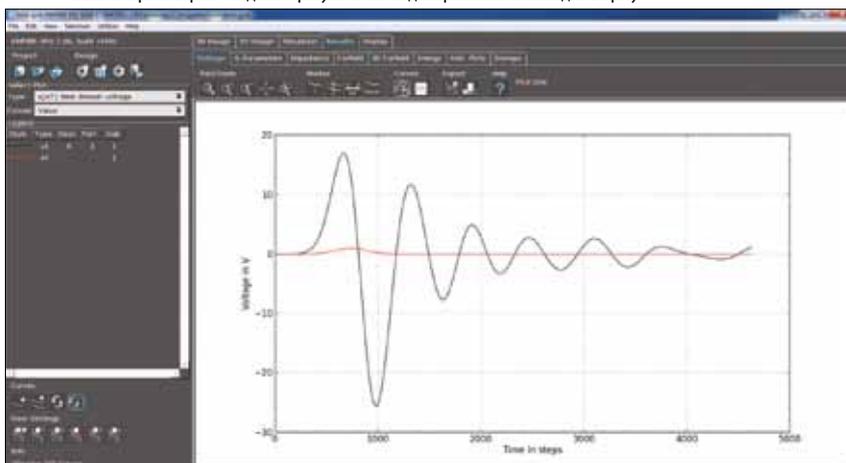
Во вкладке 2D отображена моделируемая структура в виде проволочной



▲ Рис. 5. Шаблон микрополосковой линии



▲ Рис. 6. Просмотр 3D-модели и результатов моделирования на вкладке Display



▲ Рис. 7. Просмотр графиков результатов моделирования на вкладке Results

модели. Справа и внизу отображается текущая сетка FDTD (разбиение) в виде коротких линий, из которых крайние внешние определяют область моделирования. В зависимости от граничных условий границы области моделирования помечены зеленым (магнитные), красным (электрические) или пунктирными линиями (открытые).

В дереве навигации (слева) имеются списки для создания и управления

группами, компонентами, источниками, мониторами поля и т. д. Наверху можно выбрать вкладки для разных режимов отображения. Во вкладках 2D и 3D пиктограммы первого ряда относятся к действиям с проектом и к вариантам отображений. Во вкладке 2D во втором ряду появляются контекстно-зависимые кнопки для операций редактора, т. е. в зависимости от выбранных объектов или команд.

Вкладка Display позволяет просмотреть полученную СВЧ-структуру, сетку разбиения и границы. Модель можно разрезать или увеличить в разных сечениях. После моделирования в этой вкладке отображается распределение поля и дальше поле совместно с 3D-моделью СВЧ-объектов (рис. 6).

Вкладка Results показывает графики в процессе и по окончании вычислений (рис. 7).

СОЗДАНИЕ СВЧ-СТРУКТУРЫ

Рассмотрим базовые компоненты и маршрут работы в EMPIRE XPU.

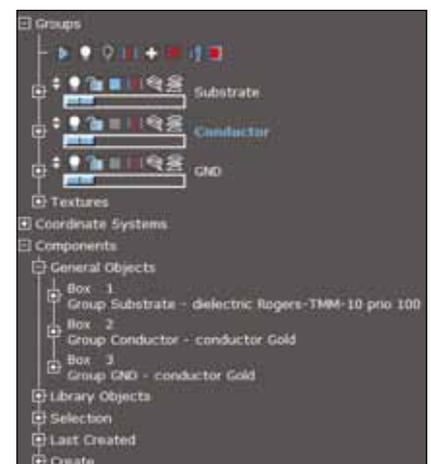
Создание 3D-модели

Объекты (Boxes, Polygons, Wires, Solids — боксы, полигоны, провода, тела) с общими свойствами организованы в группы (**Groups**). Рекомендуется создавать группу, задавать ее свойства, затем создавать объекты, принадлежащие этой группе, и продолжать таким же образом со следующей группой. Некоторые объекты (рис. 8), например полигоны, провода и порты, используют значение поля **Height** («Высота группы»).

В EMPIRE XPU встроен новый мастер для импорта данных топологии (в формате DXF, Gerber, GDS). В окне импорта Gerber-файлов выбирается группа и высота для каждого слоя данных.

Импортированные 3D-данные (формат STL) могут создавать группы автоматически, и только их свойства должны быть определены вручную. Объекты создаются в режиме 2D в видах Top («Сверху»), Front («Спереди») или Right («Справа»). Они создаются и редактируются с использованием списка **Components** («Компоненты»).

Для выбора объектов следует навести курсор на один из краев объекта и нажать левую кнопку мыши. Если объекты лежат один на другом, требуется нажать и потянуть среднюю кнопку мыши для переключения между объектами или отключить ненужные слои.



▲ Рис. 8. Пример списка групп Substrate, Conductor и GND

Для выбора нескольких объектов можно использовать кнопки *Select overlapping outside/inside*, а для выбора всех видимых на экране объектов — *Ctrl-A*.

Группы и свойства объектов

Объекты с разными свойствами должны быть организованы в отдельные группы. Эти свойства могут быть или физическими (например, материал), или геометрическими (например, высота), или функциональными (например, управление разбиением СВЧ-структуры на части). Группы управляются через список в навигационном дереве (рис. 9). В нем задаются имя, цвет и стиль группы (чтобы их различать). Каждую из них можно заблокировать или скрыть для предотвращения случайной модификации объектов.

Новые объекты всегда создаются в активной группе, которая отображается с подсвеченным именем и индицируется в нижней строке графического интерфейса. Вновь созданная группа автоматически отмечается как активная и подсвечивается синим цветом. Для активации другой группы следует щелкнуть левой кнопкой мыши на имени соответствующей группы.

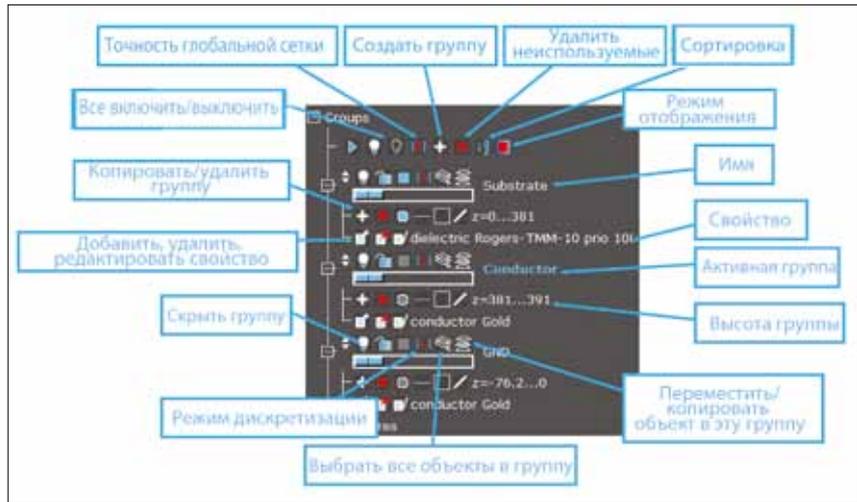
Высота группы используется для назначения объектам типа «бюкс» или «полигон» соответствующего вертикального размера или для корректировки расположения библиотечных объектов, например, это может быть слой диэлектрика или меди в печатной плате.

