

Проектирование принципиальных схем и печатных плат в программной среде Mentor Graphics PADS 9.5.

Посттопологический анализ целостности сигналов высокоскоростных печатных плат в HyperLynx. Часть 2

В маршруте проектирования Mentor Graphics PADS средства анализа высокоскоростных печатных плат представлены утилитой BoardSim, которая входит в состав программы HyperLynx. В статье подробно рассматривается проведение посттопологического анализа целостности сигналов, перекрестных помех и электромагнитной совместимости при помощи таких средств BoardSim, как цифровой осциллограф (Digital Oscilloscope), анализатор спектра электромагнитной совместимости (Spectrum Analyzer). Также рассмотрено редактирование стека слоев печатной платы и вывод результатов посттопологического анализа на печать.

Татьяна Колесникова

beluikluk@gmail.com

Введение

При проектировании высокоскоростных цифровых устройств, в отличие от цифровых устройств, действующих на низкой рабочей частоте, особое значение приобретает учет характера пассивных элементов цепи, в том числе соединительных проводов, печатных плат и корпусов интегральных схем, которые являются элементами конструкции цифрового устройства. На низких рабочих частотах эти конструктивные элементы не оказывают заметного влияния на функционирование схемы. С повышением рабочей частоты они начинают непосредственно влиять на электрические характеристики схемы. По мере увеличения частоты проводимость дорожек на печатной плате обретает сложный характер. На низких частотах (например, тактовых частотах старых систем) сопротивление дорожки преимущественно активное. По мере роста частоты начинает сказываться емкость дорожки. На самых высоких частотах сильнее проявляется индуктивность дорожки. Все эти характеристики могут неблагоприятно влиять на целостность сигнала.

Эффективный анализ целостности сигнала и электромагнитной совместимости (ЭМС) предполагает исследование с помощью различных методов моделирования. В идеале анализ должен не только указывать на существование проблем, но и помогать обнаруживать их причины: помехи и восприимчивость. Включение эффективного анализа целостности сигнала и ЭМС в процесс проектирования печатных плат — это шаг в направлении сокращения затрат. Оценка восприимчивости узла и обнаружение

источников нежелательных возмущений позволит избежать повторного проектирования и обеспечит повышение его качества в целом.

Многие из основных проблем, способных вызвать нарушения целостности сигнала, можно обнаружить и исправить, используя программу HyperLynx. Анализ целостности сигналов в программе HyperLynx можно выполнить на этапе схемы (предтопологический анализ) и на этапе платы (посттопологический анализ).

Модуль BoardSim программы HyperLynx предназначен для посттопологического анализа целостности сигналов, перекрестных помех и параметров ЭМС. BoardSim работает с законченной топологической информацией. В него может быть загружен проект платы, разработанный практически в любом современном пакете проектирования, так как большинство популярных продуктов для проектирования печатных плат имеют трансляторы в формат HyperLynx.

Средства посттопологического анализа модуля BoardSim системы HyperLynx

Посттопологический анализ выполняет максимально полное исследование системы на наличие проблем целостности сигналов с учетом реальной трассировки, геометрических размеров и положений компонентов, взаимного расположения компонентов. Чем раньше в цикле проектирования будут найдены и устранены проблемы, связанные с целостностью сигналов, тем меньше будут затраты на устранение этих проблем на этапах физического прототипирования и производства. В BoardSim име-



Рис. 1. Окно программы HyperLynx

ются средства расчета полных сопротивлений проводников с учетом многослойной структуры платы, оценки степени согласования их с нагрузкой и оптимизации топологии для решения проблемы целостности сигналов.

Определив причины нарушений целостности сигналов, можно уменьшить риск их возникновения. Набор инструментов анализа программы BoardSim удобно использовать для выявления этих нарушений и нахождения решений проблем целостности сигналов при разработке быстродействующих устройств.

Для того чтобы открыть подготовленный для посттопологического анализа проект платы в BoardSim, необходимо запустить программу HyperLynx (рис. 1) и выбрать в основном меню File команду Open Board или на панели инструментов в верхней части программы нажать на кнопку **Open BoardSim Board**. В результате выполненных действий будет открыто окно проводника Windows, в котором можно выбрать файл печатной платы в формате *.hup (формат HyperLynx). Трансляция файла печатной платы выполняется командой основного меню File/New Board (Run PCB Translator), в результате чего открывается окно проводника Windows, в котором можно выбрать предназначенный для трансляции файл печатной платы. При этом для трансляции доступны файлы следующих форматов:

- *.dsn (Specctra DSN Files);
- *.pcb (Accel EDA Files);
- *.a_b (Cadence Allegro ASCII Files);
- *.prt (Mentor Board Station Files);
- *.paf (Visula Files);
- *.bsf (Zuken CR-3000 Files);
- *.pcf (Zuken CR-5000 BD Files);
- *.odb (ODB Gateway Files).

После того как файл в окне проводника выбран, нажмите на кнопку «Открыть», в результате будет открыто окно **Translate File** (рис. 2), в котором в поле File to translate отображен путь к выбранному файлу. На этом этапе трансляции при необходимости можно выбрать другой файл печатной платы, нажав на кнопку **Browse** (при этом будет снова открыто окно проводника Windows). Для выполнения трансляции используйте в окне **Translate File** кнопки:

- **Translate** — только для преобразования файла печатной платы в формат *.hup;
- **Translate & Open** — для преобразования файла печатной платы в формат *.hup и открытия его в BoardSim.

На рис. 3 представлен проект печатной платы в программной среде HyperLynx BoardSim.

Выполнение анализа целостности сигналов при помощи цифрового осциллографа Digital Oscilloscope

Моделирование в осциллографе используется для анализа целостности сигналов и наводок в цепях схемы. Выбор цепи для анализа выполняется в окне **Select Net by Name** (рис. 4), которое открывается кнопкой **Select Net by Name for SI Analysis** панели инструментов BoardSim.

В центральной части окна **Select Net by Name** расположен список цепей, выбор нужной производится выделением строки с ее названием при помощи левой кнопки мыши. По умолчанию возле каждого названия цепи в списке указана ее длина. Выбранная цепь отобразится в рабочей области проекта. Для упрощения поиска цепи в окне **Select Net by Name** можно воспользоваться фильтром (поле Filter) или выполнить сортировку цепей

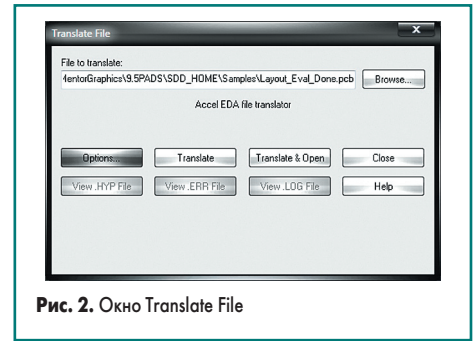


Рис. 2. Окно Translate File

по имени в алфавитном порядке, длине или ширине (поле Sort nets by).

Перед тем как выполнить анализ целостности сигналов при помощи цифрового осциллографа, необходимо всем пассивным компонентам выбранной цепи определить значения, а микросхемам назначить модели, поскольку при проведении анализа компоненты с неназначенными моделями воспринимаются как разомкнутые цепи. Для того чтобы назначить модель выводу микросхемы или компоненту, выберите цепь, к которой он подсоединен, а затем нажмите на кнопку **Select Component Models or Edit Values** панели инструментов BoardSim.

В результате будет открыто окно **Assign Models**, в котором для назначения модели в вывод необходимо выбрать этот вывод в списке Pins и нажать на кнопку **Select** (рис. 5). Отметим, что в списке Pins отображаются выводы как микросхем, так и пассивных компонентов.

В открывшемся окне **Select IC Model** (рис. 6) необходимо в поле Libraries выбрать нужную библиотеку компонентов, а затем указать модель, щелкнув на имени компонента в поле Devices и на номере вывода или имени сигнала в поле Pin (Signal). Следует отметить, что название данного поля зависит от установленного переключателя в поле Select by и может принимать одно из двух значений: Pin или Signal. В окне **Select IC Model** для выбора доступны следующие типы моделей:

- *.ibs — IBIS-модели;

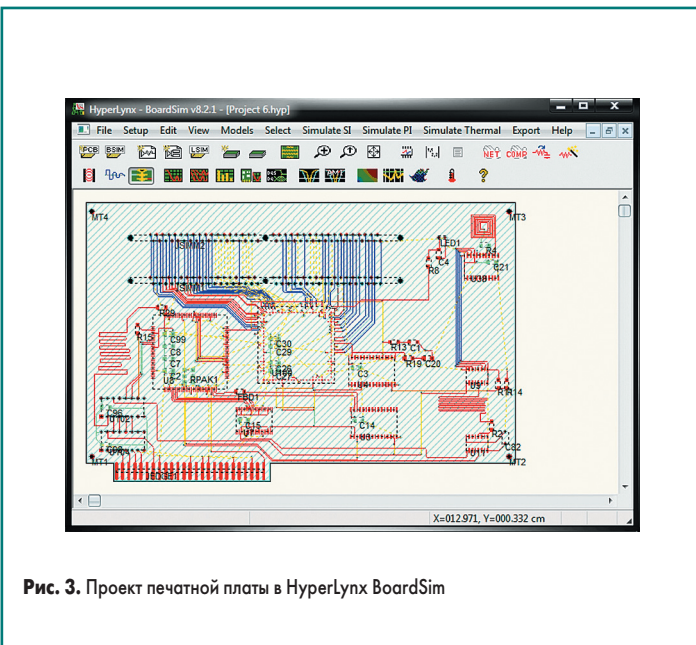


Рис. 3. Проект печатной платы в HyperLynx BoardSim

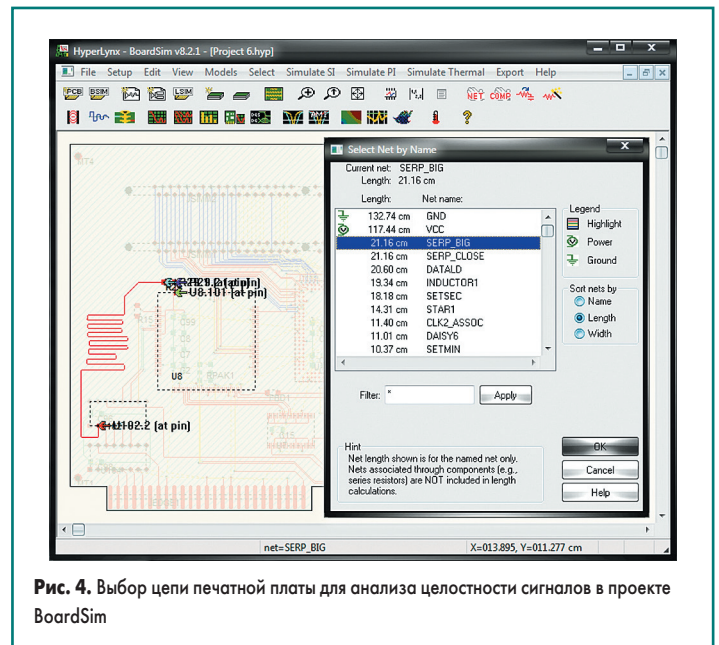


Рис. 4. Выбор цепи печатной платы для анализа целостности сигналов в проекте BoardSim

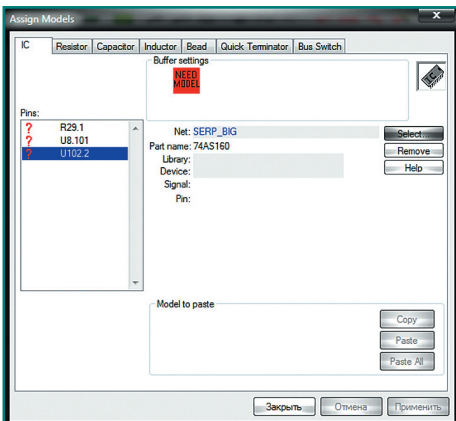


Рис. 5. Выбор вывода микросхемы в окне Assign Models

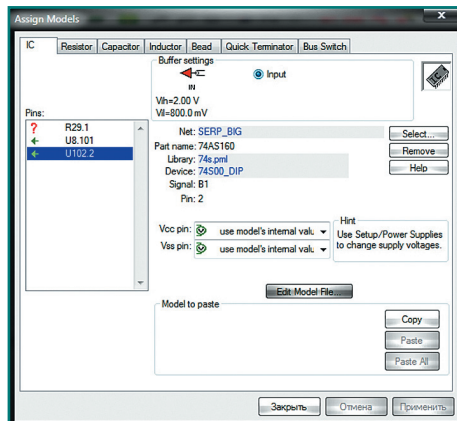


Рис. 8. Параметры выбранной модели в окне Assign Models

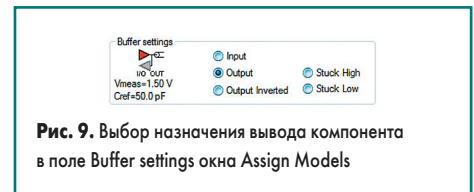


Рис. 9. Выбор назначения вывода компонента в поле Buffer settings окна Assign Models

- *.*ebd* — EBD-модели, представляющие собой расширение IBIS-моделей, которое используется для электрического описания платы;
- *.*mod* — MOD-модели — это упрощенный формат HyperLynx. Обычно MOD-модели представляют семейства интегральных микросхем. В HyperLynx включены следующие библиотеки MOD-моделей: *Generic.MOD* (общие компоненты для нескольких логических семейств, доступных во множестве скоростей фронтов), *Probes.MOD* (модели типичных входных зондов осциллографов), *Open.MOD* (модели для открытых выводов интегральных микросхем), *Diodes.MOD* (базовые модели диодов), *User.MOD* (пользовательские модели в формате MOD), *Easy.MOD* (технологично ориентированные модели, которые можно задать, если нужная модель отсутствует);
- *.*pml* — PML-модели — это расширение MOD-моделей. Файлы *.*pml* содержат типовые модели для корпусных компонентов с добавлением паразитных характеристик корпуса и цоколевки конкретных корпусов;
- *.*sp* — SPICE-модели;
- *.*s4p* — S-Parameter (Touchstone) модели — это последовательные модели, используемые для создания моделей коннекторов и корпусов. В *.*s4p*-файлах могут описываться S, Y, Z и другие параметры. Модели передающих и приемных буферов можно выбрать из обширных библиотек, поставляемых с продуктом.

Кнопка **Find Model** окна **Select IC Model** открывает диалог **IC Model Finder** (рис. 7), который позволяет найти модели по ключевым словам (текст для поиска вводится в поле **Search text**). После того как все действия в окне **Select IC Model** выполнены, нажмите на кнопку **OK**. В результате диалоговое окно будет закрыто, а параметры выбранной модели отобразятся в окне **Assign Models** (рис. 8). При этом в поле **Buffer settings** посредством установки переключателя в одну из позиций можно задать назначение вывода (рис. 9):

- Input (Вход);
- Output (Выход);
- Output Inverted (Инверсный выход);
- Stuck High (Постоянно высокий);
- Stuck Low (Постоянно низкий).

В нашем примере доступно для выбора только одно значение — **Input**.

Для назначения одной и той же модели нескольким выводам можно использовать следующие кнопки поля **Model to paste**:

- **Copy** (Копировать);
- **Paste** (Вставить);
- **Paste All** (назначение выбранной модели всем выводам в схеме). Данную кнопку удобно применять, если все выводы схемы имеют одинаковую модель и отличаются только установками буфера.

Редактировать свойства модели можно в окне **Edit .MOD Model** (рис. 10), которое будет открыто после нажатия кнопки **Edit Model File** окна **Assign Models**.

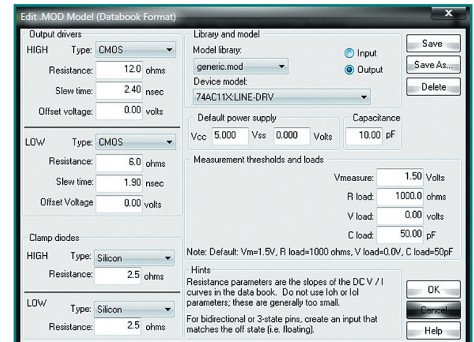


Рис. 10. Окно Edit .MOD Model

Для улучшения качества сигнала к выводам микросхем можно добавить быстрые оконечные нагрузки (пассивные компоненты). Для чего в окне **Assign Models** необходимо перейти на вкладку **Quick Terminator** и в поле **Quick-terminator location** выбрать вывод микросхемы, а в поле **Terminator style** указать тип нагрузки:

- пассивный компонент не добавлен (**None**) — рис. 11а;
- последовательно включенный резистор (**R series**) — рис. 11б;
- параллельно включенные резистор и конденсатор (**R-C parallel, AC**) — рис. 11в;
- параллельно включенный резистор (**R parallel, DC**) — рис. 11г;
- два параллельно включенных резистора (**R-R parallel, DC**) — рис. 11д;
- параллельно включенный конденсатор (**C parallel**) — рис. 11е;
- дифференциальный резистор (**R differential**) — рис. 11ж.

Параметры нагрузки (сопротивление, емкость, для R differential — противоположный вывод) и линии передачи (слой, длина, ширина) задаются в поле **Terminator values**.

Если при трансляции топологии в BoardSim не передались значения пассивных компонентов, то их нужно назначить вручную. Для этого левой кнопкой мыши выберите пассивный