Все объекты в группе по умолчанию наследуют ее свойства. В некоторых случаях группа может иметь более одного свойства (например, проводник и настройки разбиения). Более того, режим разбиения выбирается индивидуально для каждой группы, чтобы классифицировать значимость объектов группы для моделирования, а именно:

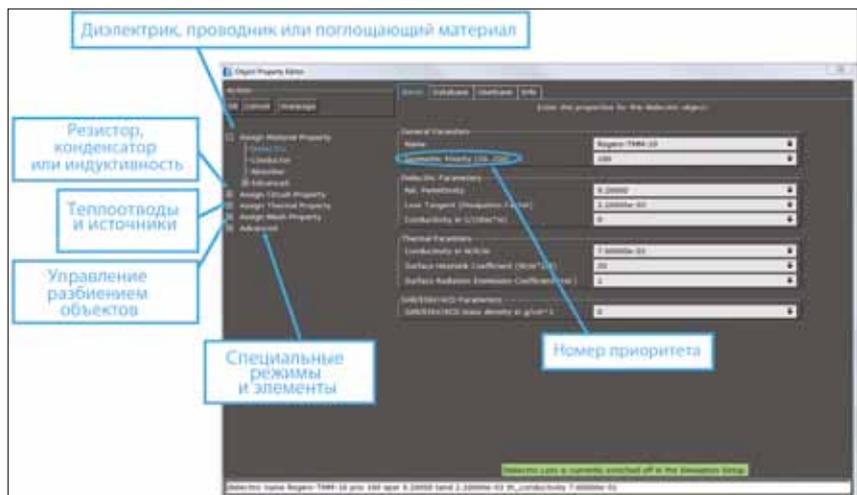
- по умолчанию: разбивать границы и внутреннее содержимое объектов;
- разбивать только границы объектов;
- не разбивать объекты в этой группе;
- разбивать границы объектов и детально разбивать внутреннее содержимое;
- игнорировать границы, разбивать только внутреннее содержимое;
- разбивать только промежутки.

При нажатии кнопки *Add property* («Добавить») или *Edit property* («Редактировать») в списке группы активируется редактор свойств **Object Property Editor** (рис. 10).

Можно выбирать несколько предопределенных свойств и назначать объектам группы. Свойства материалов выбираются с помощью команды **Assign Material properties**, которая предоставляет доступ к большой базе материалов (диэлектриков, проводников и абсор-



▲ Рис. 9. Организация групп



▲ Рис. 10. Окно редактора свойств объекта

биров). В ней можно создать пользовательскую базу материалов. Каждому свойству материала можно назначить приоритет, определяющий преобладающее свойство в случае пересечения объектов. Чем выше его значение, тем выше приоритет у редактируемого материала. Специальные модели или возможности воздействий имеют дополнительные свойства.

Создание объектов

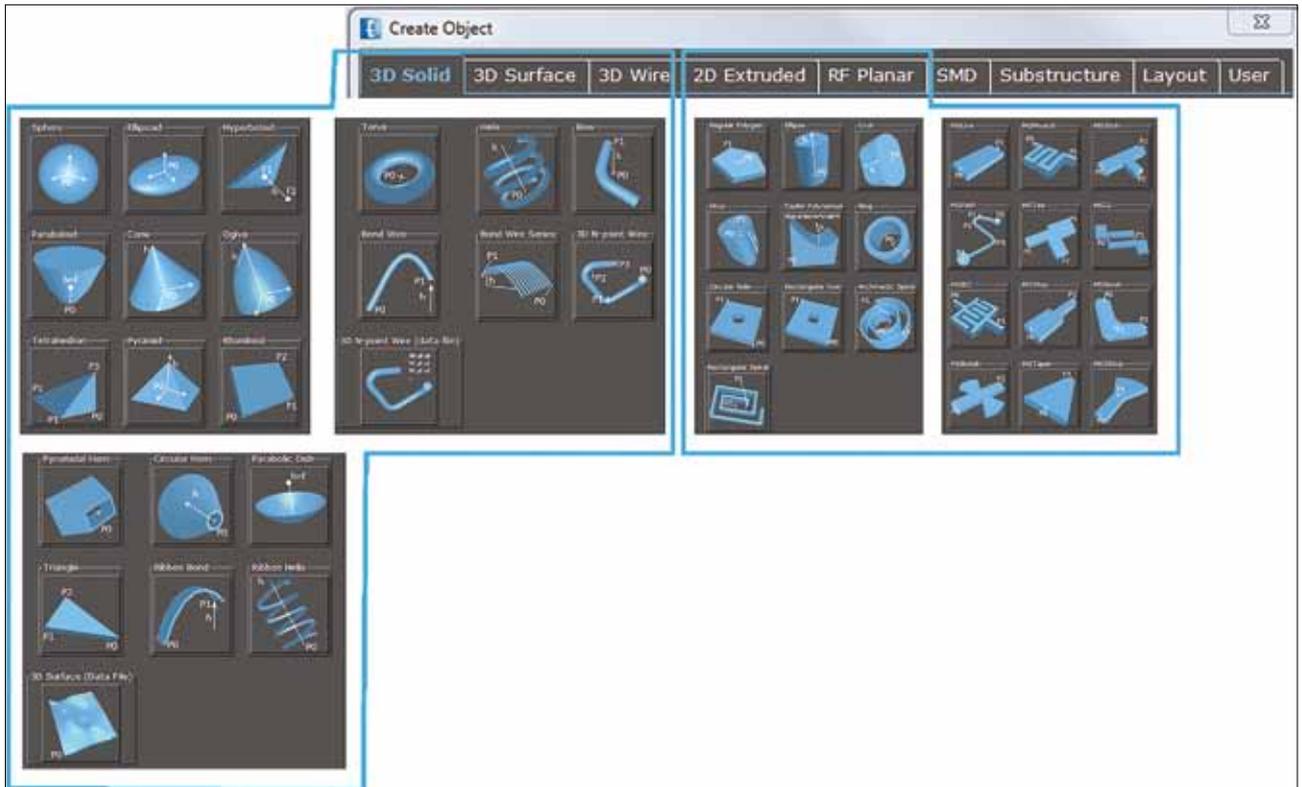
В EMPIRE XPU базовые объекты — боксы, полигоны, линейные и вращательные полигоны. Их края или углы представлены точками (видимыми после выбора), которые доступны для модификаций (вытягивания, передвижения и т. д.). После создания объекты находятся в списке **Components** в дереве навигации слева.

• **Box** — объект состоит из шести координат. Они определяются либо с помощью списка компонентов, либо в окне рисования в одном из плоских видов. Другой вариант — создать вектор, который пересекает структуру слоев. В этом случае задается высота группы, перпендикулярная текущему виду, т. е. она определяет по умолчанию глубину бокса.

• **Poly (gon)** относится к той же концепции высоты группы. В списке компонентов полигоны определяются как законченный набор точек в текущем слое, при том что толщина задается высотой группы. В окне рисования полигон создается последовательно введением точек. Полигон, содержащий единственную точку и радиус, представляет круглый цилиндр, а для множества точек радиус действует как скругление углов полигона. Импортированные структуры всегда обрабатываются как полигоны.

• **Rot (ational) poly (gon)** можно получить из обычных полигонов. Они создаются путем ввода вектора как оси вращения в слое, являющемся сечением полигона, и выбором самого исходного полигона.

• **Solid objects** — объемные тела, которые обычно являются результатом булевых операций или неортогональных вращений, примененных к объектам. Объекты этого типа можно также получить после раскрытия библиотечного объекта, или если трехмерные данные в формате STL импортированы из других источников.



▲ Рис. 11. Внешний вид некоторых объектов в библиотеке

Более сложные объекты можно взять из библиотеки объектов, доступ к которой осуществляется путем нажатия **Create Object** (рис. 11) с последующим вводом координат и настройкой параметров каждого объекта. Эти объекты можно скопировать, переместить, повернуть или отразить зеркально. Если их требуется модифицировать, например с помощью булевых операций, то они сначала преобразуются в объемные тела или полигоны с помощью операции **Explode**. После создания все объекты находятся в списке **Component**, и их свойства можно редактировать. Объекты можно модифицировать, например, для выравнивания координат или добавления параметров (например, $r = 100 + x$). Соответствующий объект подсветится, если протянуть курсор мыши над элементами списка. Объект выбирается для дальнейших операций, если щелкнуть левой кнопкой мыши один из элементов списка.

ОПЕРАЦИИ

Панель операций отображает доступные возможные операции. Если ничего не выбрано, видны только кнопки, показанные на рис. 12. Кнопки, которые нужны чаще других, объединены в ряд и разделены в соответствии с функциональностью. Более сложные операции выбираются с помощью кнопки **Advanced**. После на-



▲ Рис. 12. Панель управления

жатия одной из этих кнопок появляется диалоговое окно на левой стороне, которое запрашивает ввод точек, векторов, чисел и т. д. для завершения выбранной операции. В то же время все текущие операции имеются в контекстном меню, если щелкнуть правой кнопкой мыши поверх области рисования.