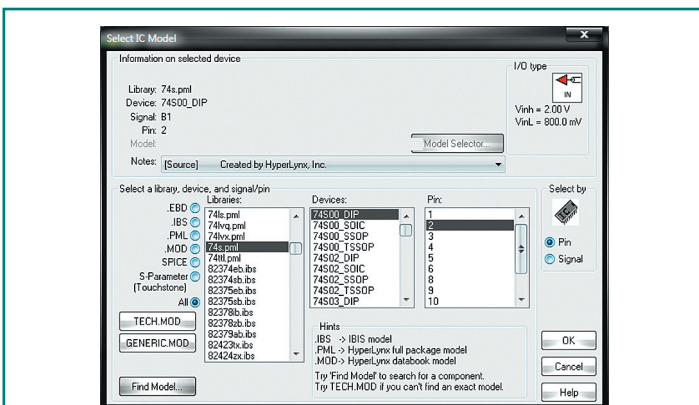


Рис. 6. Окно Select IC Model

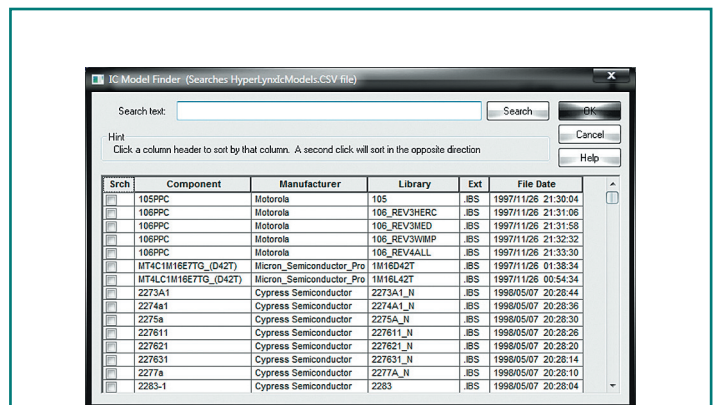


Рис. 7. Диалоговое окно IC Model Finder

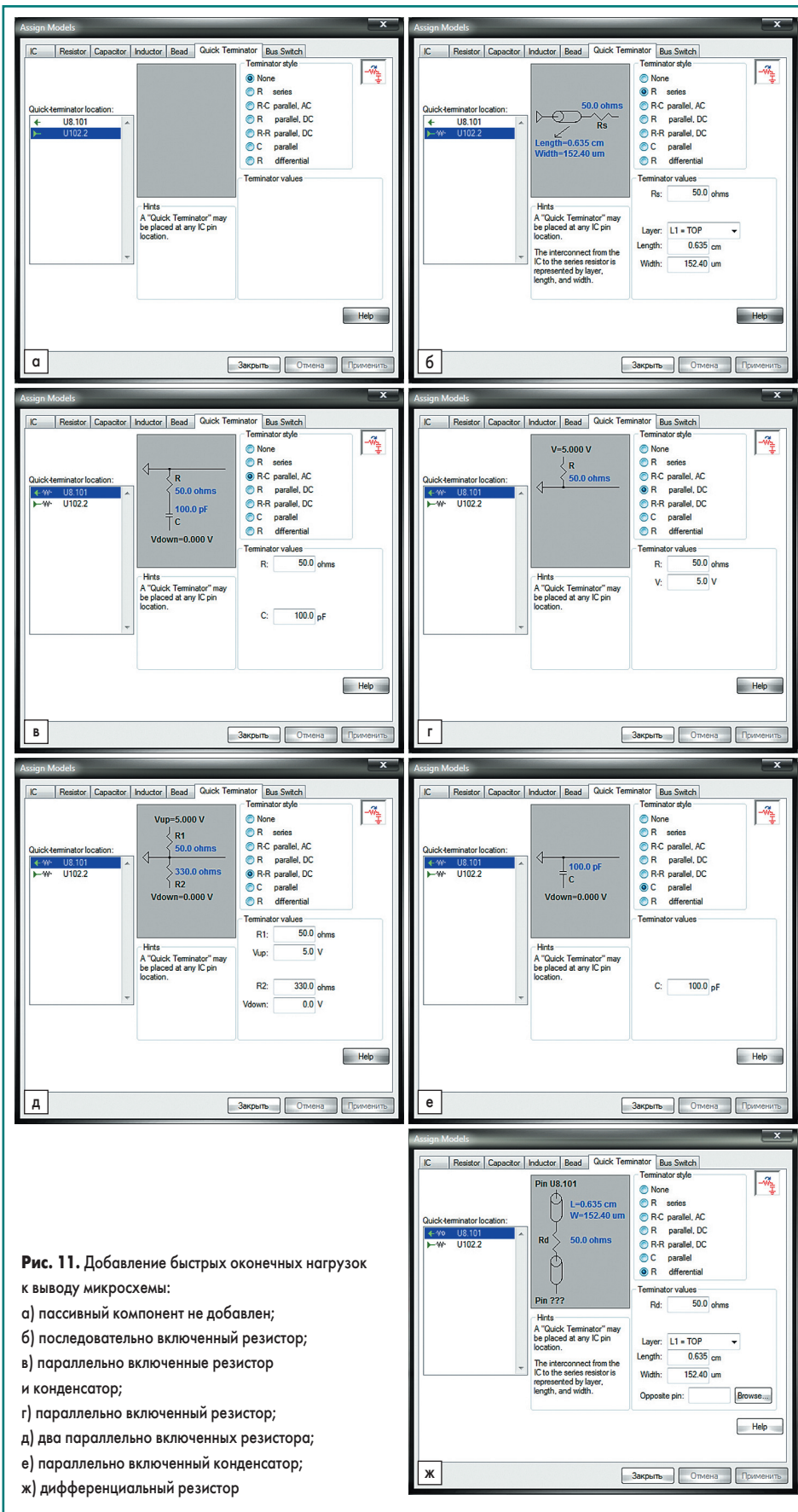


Рис. 11. Добавление быстрых оконечных нагрузок к выводу микросхемы:

- а) пассивный компонент не добавлен;
- б) последовательно включенный резистор;
- в) параллельно включенные резистор и конденсатор;
- г) параллельно включенный резистор;
- д) два параллельно включенных резистора;
- е) параллельно включенный конденсатор;
- ж) дифференциальный резистор

компонент в списке Pins окна **Assign Models** (откроется вкладка данного типа компонента), введите нужное значение в поле Value и нажмите последовательно кнопки **Copy** и **Paste**. В результате компонент в списке Pins отобразится как назначенный (рис. 12).

Перед тем как закончить работу в диалоговом окне **Assign Models**, убедитесь, что всем

пассивным компонентам назначены значения, а всем выводам — модели (нет отметок красного знака вопроса в поле Pins). После того как все параметры в окне **Assign Models** настроены, нажмите последовательно на кнопки «**Применить**» и «**Заккрыть**».

Открыть лицевую панель цифрового осциллографа в BoardSim (окно **Digital**

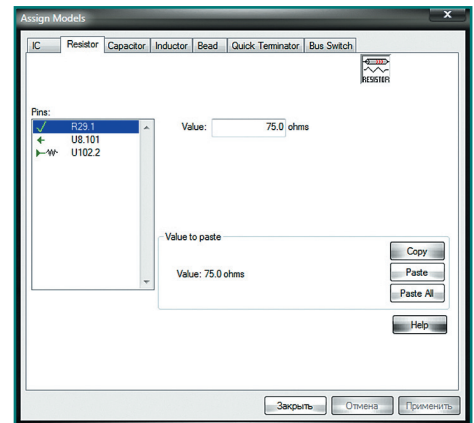


Рис. 12. Указание значения сопротивления пассивному компоненту выбранной цепи в окне **Assign Models**

Oscilloscope — рис. 13) можно при помощи команды основного меню **Simulate SI/Run Interactive Simulation (SI Oscilloscope)** или нажатием на одноименную кнопку панели инструментов BoardSim. В верхней левой части окна расположен графический дисплей, предназначенный для графического отображения формы сигнала. Прибор также оснащен двумя курсорами для проведения измерений во временной области, каждый из которых можно установить, щелкнув левой кнопкой мыши в области графического дисплея. Третий щелчок удаляет курсоры.

В нижней правой части окна находятся четыре ручки управления, предназначенные для настройки отображения измеряемого сигнала:

- поле **Vertical** содержит две ручки: **Position** — устанавливается положение кривой по вертикальной оси, **Scale** — задается величина деления по оси Y;
- поле **Horizontal** содержит две ручки: **Delay** — устанавливается положение кривой по горизонтальной оси, **Scale** — задается величина деления по оси X.

На лицевой панели осциллографа также можно настроить следующие параметры отображения сигнала:

- **Operation (Отображение сигнала):** Standard (Стандартное), Eye Diagram (Глазковая диаграмма);
- **Edge (Фронт):** Rising edge (Передний фронт), Falling edge (Задний фронт);
- **Oscillator (отображение обоих фронтов),** при этом есть возможность задать частоту (поле MHz) и рабочий цикл (поле Duty);
- **IC modeling (передатчик сигнала):** Slow-Week (медленный слабый), Typical (типичный), Fast-Strong (быстрый сильный);
- **Show** — выбор кривых и информации для совместного отображения.

Перед запуском моделирования нужно установить зонды. Если установка зондов не была произведена разработчиком, то системой автоматически будут использованы первые шесть выводов компонентов из возможных. Зонды устанавливают на любой вывод компонента. Все возможные точки зондирования отображаются в поле Probes окна **Show**. После установки зондов задаются входные условия моделирования и значения отображения симу-

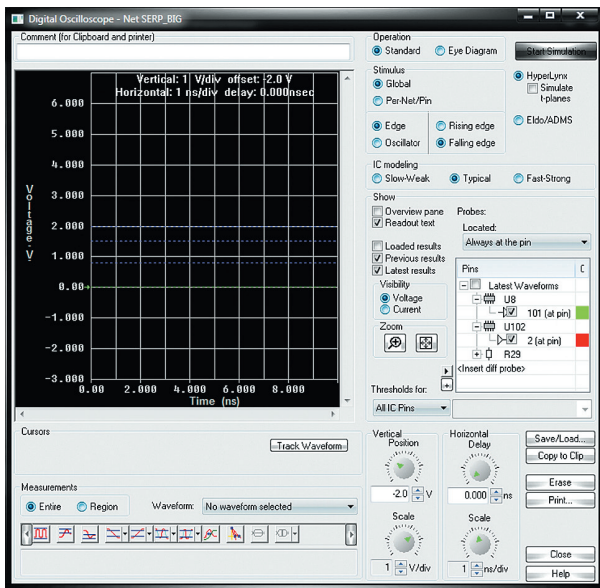


Рис. 13. Окно Digital Oscilloscope

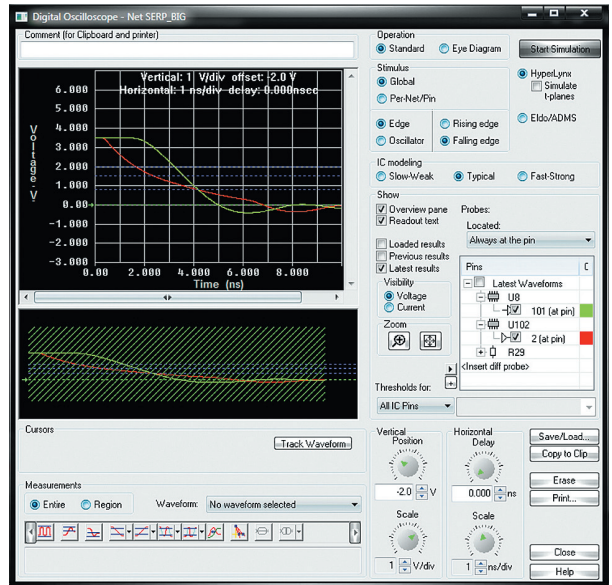


Рис. 14. Результат анализа целостности сигналов выбранной цепи печатной платы при помощи цифрового осциллографа

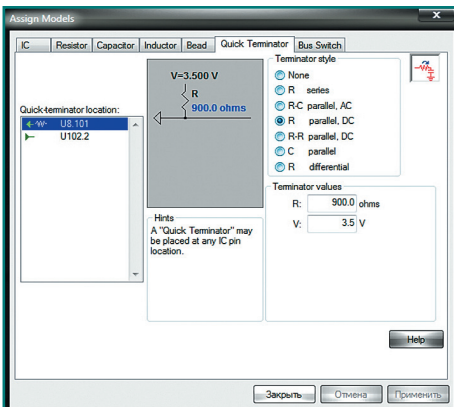


Рис. 15. Добавление компонента согласования (параллельно включенного резистора) к выводу микросхемы

лятора. Запуск моделирования производится нажатием кнопки **Start Simulation** в верхнем правом углу окна **Digital Oscilloscope**.

Проведем анализ выбранной цепи SERP_BIG. Воздействие зададим в виде заднего фронта прямоугольного импульса длительностью 1 нс. На рис. 14 показан результат моделирования. Хорошо видно, что из-за отсутствия согласования линии передачи на напряжение приемника (зеленая кривая) не устанавливается даже в течение 8 нс.

Выполним моделирование при согласовании линии передачи с помощью параллельного резистора (рис. 15). Требуемое сопротивление можно рассчитать автоматически с помощью мастера согласования Termination Wizard. Результат согласования показан на рис. 16, где видно, что понижающий выброс сократился до 0 В.