Тип кнопок или функциональность, указанная в панелях инструментов, зависит от текущего выбора. Если был выбран объект типа «бюкс» панель операций меняет свой вид так, как это показано на рис. 13, чтобы были показаны операции, доступные для данного типа объектов. Как упо-

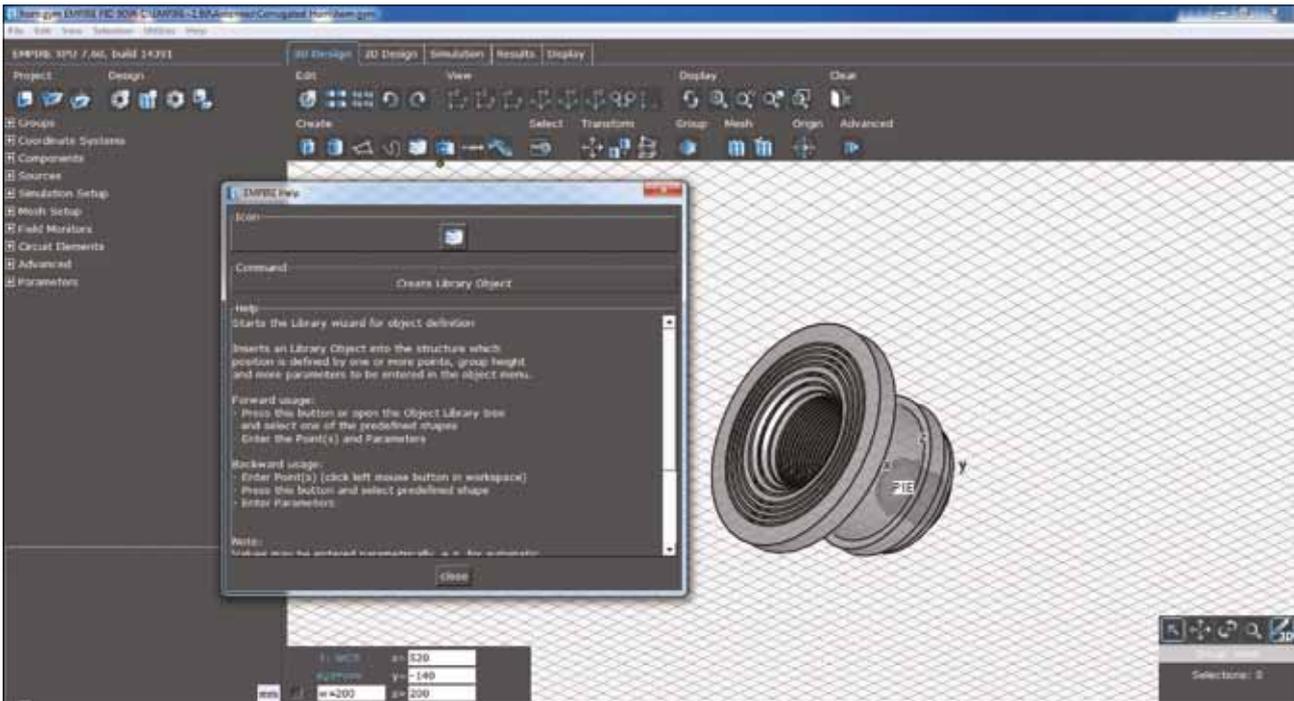
миналось, кнопки для наиболее важных действий показаны в ряду, тогда как доступ к более сложным операциям обеспечивается с помощью кнопки **Advanced**.

Для всех операций имеется онлайн-подсказка на английском языке, которая активируется перемещением курсора на одну из кнопок и нажатием правой кнопки мыши (рис. 14). В этом случае возникает краткое описание соответствующей операции.

Некоторые операции, например перемещение, копирование или растяжение, выполняются путем ввода данных мышью. Когда выбраны объекты в окне 2D



▲ Рис. 13. Панель инструментов после выбора объекта типа «бюкс»



▲ Рис. 14. Окно онлайн-подсказки при нажатии правой кнопки мыши

(левая кнопка мыши удерживается), отображается информационное окно, показывающее тип объекта (Vox), свойство объекта (например, диэлектрик) и имя группы объекта (Substrate).

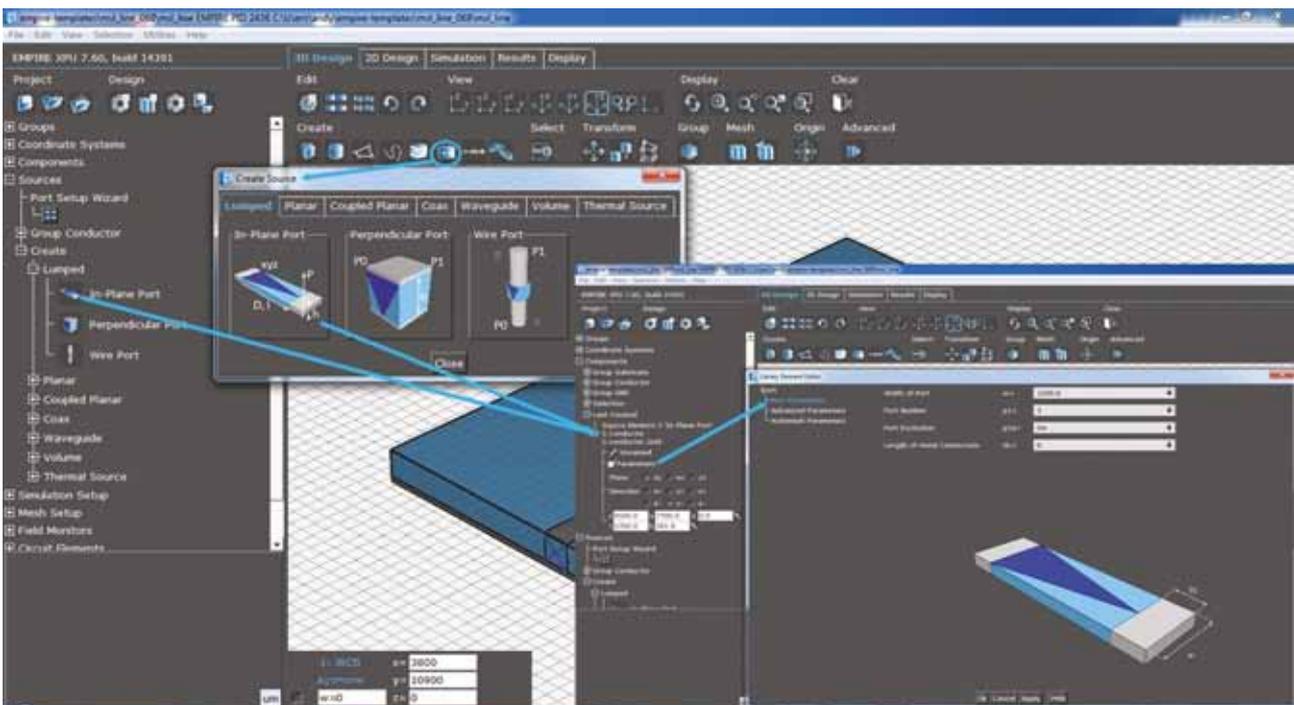
После того как кнопка мыши отпущена, объект остается подсвеченным, и видны квадратные точки, которые представляют вершины полигонов или ребра боксов. Невыбранные точки (красного цвета) активируются (цвет меняется на зеленый), если их щелкнуть левой кнопкой мыши. Перемещением курсора по верху одной из зеленых точек выполняются следующие действия в области рисования:

- **stretch** — растянуть активные точки (нажмите и потяните левой кнопкой мыши);
- **copy** — скопировать объект в окне 2D (нажмите и потяните средней кнопкой мыши);

• **move** — переместить объект в окне 2D (нажмите и потяните правой кнопкой мыши).

Кроме того, точки можно добавлять, заменять или удалять. Полезные горячие клавиши для управления:

- z/вектор: zoom extends/region — выделить область/регион;
- u: undo — отменить операцию;
- r: redo — повторить операцию;
- r вектор: select overlapping — выбрать перекрываемые объекты;
- e вектор: select enclosed — выбрать объекты внутри;
- Ctrl A: Select all — выбрать все;
- Ctrl X: Cut to clipboard — вырезать в буфер;
- Ctrl C: Copy to clipboard — скопировать в буфер;
- Ctrl V: Paste from clipboard — вставить из буфера.