На рис. 17 представлена глазковая диаграмма, полученная при помощи цифрового осциллографа модуля BoardSim. Метод глазковых диаграмм предназначен для оценки влияния случайных факторов, изменяющих амплитуду сигналов и время их задержки. Его смысл заключается в том, что в процессе моделирования вносятся случайные изменения параметров сигнала, а на экране осциллографа отображаются наложенные друг на друга кривые напряжений для каждого периода поступающей последовательности импульсов. В результате на экране осциллографа отображается диаграмма, похожая на изображение человеческого глаза. Если форма полученной диаграммы напоминает открытый глаз, то приемник будет работать устойчиво. В том случае, когда глаз теряет форму или начинает расплываться, существует высокая вероят-



Рис. 16. Временная диаграмма заднего фронта импульса после согласования (красная кривая — напряжение на передатчике, зеленая кривая — напряжение на приемнике)

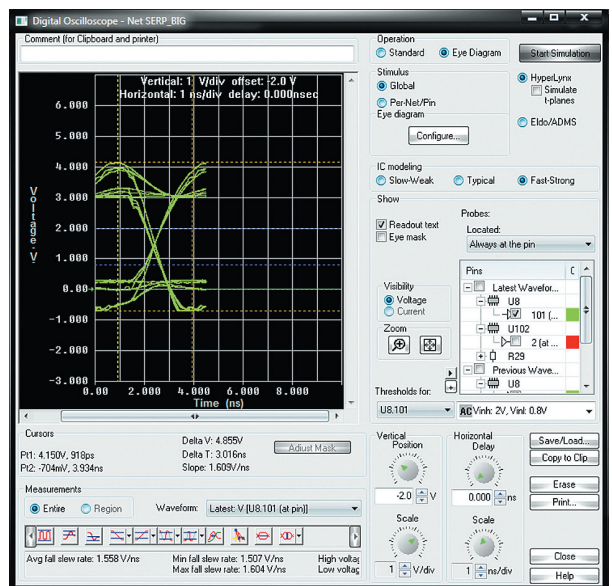


Рис. 17. Глазковая диаграмма, полученная при помощи цифрового осциллографа модуля BoardSim

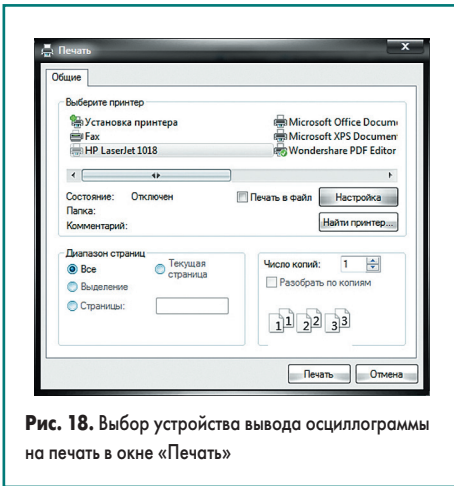


Рис. 18. Выбор устройства вывода осциллограммы на печать в окне «Печать»

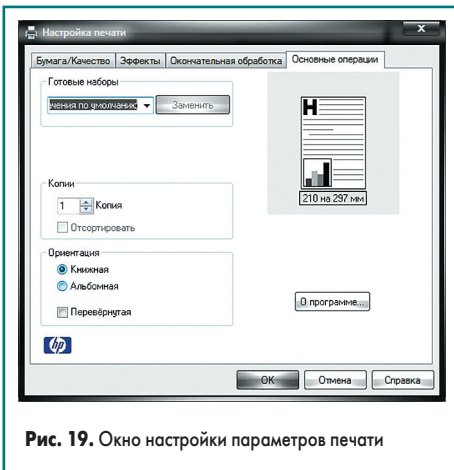


Рис. 19. Окно настройки параметров печати

ность неправильного срабатывания входного буфера микросхемы. Глазковые диаграммы используют периодическую структуру цифрового сигнала. За счет внешней синхронизации развертки получаемые осциллограммы волнового фронта сигнала накладываются друг на друга с периодом одного отсчета. В результате проведения измерений с накоплением формируется глазковая диаграмма, при этом по оси ординат откладывается амплитуда сигналов, по оси абсцисс — время. Анализ глазковых диаграмм — широко используемый инструмент для оценки целостности сигнала в потоках последовательной передачи данных.

Полученную осциллограмму можно вывести на печать, для чего в окне **Digital Oscilloscope** предназначена кнопка **Print**, после нажатия которой будет открыто окно «Печать» (рис. 18). Печатать можно на бумажные носители или в файл. Для вывода осциллограммы на печать на принтер необходимо в окне «Печать» в поле «Выберите принтер» указать принтер, на который вы планируете отправить документ, и нажать кнопку «Печать». При этом настройка параметров выполняется в окне «Настройка печати» (рис. 19), открыть которое можно кнопкой «Настройка» окна «Печать». Для печати осциллограммы в файл нужно в поле «Выберите принтер» окна «Печать» выбрать строку Microsoft Office Document Image Writer и нажать на кнопку «Печать». Настройка параметров печати в файл выполняется кнопкой «Настройка». Результат печати осциллограммы в файл представлен на рис. 20.

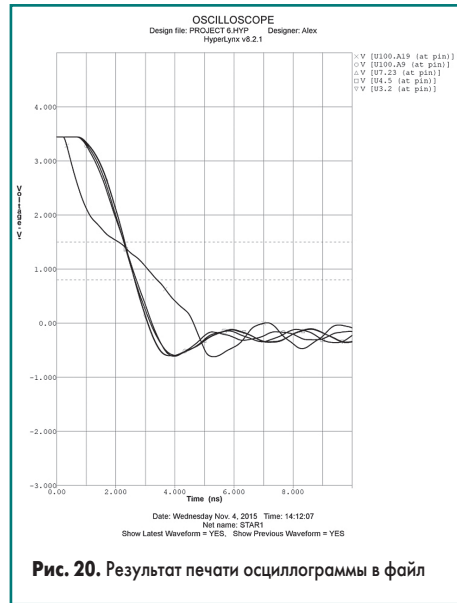


Рис. 20. Результат печати осциллограммы в файл

Выполнение анализа спектра ЭМС

При помощи виртуального анализатора спектра в BoardSim можно моделировать электромагнитную совместимость. ЭМС рассматривает электромагнитные поля, распространяющиеся от передающей линии в пространство. Многие типы электроники должны удовлетворять нормам ЭМС. Плата не удовлетворяет требованиям ЭМС, если максимальное электромагнитное излучение превышает нормы ЭМС на любой частоте. Излучения рассчитываются для единичных цепей. Если одна из цепей превышает нормы ЭМС, то, возможно, плата не пройдет тестирования. Если все цепи удовлетворяют нормам с необходимым запасом, плата имеет хорошие шансы пройти антенное тестирование. HyperLynx моделирует только дифференциальные излучения. Если в слоях металлизации есть пустоты или слой металлизации разбит на разные области, то электромагнитное излучение может быть больше рассчитанного. Чтобы высокоскоростные проекты прошли ЭМС-тестирование, обычно надо обеспечить высокоскоростные пути соединения между областями металлизации, особенно для возвратных путей высокоскоростных сигналов. Такая связь между слоями металлизации существенно уменьшает общее излучение. Электромагнитное излучение зависит от характеристик передающих линий трасс и скорости фронта передатчика, наибольшие значения будут получены для длинных трасс и передатчиков с быстрыми фронтами. Также оно зависит от расстояния до слоя металлизации. Размещение трасс на внутреннем слое между слоями металлизации уменьшает электромагнитное излучение. Проблемы ЭМС можно решить, укорачивая трассы или размещая проблемные трассы между слоями металлизации. Для уменьшения проблем ЭМС можно использовать согласование.

Анализатор спектра можно использовать для оценки ЭМС от трасс схемы.

Перед тем как выполнить анализ спектра ЭМС, необходимо при помощи кнопки **Select Net by Name for SI Analysis** панели инструментов BoardSim выбрать цепь для анализа, а при

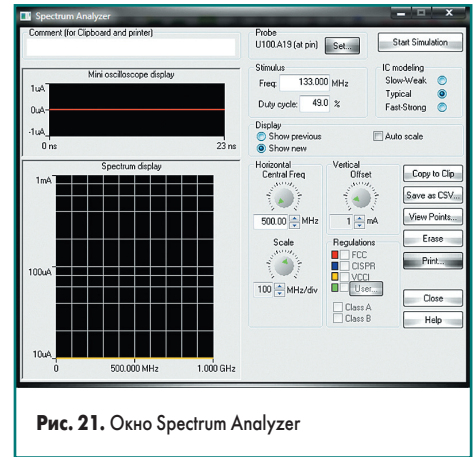


Рис. 21. Окно Spectrum Analyzer

помощи кнопки **Select Component Models or Edit Values** необходимо всем пассивным компонентам выбранной цепи определить значения, а микросхемам назначить модели по аналогии с тем, как это сделано в анализе целостности сигналов.

Открыть лицевую панель виртуального анализатора спектра в BoardSim (окно **Spectrum Analyzer** — рис. 21) можно командой основного меню **Simulate SI/Run Interactive EMC Simulation (Spectrum Analyzer)** или нажатием одноименной кнопки панели инструментов BoardSim. При моделировании будут учитываться эффекты взаимовлияний связанных передающих трасс. Эту информацию можно использовать для оценки эффектов экранирующих трасс и других близлежащих цепей. В течение моделирования назначить в качестве передатчика можно только один вывод компонента, все остальные выводы должны быть определены как приемники.

Перед запуском моделирования нужно установить зонды. Для этого следует нажать кнопку **Set** в поле **Probe** лицевой панели анализатора спектра. В результате откроется окно **Set Spectrum Analyzer Probing (EMC)** — рис. 22.

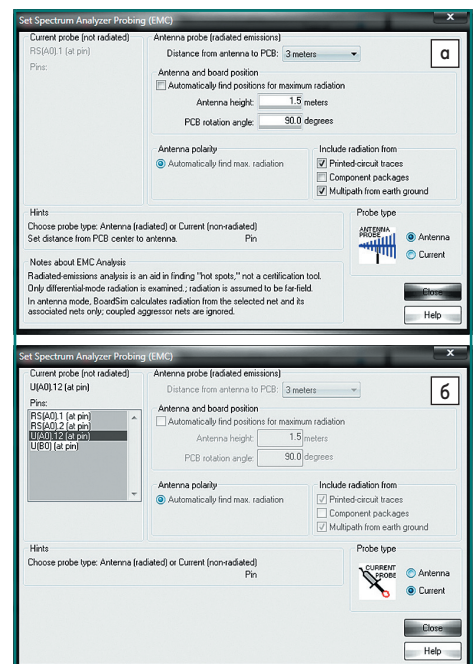


Рис. 22. Окно Set Spectrum Analyzer Probing (EMC), тип зонда: а) антенна; б) токовый пробник

Тип зонда устанавливается в поле Probe type и может принимать одно из двух значений:

- Antenna — антенна (рис. 22a);
- Current — токовый пробник (рис. 22б).

По умолчанию используется антенный зонд, для которого можно задать следующие параметры:

- Distance from antenna to PCB — расстояние между платой и антенной;
- Automatically find positions for maximum radiation — автоматически установить позицию антенны с учетом наибольшего излучения;
- Antenna height — высота антенны;
- PCB rotation angle — угол поворота платы относительно антенны;
- Automatically find max. radiation — автоматическое нахождение максимального излучения;
- Include radiation from — при измерении учитывать излучение от Printed-circuit traces (печатных проводников платы), Component packages (компонентов платы), Multipath from earth ground (цепей «земли»).

Токовый зонд устанавливается на любой вывод интегральной микросхемы (передатчика) или на любой вывод пассивного компонента (например, резистора). Работа с токовым зондом становится возможной после того, как в поле Probe type окна **Set Spectrum Analyzer Probing (EMC)** переключатель установлен в позицию Current. При этом все доступные точки токовых зондов отображаются в списке Pins.

После установки зонда необходимо в окне **Spectrum Analyzer** определить следующие настройки моделирования и отображения сигнала:

- Freq (частота);
- Duty cycle (рабочий цикл);
- IC modeling (передатчик сигнала): Slow-Weak (медленный слабый), Typical (типичный), Fast-Strong (быстрый сильный);
- Display — отображение новых (позиция Show new) или предыдущих результатов (позиция Show previous);
- Regulations (выбор норм ограничений). Многие типы электроники должны удовлетворять нормам ЭМС, которые устанавливаются такими регулируемыми ведомствами, как FCC (Federal Communications Commission) в США, CISPR (Европа) и VCCI (Япония). Выбранные нормы будут отображены в виде линий ограничений на дисплее Spectrum display и наложены на спектр моделированного излучения. Опция User позволяет ввести собственные ограничения.

В нижней правой части окна находятся три ручки управления, предназначенные для настройки отображения сигнала:

- поле Vertical содержит ручку Offset, при помощи которой устанавливается смещение графика в окне **Spectrum display** по вертикальной оси;
- поле Horizontal содержит две ручки: Central Freq — центральная частота, Scale — величина деления по оси X.

После того как все настройки выполнены, можно запустить моделирование, для чего необходимо нажать на кнопку **Start Simulation** в верхнем правом углу лицевой панели анализатора спектра. После окончания моделирования результаты отображаются в двух окнах дисплея. Верхнее окно **Mini oscilloscope display** показывает токовую

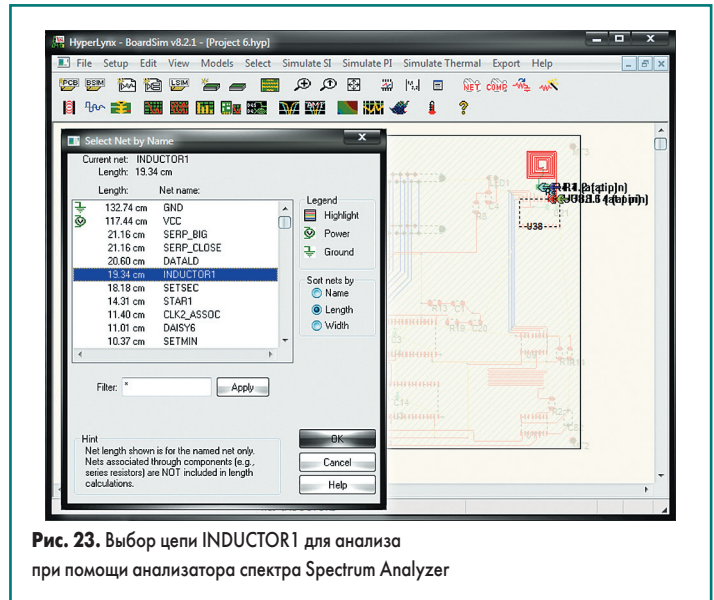


Рис. 23. Выбор цепи INDUCTOR1 для анализа при помощи анализатора спектра Spectrum Analyzer

кривую передатчика в линейном масштабе. Нижнее окно **Spectrum display** показывает спектр ЭМС в логарифмическом масштабе. Если в качестве зонда используется токовый пробник, окно **Spectrum display** отображает спектр токов, используя логарифмический масштаб.

Выберем в качестве примера цепь INDUCTOR1 (рис. 23) и выполним ее анализ при помощи анализатора спектра Spectrum Analyzer. Для этого откроем кнопкой **Select Net by Name for SI Analysis** панели инструментов BoardSim окно **Select Net by Name** и выберем левой кнопкой мыши в поле Current net строку с названием цепи. Закроем окно **Select Net by Name** кнопкой **OK**.

Перед тем как выполнить анализ, нужно всем пассивным компонентам выбранной цепи указать значения, а микросхемам назначить модели, так как при выполнении анализа компоненты с неназначенными моделями воспринимаются как разомкнутые цепи. Сделать это можно в окне **Assign Models**, которое открывается кнопкой **Select Component Models or Edit Values** панели инструментов BoardSim. Как видно на рис. 24а, все выводы компонентов цепи INDUCTOR1 не назначены. Выберем при помощи кнопки **Select** для выводов U38.14 и U38.16 модели, а затем определим вывод U38.14 как передатчик, а вывод U38.16 как приемник, для чего в поле Buffer settings окна **Assign Models** установим переключатель в позицию Output и Input. Для вывода R4.1 укажем значение, для чего выберем этот вывод левой кнопкой мыши в поле Pins, и на открывшейся вкладке Resistor (рис. 24б) в поле Value установим нужное сопротивление. Затем нажмем последовательно кнопки **Copy** и **Paste** — вывод в поле Pins отобразится как назначенный (рис. 24в). Для того чтобы выполненные изменения вступили в силу, нажмем на кнопку «Применить» в нижнем правом углу окна **Assign Models**, а затем закроем окно кнопкой «Закреть».

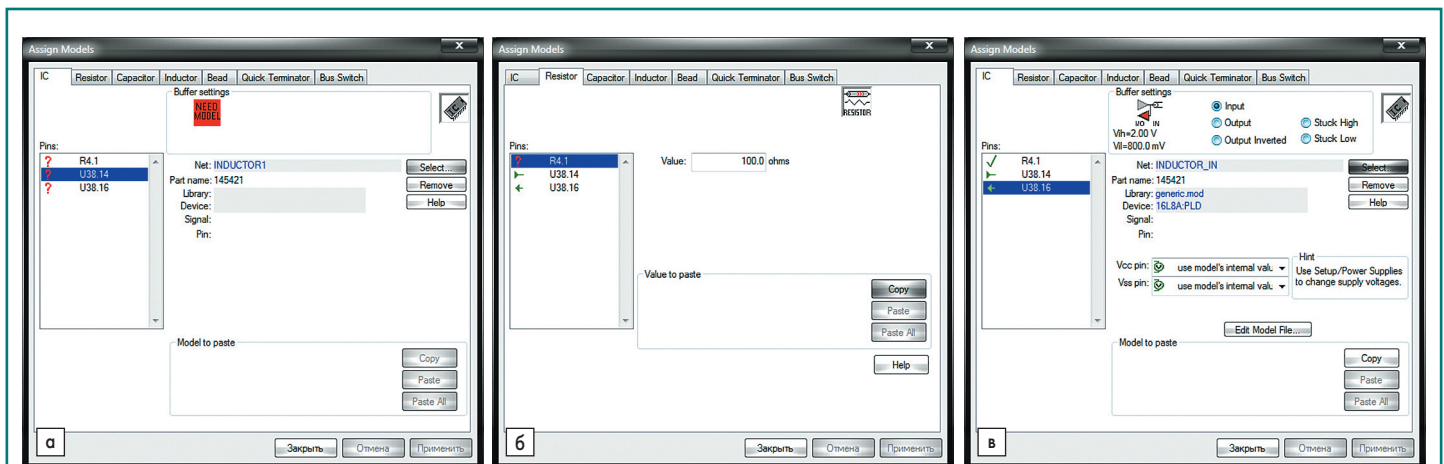


Рис. 24. Окно Assign Models:

а) неназначенные выводы компонентов цепи INDUCTOR1 в поле Pins; б) установка значения сопротивления вывода резистора; в) выводы цепи INDUCTOR1 после назначения

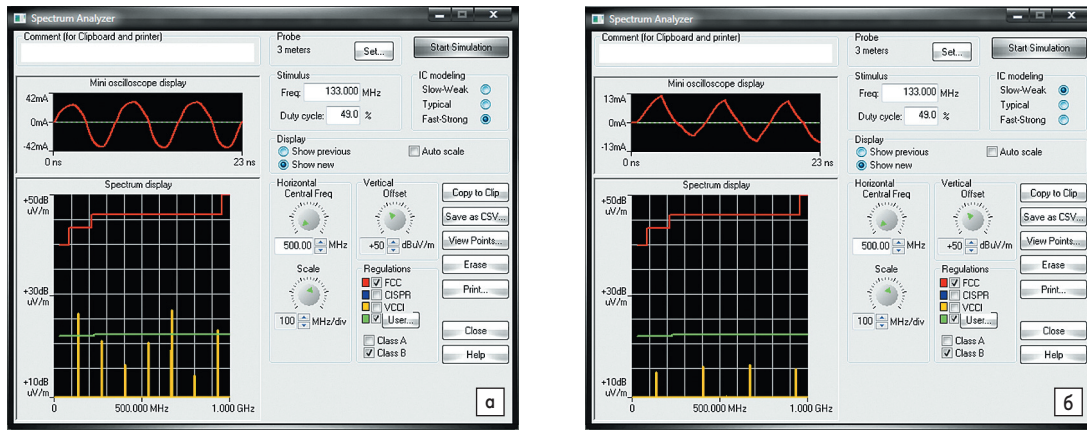


Рис. 25. Спектральные диаграммы излучаемого магнитного поля: а) IC modeling Fast-Strong; б) IC modeling Slow-Week

Теперь запустим анализатор спектра, нажав кнопку **Run Interactive EMC Simulation (Spectrum Analyzer)** на панели инструментов BoardSim. В качестве зонда выберем антенный зонд.