▲ Рис. 15. Пример определения порта

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРТА

После определения объектов определяются порты и воздействия. В большинстве случаев структура получает воздействие от сосредоточенных портов или питающих линий с заданным характеристическим импедансом. На портах записываются последовательности значений напряжения и тока, в то время как структура подвергается воздействию импульса. Чтобы установить эти порты, используется библиотека заранее определенных портов. Как типовые линии передачи, так и сосредоточенные порты выбираются в окне **Create Source** или списке примитивных портов **Sources**.

После выбора одного из портов в окне 2D или 3D появляется окно настроек (рис. 15). Сначала определяются поперечное и продольное направления. Параметры порта, например номер, возбуждение включения и выключения, геометрия, тип порта, импеданс, задержка по времени и т. д., вводятся путем выбора **Edit Parameters**. Затем выравниваются начальная и конечная координаты путем определения стартовой точки, длины и высоты на чертеже (в случае перпендикулярного порта эти точки относятся к сечению структуры).

Порты полосковые (**Stripline**), **MSL** и **CPW** определяются на слое со свойствами **Conducting** («Проводящий»). Диэлектрические и заземляющие слои определяются отдельно. Если портов много, упростить их настройку можно созданием массива портов **Port Array Setup**.

ТИПЫ ПОРТОВ

Локализованные порты (**Concentrated**)

Опорный план порта представлен пунктирной синей линией. Он расположен на определенном расстоянии от возбуждающего источника (отмеченного крестом). Линия терминирована плоским резистором. Падающая и отраженная волны рассчитываются с использованием номинального импеданса (рекомендовано для закрытых структур и общего применения).

Поглощающие/согласованные порты (**Absorbing/Matched**)

Питающие линии расширяются до границ, где применяются граничные условия поглощения (**Absorbing Boundary Conditions**). Источник симулируется отдельно, так что падающая и отраженная волны рассчитываются без использования импеданса линии (рекомендовано, если импеданс линии неизвестен).

Калиброванные порты (**Calibrated**)

И сосредоточенный, и поглощающий порты можно установить в состоянии калиброванного порта, на котором опор-

ный слой можно сдвинуть в произвольное положение. Падающая и отраженная волны рассчитываются с помощью импеданса линии и эффективной диэлектрической проницаемости.

Сосредоточенные порты (**Lumped**)

Сосредоточенные порты нельзя использовать на открытых границах. Порт состоит из источника тока с параллельной нагрузкой. Падающая и отраженная волны рассчитываются с помощью номинального импеданса (рекомендовано, если участки питающих линий незначительны).

НЕОБХОДИМО УЧЕСТЬ, ЧТО:

- направление портов должно совпадать с одной из основных осей, за исключением проводных портов (**Wire Ports**). Сосредоточенные порты нельзя располагать на границе;
- поглощающий порт располагается на границе;
- порты состоят из блока напряжения и блока тока, которые записывают сигналы во времени, нагрузку или импеданс порта (в случае сосредоточенного порта);
- если порт возбуждается, к нему добавляется источник в виде блока возбуждения, параллельного нагрузке;
- базовые элементы порта отображаются путем его выбора и нажатия иконки **Explode Library Element**.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

После настройки структуры можно скорректировать некоторые параметры моделирования. Для проверки дискретной структуры запускается процедура автоматического разбиения сетки, и результат визуализируется в 3D-виде. Нажатием кнопки **Simulation** структура проверяется, дискретизируется и компилируется.

Когда начинается симуляция, отображается последовательность изменений напряжений. Как только заданные критерии окончания симуляции достигнуты, выполняется частотное преобразование, становятся доступными S-параметры и другие результаты. Если были определены блоки записи полей, их результаты тоже можно визуализировать путем переключения в режим **Display** и проконтролировать в мониторах поля (**Field monitors**).

УСТАНОВКА ПАРАМЕТРОВ СИМУЛЯЦИИ И СЕТКИ

Когда **EMPIRE XPU** запускается, большинство глобальных параметров моделирования уже введены или заданы в открытом проекте. Эти параметры требуется отрегулировать до запуска моделирования. Параметры моделирования, которые были введены в начале, мож-

но отредактировать в списке **Simulation Setup** в дереве навигации или с помощью кнопки **Simulation Set Up** (рис. 16).

Frequency — введенная частота используется для дискретного преобразования Фурье (**ДПФ**), применяемого к результатам во временной области. Верхний предел конечной частоты определяет верхний предел размера ячейки (например, $dm_{max} < \lambda_{min}/10$).

Mesh Resolution — разрешение сетки определяет точность разбиения. Если оно установлено как **Medium** («Среднее»), то есть 15/4, то число 15 определяет как минимум 15 ячеек на минимальную длину волны, и минимум 4 ячейки используются для разбиения объектов.

Если в структуре имеются проводниковые или диэлектрические объекты, они по умолчанию рассматриваются как объекты без потерь. Другие трактовки потерь корректируются в секции **Loss Calculation**.

Accuracy — параметры точности (в **EM Option** для окна **Simulation Setting**) управляют количеством энергии, остающейся внутри структуры, когда моделирование завершено.

Boundary Conditions — граничные условия; их можно задать независимо для шести сторон области моделирования.

Electric Tangential — электрическое поле принудительно задается равным нулю на самой внешней линии сетки. Используется для заземляющих слоев (без потерь), металлических корпусов или симметричных слоев.

Magnetic Tangential — магнитное поле принудительно задается равным нулю в середине крайней внешней ячейки. Используется для обрезания области моделирования, если излучением на границах можно пренебречь, а также используется как симметричный план.

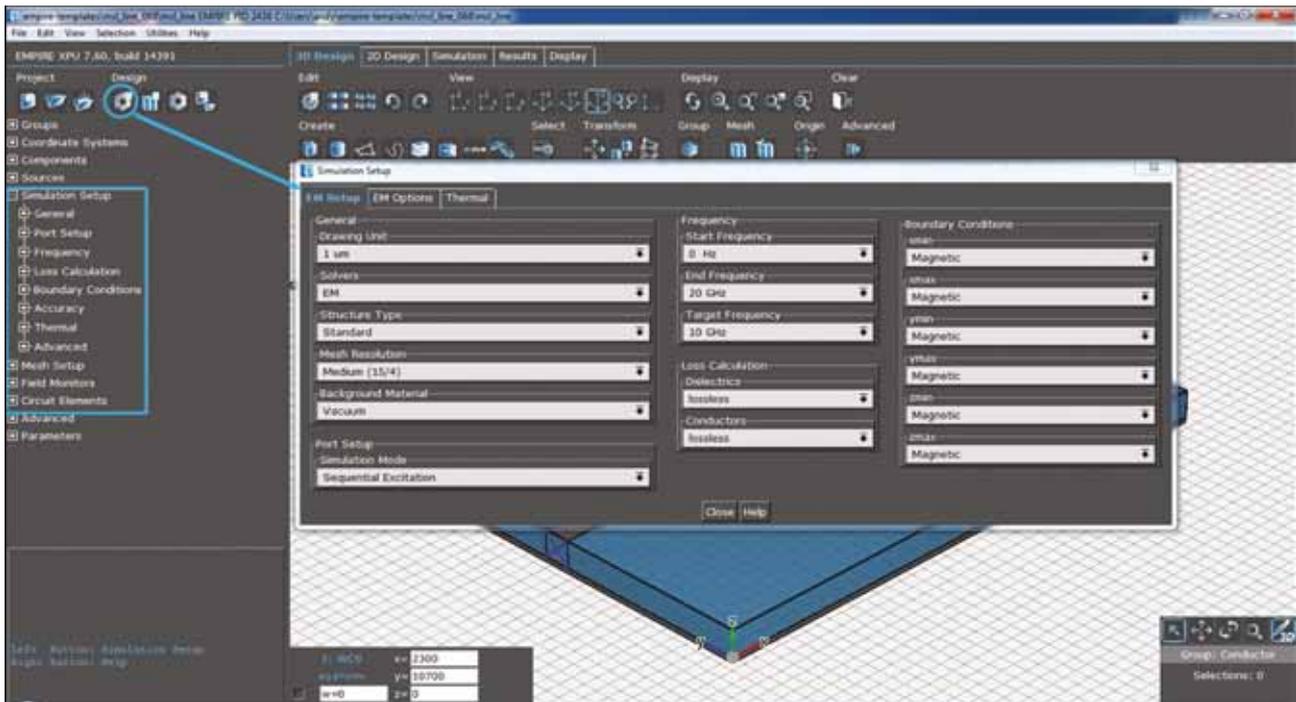
Absorbing n — излучающие границы с n идеально согласованными слоями. Когда число слоев увеличивается, отражения от границ уменьшаются, но скорость моделирования падает. Эти согласованные слои размещаются снаружи области моделирования.

Absorbing n add space — излучающие границы с n идеально согласованными слоями и дополнительным пространством вокруг структуры.

Absorbing sheet — на границе находится лист с сопротивлением 377 Ом, который поглощает излучение, направленное по нормали к границе. Используется для остронаправленного излучения или для подавления режима резонансов внутри «боксов» в моделировании.

НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ РАЗБИЕНИЯ

Еще одна важная процедура для настройки структуры — определение или



▲ Рис. 16. Настройка параметров моделирования в окне Simulation Setup

подстройка разбиения в соответствии с введенными геометрическими параметрами и портами.

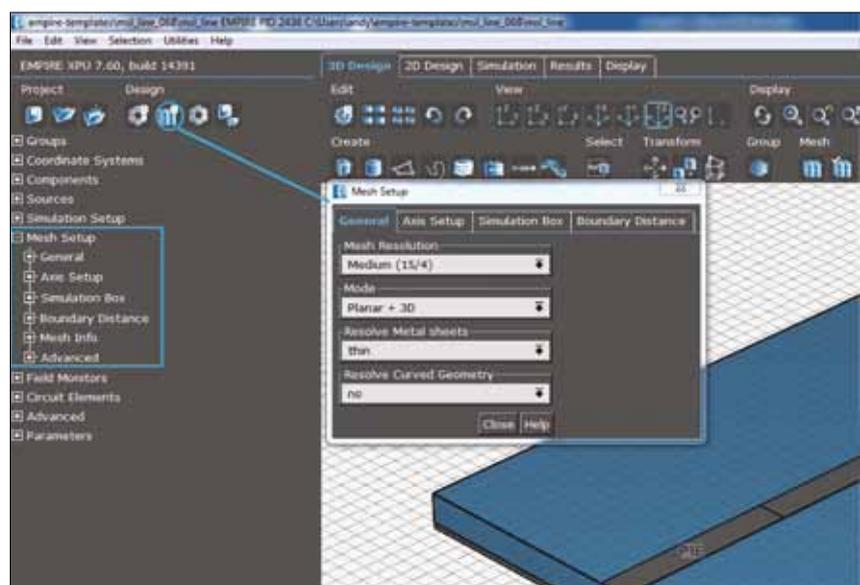
Генерацию сетки разбиения можно выполнить вручную или автоматически, задав разные параметры в секции **Mode**. Рекомендуется генерировать разбиение с помощью функции **Automatic Discretization**. Для этого подстраивается несколько параметров с помощью навигационного дерева или кнопки **Set Up mesh** (рис. 17).

Автоматическое разбиение создает подходящую сетку для введенной структуры. Оно может использоваться в любой момент, например для проверки сетки текущей структуры, и выполняется автоматически перед запуском моделирования. Автоматическое разбиение также определяет границы области моделирования путем обнаружения границ объектов и следуя определенным правилам согласно определению дальнего поля, отклика на возбуждение, размера порта, и т. д. Самые внешние линии сетки задают границы структуры, которые сохраняются неизменными или расширяются при необходимости. Если границы должны быть перемещены, сначала удаляется сетка. Наиболее важные параметры для настройки авторазбиения содержатся в секции **General**. В поле **Mesh Resolution** задается точность разбиения в соответствии с таблицей.

В секции **Mode** можно оптимизировать алгоритмы в зависимости от информации о типах объектов (в основном, они планарные или, в основном, объемные).

Доступные опции:

- Planar + 3D: сетка оптимизируется и для планарных, и для структур 3D.



▲ Рис. 17. Настройка параметров разбиения

Таблица. Точность разбиения

Разрешение	Количество ячеек на длину волны	Количество ячеек на объект
Very coarse	8	3
Coarse	10	3
Medium	15	4
Fine	20	5
Very Fine	25	6
Very Fine 2	28	7
Very Fine 3	31	8
Very Fine 4	34	9

- Планарный план по умолчанию предполагается как полигон, расположенный в плоскости X–Y, но может задаваться иначе в меню опций.

- Planar: линии сетки будут предпочтительными для планарной структуры, т. е. линии сетки, соответствующие правилу одной трети, получают преимущество

над линиями общей сетки для 3D-объектов.

- 3D: предполагается наличие только 3D-объектов, и не осуществляется какая-либо оптимизация для плоских слоев металла.
- User defined (определенная пользователем): только в случае, если этот режим активирован, можно подстроить некоторые параметры алгоритма автоматического разбиения в меню Automesh Setup Advanced — User Setup.
- Manual (ручное): этот режим используется для отключения алгоритма автоматического разбиения и для того, чтобы задать сетку вручную.

В секции **Resolve Metal sheets** следующим образом задается разбиение для металлического листа:

- Thin (тонкая), металлизация разбиается одной линией сетки;
- 1 cell (ячейка), металлизация разбиается двумя линиями сетки с расстоянием между ними равным толщине металла.

Вторая опция используется, только если токи на верхней и нижней поверхности полосковой линии существенно различаются.

Если секция **Resolve curved Geometry** установлена в **Yes**, разрешение увеличивается в областях с закругленными формами.

В секции **Axis Setup** задается эквидистантное разбиение или способ разбиения отдельно для каждой оси.

ЗАДАНИЕ МОНИТОРОВ ПОЛЯ

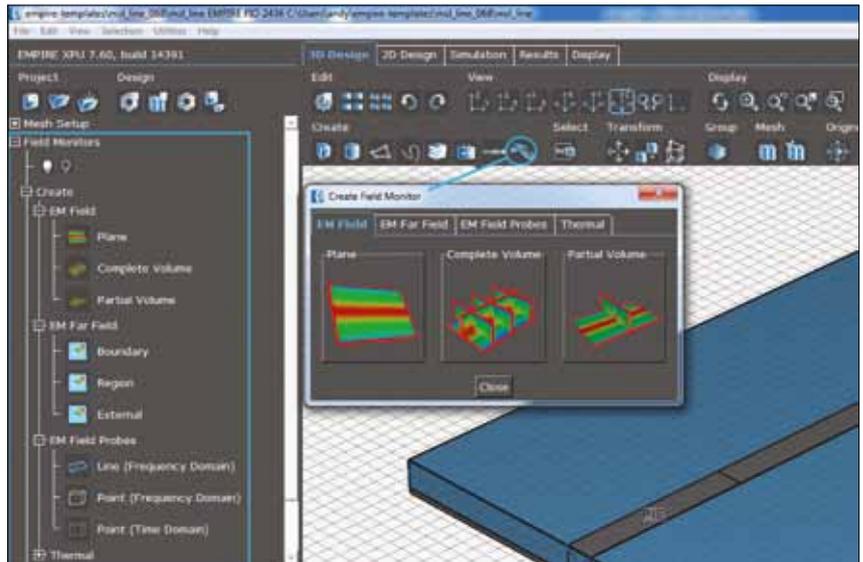
По умолчанию EMPIRE XPU показывает S-параметры и импеданс, а если требуется сгенерировать графики ближнего поля или диаграммы излучения, они задаются в секции **Field Monitors** в дереве навигации или с помощью кнопки **Create Field Monitor** в панели инструментов (рис. 18).

В секции **EM Display** ближние поля записываются в заданную область и отображаются во вкладке **Display** вместе со структурой.

Planar EM Field определяет план для хранения и отображения поля. Его позиция выравнивается к ближайшей подходящей линии сетки. Этот монитор отображает только поле **E** или **H**.

Complete EM Field определяет хранение результатов для всей области моделирования (что требует очень больших ресурсов памяти). Для отображения можно задать несколько планов, которые перемещаются с помощью рукоятки-слайдера.