Выполним моделирование с установкой значения Fast-Strong в поле IC modeling (рис. 25a). Определим частоту и амплитуду двух наибольших вершин в окне **Spectrum display**, а затем установим значение поля IC modeling в позицию Slow-Week и повторим анализ ЭМС. Для того чтобы отобразить в центре окна дисплея самую высокую вершину, можно установить флажок в чекбоксе **Auto scale** в поле **Display**. Снова заметим частоту и амплитуду двух наивысших вершин (рис. 25б). По результатам выполненного моделирования можно определить установки передатчика, которые приводят к наибольшему излучению ЭМС и являются причиной нарушения норм ЭМС. Плата не удовлетворяет требованиям ЭМС, если максимальное электромагнитное излучение превышает нормы ЭМС на любой частоте.

В рассмотренном примере нарушения норм FCC не было, однако были нарушены пользовательские нормы ограничений (рис. 26) в случае использования быстрого передатчика сигнала. Из этого можно сделать вывод, что при решении проблемы ЭМС не стоит забывать про используемую элементную базу. Применение микросхем с меньшей скоростью переключения между логическими уровнями напряжения всегда предпочтительнее, если

это не сказывается на быстродействии устройства. Чем меньше быстродействие буферов ввода/вывода, тем надежнее меры по обеспечению целостности сигналов и ЭМС.

Результаты анализа спектра ЭМС можно вывести на печать, для чего в окне **Spectrum Analyzer** предназначена кнопка **Print**, после нажатия на которую будет открыто окно «Печать». Печатать можно на бумажные носители или в файл. Для вывода диаграмм на принтер необходимо в окне «Печать» в поле «Выберите принтер» указать принтер, на который вы планируете отправить документ на печать, и нажать кнопку «Печать». При этом настройка параметров выполняется в окне «Настройка печати», открыть которое можно кнопкой «Настройка» окна «Печать». Для печати полученных в ходе анализа диаграмм в файл необходимо в поле «Выберите принтер» окна «Печать» выбрать строку Microsoft Office Document Image Writer и нажать кнопку «Печать». Настройка параметров печати в файл выполняется кнопкой «Настройка». Результат печати диаграмм в файл представлен на рис. 27.

Редактирование стека слоев печатной платы

Для улучшения целостности сигналов можно вносить изменения в стек слоев печатной платы. Редактор стека слоев Stackup Editor позволяет изменять характеристики диэлектрических и металлических слоев, удалять или добавлять новые слои и анализировать происходящие вследствие этого перемены. Встроенные в редактор средства анализа электрических параметров предоставляют возможность для заданных характеристик конструкции печатной платы автоматически определять ширину трассы по заданному импедансу (отдельно для каждого слоя) и параметры дифференциальной пары (для заданного дифференциального импеданса). В Stackup Editor можно также назначить цвет для каждого слоя, впоследствии эти цвета будут применяться для отображения трасс.

Редактор стека слоев используется при работе с модулем LineSim, в модуле посттопологического анализа BoardSim, а также в режиме MultiBoard. Для того чтобы открыть редактор

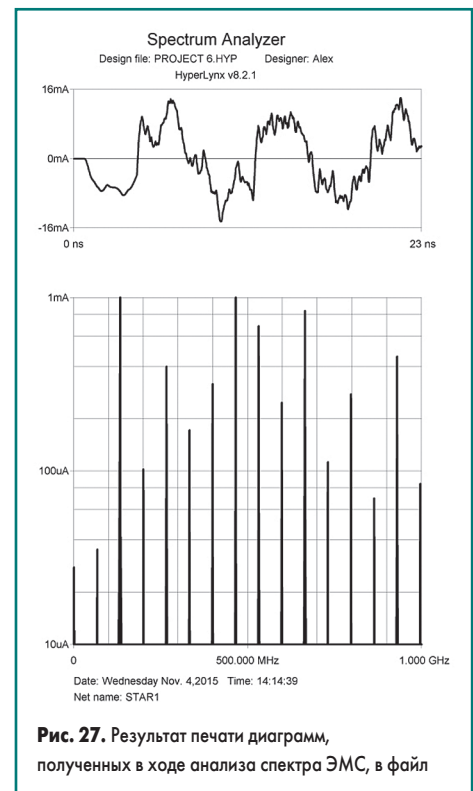


Рис. 27. Результат печати диаграмм, полученных в ходе анализа спектра ЭМС, в файл

Stackup Editor, необходимо в основном меню BoardSim выбрать пункт **Setup/Stackup/Edit** или на панели инструментов BoardSim нажать кнопку **Edit Stackup**. В открывшемся окне можно редактировать, удалять или добавлять слои печатной платы. Удалить слой можно командой основного меню редактора **Edit/Delete**, предварительно выделив его в таблице слоев, для чего надо в первой колонке таблицы щелкнуть левой кнопкой мыши по номеру слоя, в результате будет выделена вся строка с описанием слоя. Добавить слой можно командами **Edit/Insert Above** (добавить слой выше выбранного слоя) и **Edit/Insert Below** (добавить слой ниже выбранного слоя) основного меню редактора. Изменения стека автоматически применяются ко всем элементам файла проекта.

Управлять выделением слоев в таблице слоев можно при помощи следующих кнопок панели инструментов редактора:

- **Select all layers** (выделить все слои);
- **Select all metal layers** (выделить все слои металлизации);

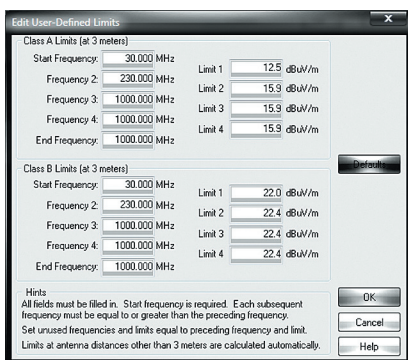


Рис. 26. Окно настройки параметров пользовательских норм ограничений

- Select all dielectric layers (выделить все слои диэлектрика);
- Deselect selected layers (снять выделение всех слоев).

Редактор Stackup Editor содержит вкладки, на которых можно настраивать:

- общие параметры слоев (вкладка Basic — рис. 28а): видимость (поле Visible) и цвет слоя (поле Color), стиль заливки слоя металлизации (поле Pour Draw Style: None — нет заливки, Solid — сплошная, Hatched — штриховка, Outline — контур), теплопроводность (поле Thermal Conductivity), импеданс (поле Z0), толщину слоя (поле Thickness), тип слоя (поле Type: Dielectric — диэлектрик, Metal — металл), применение (поле Usage, для слоев металлизации: Signal — сигнальный, Plane — заливка, для слоев диэлектрика: Substrate — подложка, Solder Mask — паяльная маска, название слоя (поле Layer Name: TOP — верхний, Inner_Layer — внутренний, VDD — слой питания, GND — слой земли);
- параметры слоев диэлектрика (вкладка Dielectric — рис. 28б): тип слоя (поле Type), применение (поле Usage), технологию (поле Technology), тангенс угла потерь (поле Loss Tangent), теплопроводность (поле Thermal Conductivity), название слоя (поле Layer Name);
- параметры слоев металлизации (вкладка Metal — рис. 28в): тип слоя (поле Type), применение (поле Usage), материал металлизации (поле Metal), толщину слоя (поле Thickness), удельное сопротивление (поле Bulk R), температурный коэффициент (поле T coef), импеданс (поле Z0), кривые потерь (поле Loss Curve), теплопроводность (поле Thermal Conductivity), название слоя (поле Layer Name);
- выборочный просмотр параметров слоев печатной платы (вкладка Custom View — рис. 28г). По умолчанию на этой вкладке показаны все доступные параметры слоев платы, однако при необходимости пользователь может самостоятельно выбрать отображение только тех параметров, которые нужны для просмотра и редактирования. Сделать это можно посредством установки/снятия флажков в соответствующих параметрам чекбоксах в окне **Customize Spreadsheet** (рис. 29), которое открывается кнопкой **Customize** (кнопка расположена в левой нижней части вкладки). Изменить порядок отображения параметров в табли-