Partial EM Field определяет объем, который пользователь может ограничить. Для отображения можно задать несколько планов, которые перемещаются с помощью рукоятки-слайдера.



▲ Рис. 18. Мониторы поля

В секции **EM Far field** ближние поля записываются в бокс (поверхность Гюйгенса), заданный границами или определенный пользователем. Эти поля получают при пост-обработке с помощью трансформации, которая требует однородного пространства вокруг всей этой поверхности. Если используется данный монитор, алгоритм разбиения автоматически добавляет дополнительное пространство вокруг структуры.

Имеются опции создания монитора дальнего поля:

- Boundary: используются границы как поверхность Гюйгенса;
- Region: определяется поверхность Гюйгенса с помощью бокса.

Рисунок дальнего поля отображается во вкладке **Display** (вместе со структурой) или строится во вкладке **Far field** в **Tab Menu**, если заданы углы среза для дальнего поля.

В секции **EM Probes** ближние поля записываются в заданных точках или вдоль заданных линий и отображаются с помощью графического ядра.

- EM Field Line: задает линию через 2 точки (**Point 0** и **Point 1**) для хранения информации о поле в частотной области. В целях усреднения для записи используется объем, который больше по размеру, по крайней мере, на 2 ячейки в каждом направлении.
- EM Field Probe определяет точку для хранения поля в частотной области. В целях усреднения для записи используется объем, который больше по размеру, по крайней мере, на 2 ячейки в каждом направлении.
- EM Time Domain Probe определяет точку для хранения поля во временной области.

В **Thermal** всегда сохраняется распределение температуры для полного объема.

После моделирования можно выбрать сечение отображения (**plane**) с помощью слайдера на боковом меню. Можно добавлять дополнительные сечения для отображения.

НАСТРОЙКА БЛИЖНЕГО И ДАЛЬНОГО ПОЛЕЙ

Параметры для записи ближнего и дальнего полей очень похожи (рис. 19–20). Более того, количество точек в частотной области или шагов во временной области, используемое для записи, необходимо тщательно выбирать, т. к. оно влияет на объем памяти для моделирования. Можно задать одиночные точки в частотной области или последовательность эквидистантных частотных точек.

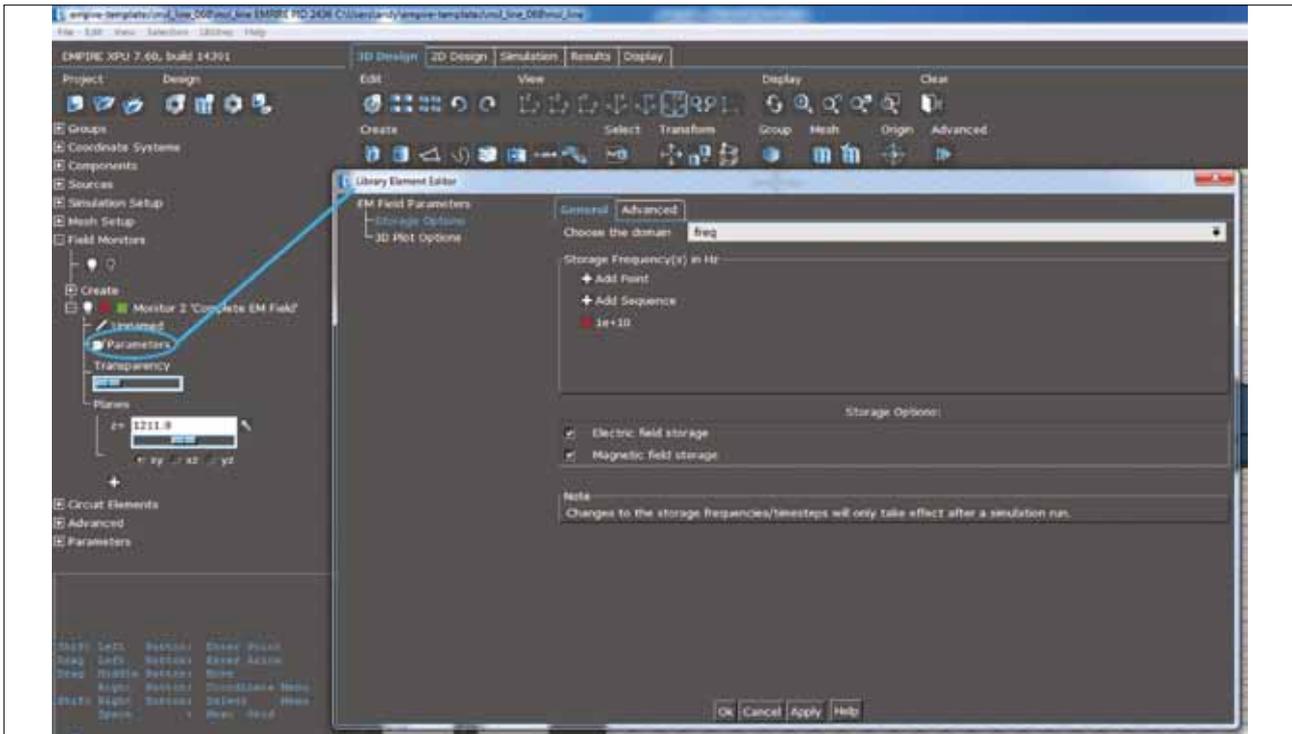
По умолчанию вычисление дальнего поля осуществляется как направленный срез 2D в сечении **xz-plane** ($\theta = 0^\circ$), **yz-plane** ($\theta = 90^\circ$) и как изображение 3D с шагом угла θ , равным 5° .

Другие результаты или опции можно получить с помощью коррекции параметров в секциях настройки **Far Field Setup**. При записи дальнего поля важнейшим правилом является обеспечение расстояния между излучателем и границей, по крайней мере, $\lambda_{max}/8$.

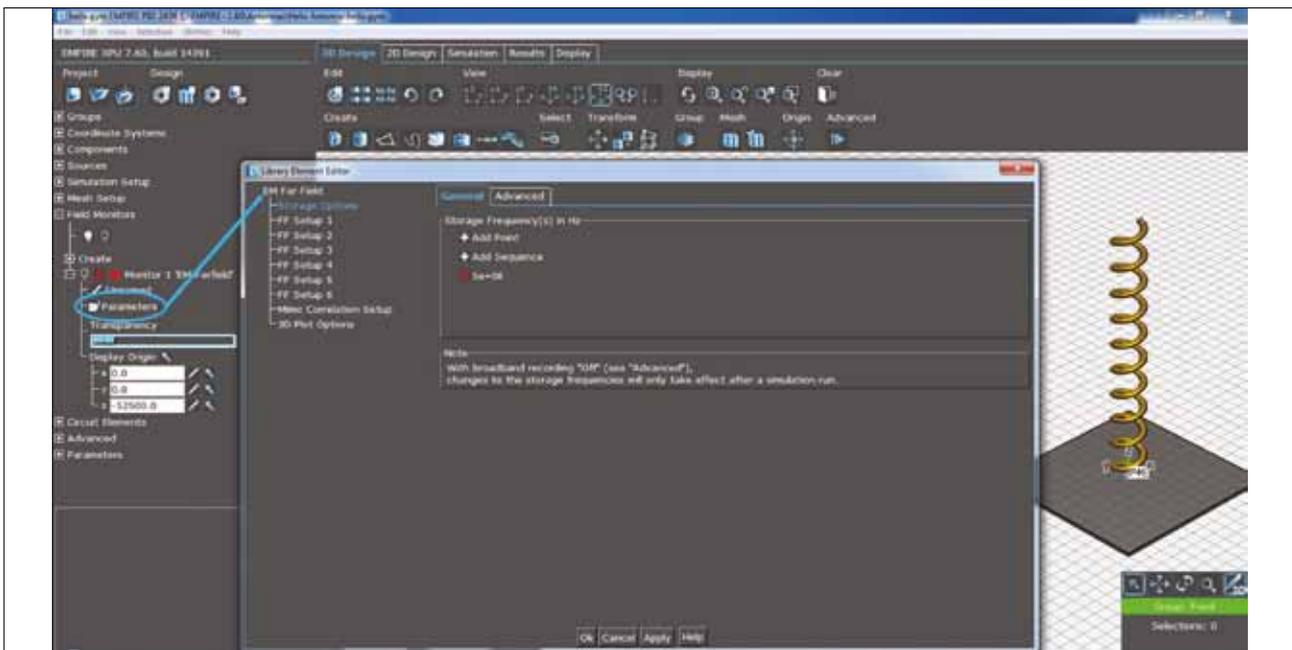
ПРОВЕРКА СТРУКТУРЫ И СЕТКИ

Перед началом моделирования рекомендуется выполнить несколько простых проверок, которые помогут предотвратить необходимость в длительных отладках процесса.

- Проверьте группы. Все группы должны иметь, по крайней мере, одно свойство. Если назначено более чем одно свойство, они не должны конфликтовать.
- Проверьте, что все объекты размещены в корректных группах. Это можно легко проверить, проведя курсор над на-



▲ Рис. 19. Окно настройки ближнего поля (Near Field Setup)



▲ Рис. 20. Окно настройки дальнего поля (Far Field Setup)

званием группы для подсветки объектов в соответствующей группе.

- Переключитесь в режим отображения Display. Проверьте, что все объекты имеют корректные размеры и располагаются правильно.

- Проверьте нумерацию портов. Каждый порт должен иметь уникальный номер, если только на них не будут подаваться множественные возбуждения.

- Проверьте возбуждение порта. Если для N независимых портов задано $Excitation = On$, по умолчанию выполнится N последовательных циклов моделирования.

- Проверьте параметры Simulation Setup, в частности, относительно граничных условий для текущей структуры.

- Запустите Automeshing и посмотрите на дискретную структуру в режиме Display. В частности, поищите непредусмотренные коротки или зазоры между проводниками.

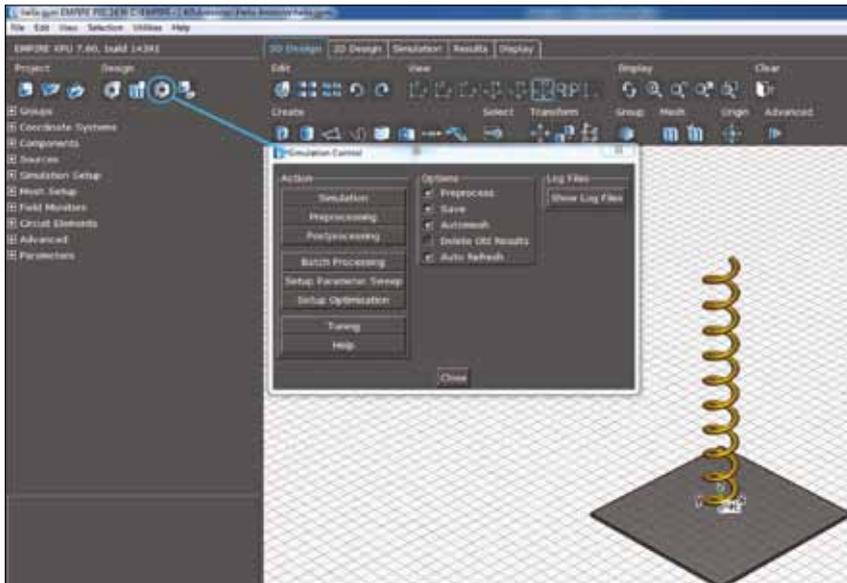
- Нажмите Preprocessing в окне Simulation Control. Проверьте информацию о портах, сетке и объектах.

После нажатия кнопки **Simulation Control & Preprocessing** структура проверяется, дискретизируется и компилируется. Моделирование запускается после

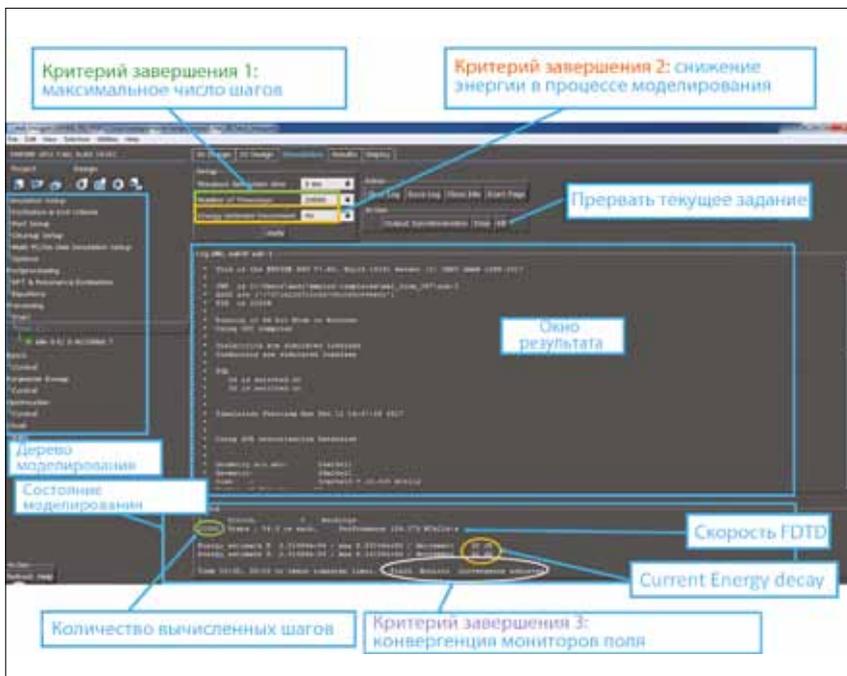
нажатия кнопки Simulation в окне Start Simulation (рис. 21).

ПРОСМОТР РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

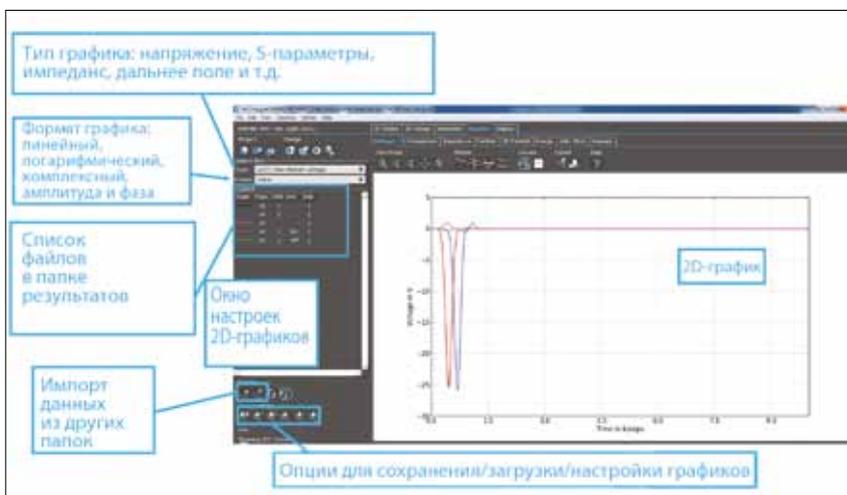
Действие **Start Simulation** выполняет автоматическое разбиение, определение параметров процессора и онлайн-компиляцию структуры, решение дискретных уравнений Максвелла до тех пор, пока не завершится моделирование и вычисление параметров в частотной области для заданного диапазона частот. Статус моделирования отображается с помо-



▲ Рис. 21. Окно запуска моделирования (Start Simulation)



▲ Рис. 22. Вкладка моделирования (Simulation) и окно отчетов (Log Window)



▲ Рис. 23. Диаграммы во временной области (Time Domain Voltage Graph)

щью монитора индикации процесса (рис. 3).

Опытные пользователи могут ознакомиться с подробностями о процессе моделирования во вкладке **Simulation** (в окне отчета Log window), где отображаются производительность, состояние процесса и ожидаемая длительность моделирования (рис. 22).

По умолчанию выполняется ДПФ, начиная с частоты Start и заканчивая частотой End с количеством точек по частоте, равным 200. Если число точек требуется увеличить или уменьшить частотный диапазон (например, для увеличения частотного разрешения), это делается без помощи нового моделирования в дереве Simulation Tree в пункте Excitation DFT.