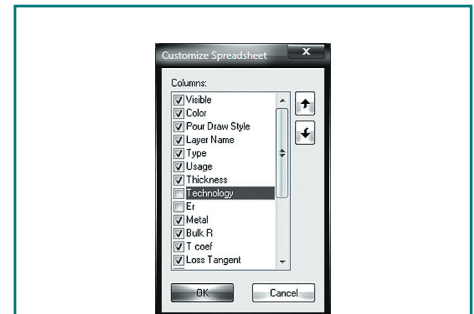
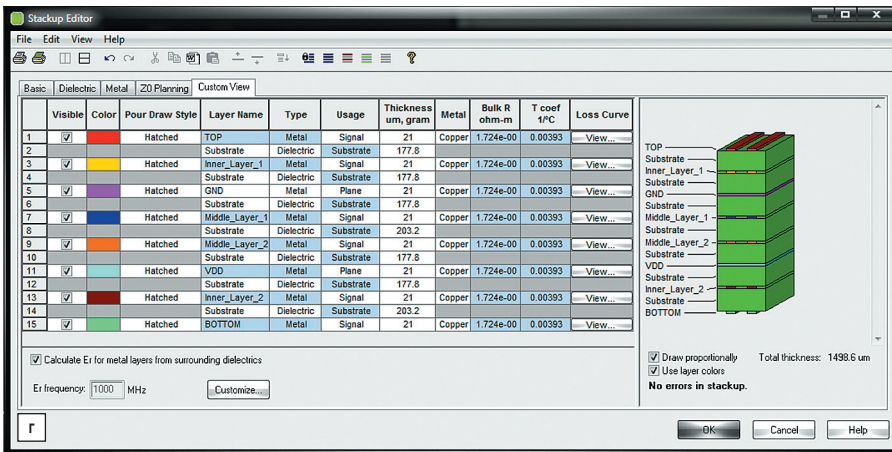
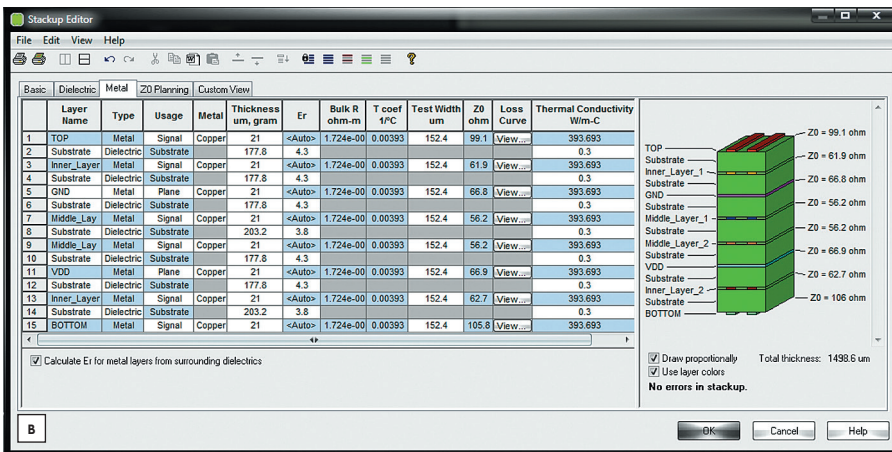
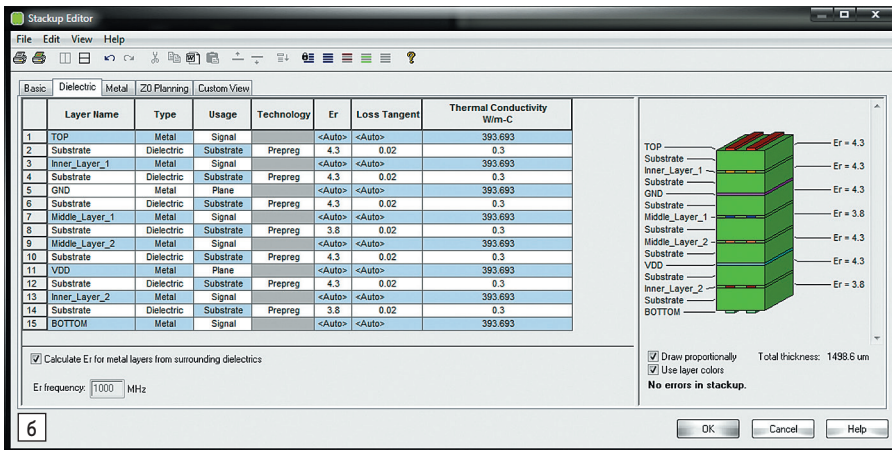
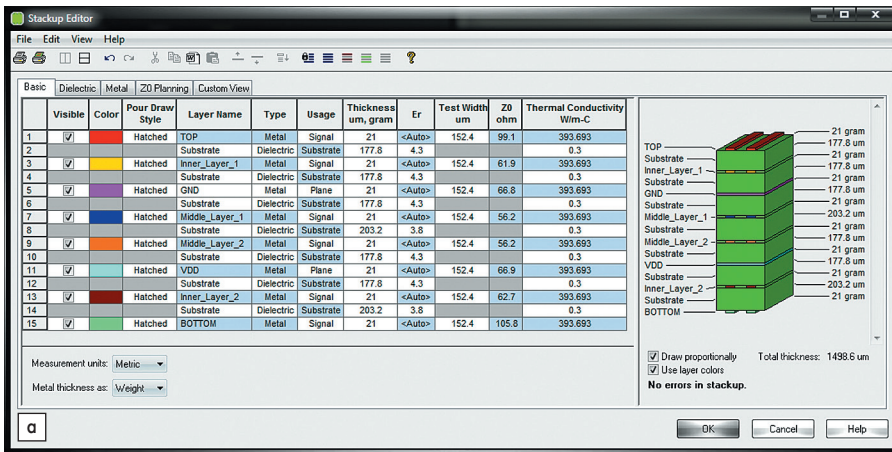


Рис. 28. Редактор Stackup Editor, вкладка: а) Basic; б) Dielectric; в) Metal; г) Custom View

Рис. 29. Окно Customize Spreadsheet

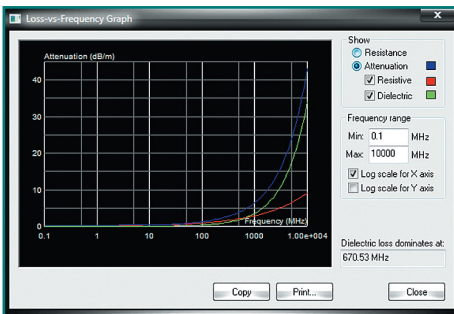


Рис. 30. Окно Loss-vs-Frequency Graph

це слоев вкладки Custom View можно при помощи кнопок-стрелок окна **Customize Spreadsheet**. Для чего выделите левой кнопкой мыши в поле Columns необходимый параметр и переместите его в нужную позицию при помощи кнопок-стрелок «Вниз/Вверх». При этом верхний параметр с установленным флажком поля Columns будет отображаться в таблице слоев первым, второй — вторым и т. д.

В поле Loss Curve вкладки Metal для каждого слоя доступна кнопка **View**, при помощи которой можно открыть окно графика кривых потерь (рис. 30). Управлять отображением кривых на графике можно при помощи переключателей: Resistance (сопротивление), Attenuation (затухание) и чекбоксов: Resistive (резистивное), Dielectric (диэлектрика), расположенных в поле Show в правом верхнем углу окна.

Проверить созданный стек слоев на наличие ошибок можно при помощи команды Setup/Stackup/Check основного меню BoardSim. В результате ее выполнения будет выведено сообщение об отсутствии ошибок. В случае их обнаружения система попытается самостоятельно устранить ошибки.

Продемонстрируем работу этой команды на конкретном примере. Введем искусственно ошибку в стек слоев платы (рис. 31а) — удалим слой диэлектрика, который находится между слоем GND и слоем Middle_Layer_1, и слой диэлектрика, расположенный между слоем Middle_Layer_1 и Middle_Layer_2, в результате чего окажутся рядом слой заливки и два сигнальных слоя (рис. 31б). Проведем проверку

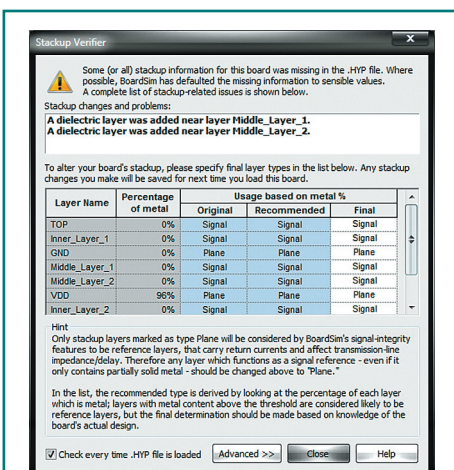
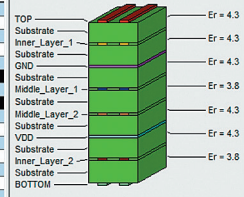


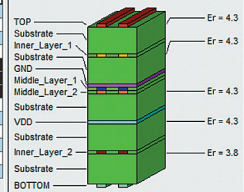
Рис. 32. Сообщение об устранении ошибки в стеке слоев платы проекта BoardSim

Layer Name	Type	Usage	Technology	Er	Loss Tangent	Thermal Conductivity W/m-C
1 TOP	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
2 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
3 Inner_Layer_1	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
4 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
5 GND	Metal	Plane	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
6 Middle_Layer_1	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
7 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
8 Middle_Layer_2	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
9 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
10 VDD	Metal	Plane	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
11 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
12 Inner_Layer_2	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
13 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	3.8	0.02	0.3
14 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	3.8	0.02	0.3
15 BOTTOM	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693



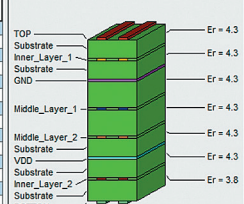
Total thickness: 1498.6 um
No errors in stackup.

Layer Name	Type	Usage	Technology	Er	Loss Tangent	Thermal Conductivity W/m-C
1 TOP	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
2 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
3 Inner_Layer_1	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
4 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
5 GND	Metal	Plane	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
6 Middle_Layer_1	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
7 Middle_Layer_2	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
8 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
9 VDD	Metal	Plane	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
10 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
11 Inner_Layer_2	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
12 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	3.8	0.02	0.3
13 BOTTOM	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693



Total thickness: 1117.6 um
Dielectric layer is required near layer 4

Layer Name	Type	Usage	Technology	Er	Loss Tangent	Thermal Conductivity W/m-C
1 TOP	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
2 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
3 Inner_Layer_1	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
4 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
5 GND	Metal	Plane	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
6 Dielectric	Substrate	Core	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
7 Middle_Layer_1	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
8 Middle_Layer_2	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
9 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
10 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
11 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
12 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	4.3	0.02	0.3
13 Inner_Layer_2	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693
14 Substrate	Dielectric	Substrate	Prepreg	3.8	0.02	0.3
15 BOTTOM	Metal	Signal	<Auto>	<Auto>	<Auto>	393.693



Total thickness: 1625.6 um
No errors in stackup.

Рис. 31. Стек слоев платы: а) до ввода ошибки; б) после ввода ошибки; в) после выполнения команды Setup/Stackup/Check

при помощи команды Setup/Stackup/Check основного меню BoardSim, для чего предварительно закроем редактор Stackup Editor (нажать в редакторе на кнопку **OK**). В результате выполнения команды было получено два сообщения (рис. 32): A dielectric layer was added near layer Middle_Layer_1. A dielectric layer was added near layer Middle_Layer_2. (Слой диэлектрика был добавлен возле слоя Middle_Layer_1. Слой диэлектрика был добавлен возле слоя Middle_Layer_2.) Это означает, что причина ошибки выявлена и автоматически устранена. В этом можно убедиться, заново открыв стек слоев платы (рис. 31в).

В редакторе Stackup Editor есть возможность вывести на печать информацию о стеке слоев печатной платы, для чего предназначены кнопки **Print layers info** и **Print Stackup as a picture** панели инструментов редактора. После нажатия на кнопку **Print layers info** будет открыто окно **Print**, в котором в поле Copies при помощи переключателя Number of copies можно указать количество копий выводимого на печать документа. Установка флажка в чекбоксе Collate поля Copies задает порядок вывода копий документа на печать. Поле Print layers (диапазон выводимых на печать слоев) может принимать такие значения:

- Whole stackup — вывод на печать всех слоев стека;
- Range — вывод на печать диапазона слоев;
- Selection — выбор конкретно заданных слоев стека печатной платы для печати.

В поле Print columns посредством установки/снятия флажков в чекбоксах выполняется выбор параметров слоев платы для печати. В поле Print Schematic Image указывается необходимость печати схематического отображения стека слоев платы, а в поле Print Style из выпадающего меню Print As можно выбрать стиль отображения информации: в виде таблицы (пункт Table) — рис. 33а или списка (пункт List) — рис. 33б.

Печать можно производить на бумажные носители или в файл. Для вывода информации о стеке слоев платы на печать на принтер (плоттер) необходимо в окне **Print** в поле Printer в меню Name из выпадающего списка выбрать принтер, на который вы планируете отправить документ на печать, и нажать на кнопку **Properties** (свойства) для того, чтобы настроить параметры печати для своего принтера. Рис. 34 демонстрирует окно **Print**, параметры которого настроены для печати информации о стеке слоев печатной платы на принтере, а также окно «Свойства: принтера» (это

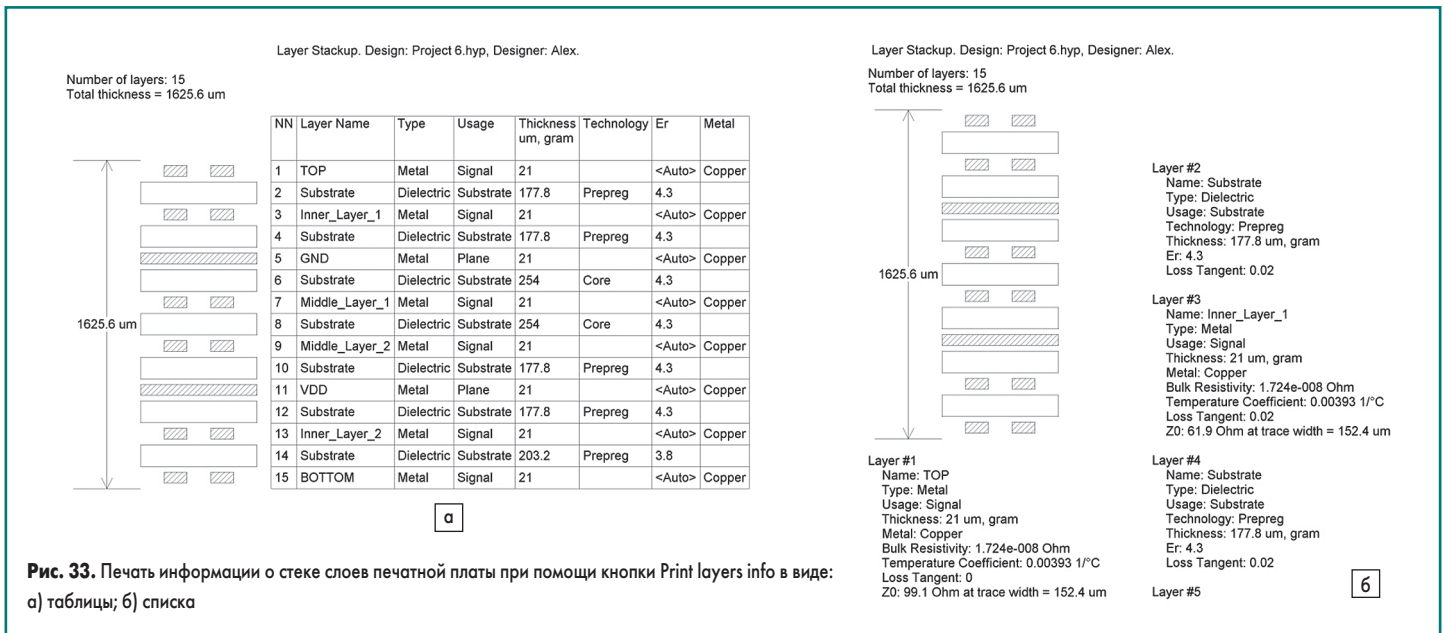


Рис. 33. Печать информации о стеке слоев печатной платы при помощи кнопки Print layers info в виде: а) таблицы; б) списка

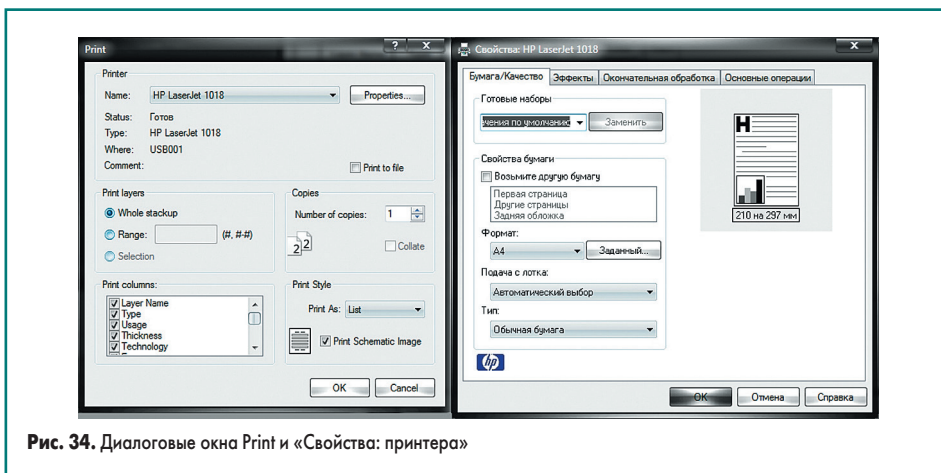


Рис. 34. Диалоговые окна Print и «Свойства: принтера»

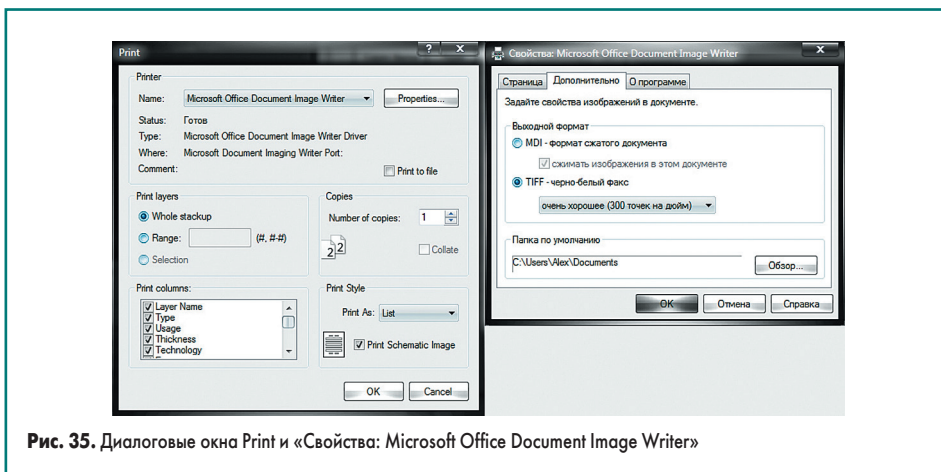
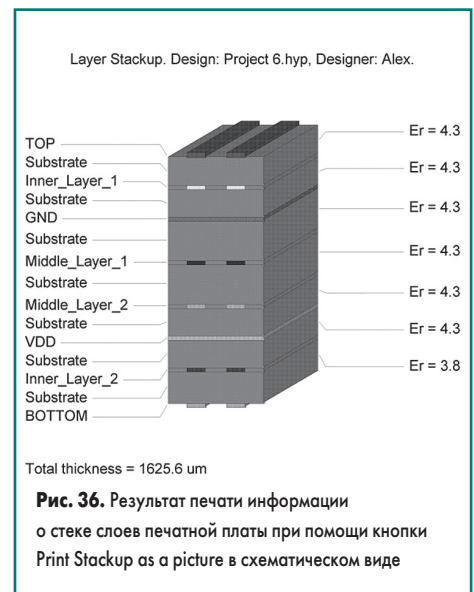


Рис. 35. Диалоговые окна Print и «Свойства: Microsoft Office Document Image Writer»

окно открылось после нажатия на кнопку Properties). Для печати информации о стеке слоев в файл необходимо в поле Printer в меню Name из выпадающего списка выбрать строку Microsoft Office Document Image Writer и нажать кнопку Properties. В открывшемся окне «Свойства: Microsoft Office Document Image Writer» на вкладке «Дополнительно» укажите расширение файла, в который будет сохранена информация о стеке слоев платы, и разрешение (точек на дюйм). В поле «Папка по умолчанию» задайте местоположение

создаваемого файла. Для вступления в силу внесенных изменений нажмите на кнопку ОК. Рис. 35 демонстрирует окно Print, параметры которого настроены для печати информации о стеке слоев платы в файл, а также окно «Свойства: Microsoft Office Document Image Writer». После того как все параметры настроены, можно отправлять документ на печать. Для этого необходимо нажать на кнопку ОК в окне Print. При помощи кнопки Print Stackup as a picture панели инструментов редактора

Stackup Editor информация о стеке слоев печатной платы в схематическом виде отправляется на печать без возможности выполнения настроек (рис. 36). При этом печать можно производить на бумажные носители или в файл.

Литература

1. PADS ES Suite Evaluation Guide. Mentor Graphics Corporation, 2012.
2. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.
3. Ткалич О. П., Дятлов А. А., Мамаев Р. А. Применение глазковых диаграмм для исследования цифровых сигналов // Электроника и системы управления. 2009. № 2.
4. Колесникова Т. Проектирование принципиальных схем и печатных плат в программной среде Mentor Graphics PADS 9.5. Посттопологический анализ целостности сигналов высокоскоростных печатных плат в HyperLynx. Часть 1 // Технологии в электронной промышленности. 2015. № 8.