В этом дереве опытные пользователи могут выполнить следующие задачи постпроцессинга:

- поменять порядок предсказания резонансов, например для структур с очень высокой добротностью Q;
- поменять параметры импедансов портов (например, для не 50-Ом терминаций);
- задать пользовательские уравнения (например, для вычисления потерь, Q-фактора);
- де-эмбединг для сдвигов опорных слоев;
- задать нестандартные настройки для вычисления дальнего поля.

Кроме того, можно выполнить нестандартное моделирование:

- заданные пользователем формы импульсов (например, линейный импульс для анализа целостности сигналов SI);
- пакетный режим для планирования заданий или удаленной обработки;
- оптимизацию и свипирование (качание) параметров;
- моделирование с поддержкой кластеров и HDD.

Следует понимать, что максимальное число шагов по времени и затухание энергии можно подстраивать во время моделирования. Более того, сигналы во временной области также корректируются и проверяются при моделировании.

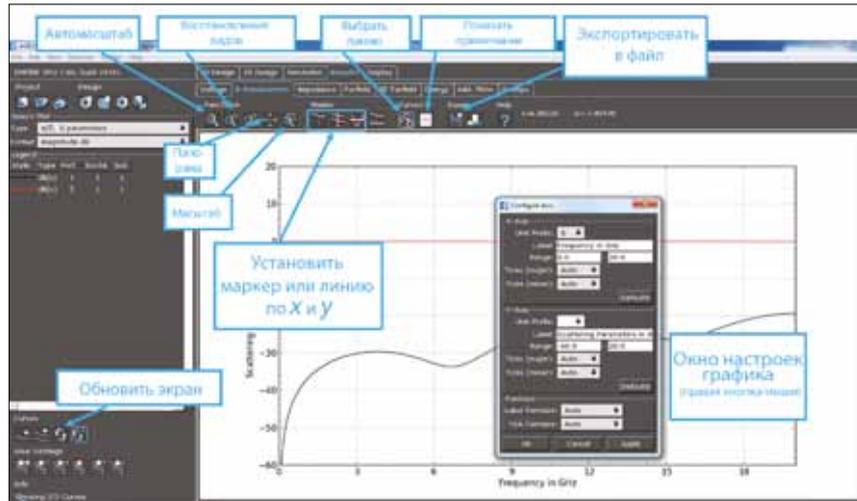
После и даже во время моделирования можно отобразить диаграммы напряжений с помощью режима отображения **Voltage** (рис. 23). Тип графика и формат выбираются слева в окне 2D Graph Setup.

В списке файлов результаты, представленные в папке sub-1, показаны в виде таблицы в соответствии с выбранным типом (Type). Нажав кнопку Add Data File, пользователь загружает данные измерений, результаты из других источников или проектов моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

После моделирования выполняется дискретное преобразование Фурье для сигналов во временной области, и вычисляются параметры в частотной области. По умолчанию отображаются S-параметры и импедансы.

В нижней строке меню вкладок имеются опции для изменения режима просмотра (приблизить, панорамировать, автомасштабировать) для задания маркеров и сохранения результатов в файл. Некоторые настройки диаграмм также корректируются в окне Plot Setting, которое появляется при щелчке диаграмм правой кнопкой мыши.



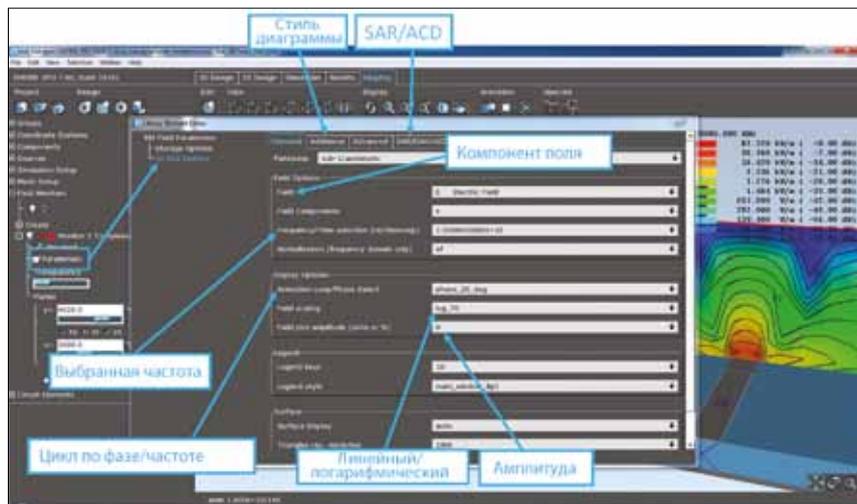
▲ Рис. 24. Параметры рассеяния (Scattering Parameters)

АНИМАЦИЯ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

Записанные ближние поля отображаются во вкладке Display, а настройки отображения задаются в окне 3D Plot Option в Near Field Monitor (рис. 25). Сечение в зависимости от типа монитора поля (Field Monitor type) выбирается и устанавливается с помощью слайдеров.

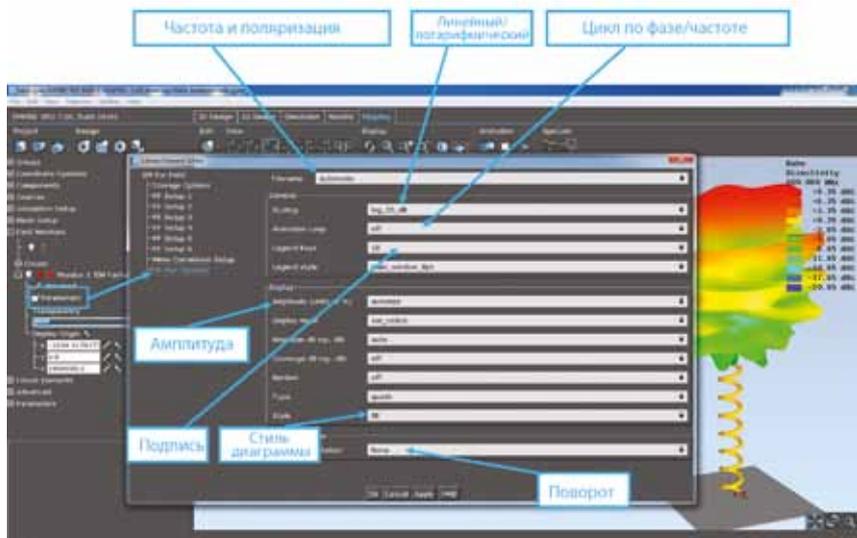
АНИМАЦИЯ ДАЛЬНОГО ПОЛЯ

Записанные дальние поля 3D отображаются в окне Display (рис. 26), и настройки отображения дальних полей определяются в окне EM Far Field Monitor под заголовком Display. Отображаются как 2D-, так и 3D-изображения излучений. Если диаграммы вычислены для множества частот или доступны диаграммы круговой поляризации, их можно анимировать в частотных или фазовых циклах.



▲ Рис. 25. Анимация изменений ближнего поля 3D (Near Field 3D Plot)

Вычисленные диаграммы дальнего поля показаны в окне Filepane. Их можно выбрать для отображения. Размах изображения задается в безразмерных единицах и выбирается в соответствии с уровнем размера структуры, чтобы его увидеть. График сдвигается относительно структуры с помощью опции сдвига Move (например, x1000 сдвигает график на 1000 ед. в направлении x). Стиль отображения и настройки меток похожи на опции настройки ближнего поля. Для диаграмм 2D опцию трансформации (transformation option) можно использовать для подстройки требуемой ориентации диаграммы.



▲ Рис. 26. Анимация дальнего поля 3D (Far Field 3D Plot)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере планарной микрополосковой структуры был рассмотрен маршрут моделирования в программе EMPIRE XPU, ее основные возможности и принципы работы. Интересными особенностями этой программы являются независимость от графических ускорителей (т. к. вычисления выполняются на ядрах процессора Intel), крайне высокая скорость вычислений, возмож-

ность работы с очень большими СВЧ-структурами (размер моделируемой системы ограничен только общим объемом доступной памяти компьютера), а также высокая точность и достоверность полученных результатов.

Для эффективного изучения программы в меню запуска имеется несколь-

ко пошаговых учебников (tutorials). Дополнительные документы, объясняющие функционал портов и их применение в EMPIRE, имеются в папке Port Guide программы. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Pazen Free Demo. <http://www.empire.de>.