

Последовательность проектирования печатных плат

Сколько я ни прошу своих студентов показать мне пошаговую последовательность проектирования печатных узлов и плат, столько они жалуются, что ничего нужного не находят ни в Интернете, ни в журналах. Действительно, профессиональные проектировщики электроники, наверное, считают это настолько простым и очевидным, что опубликовать статью на эту тему они считают для себя чем-то малозначимым и потому ненужным. Самый успешный и интересный популяризатор процессов проектирования электроники А. И. Акулин [1–3] на своих семинарах так углубился в сложные проблемы проектирования, что возвращаться к началам ему уже не резон. Поэтому мне захотелось вернуться к первым шагам в процессе проектирования печатных плат для начинающих работать в этой области творчества. Этому способствовал выпуск двухтомного справочника К. Ф. Кумбза «Печатные платы» [4], где глава 14, написанная профессором Ли В. Ричи (Lee W. Ritchey), посвящена именно процессу проектирования печатных плат.

Аркадий Медведев,
профессор МАИ, д. т. н.

Задачи проектирования

Задача процесса проектирования печатных плат — это разработка межсоединений в соответствии с принципиальной электрической схемой, включающая конструирование всех ее активных цепей, которые будут функционировать должным образом в пределах любых допустимых изменений характеристик компонентов, их быстродействия, допусков на материалы, допустимых диапазонов температур, напряжения питания и производственных допусков. Завершающим этапом проектирования является подготовка всей документации и данных, которые необходимы для изготовления, сборки, испытания и устранения неисправностей печатной платы и печатного узла (платы со смонтированными компонентами). Если будет выполнена только часть этого необходимого объема проекта, то производитель и пользователи печатной платы или узла будут нести временные и финансовые потери, чтобы завершить недоделанные проектные работы.

Хорошо проработанный проект должен предусматривать реальные возможности производства, выбор подходящих материалов и компонентов, которые могли бы удовлетворить требования, предъявляемые к конечному продукту. Не рекомендуется создавать проект, рассчитывая на предельные возможности производства. Лучше отступить на шаг назад в проектных нормах и обеспечить себе гарантии выполнения заказа без проблем, чем поставить под угрозу срыва сроки выполнения заказа. Например, если производство способно выполнять проводники шириной 0,1 мм, то такую проектную норму лучше не использовать без реальной необходимости. Если проект позволяет, то можно заложить ширину проводников и зазоров в 0,15 мм, что значительно упростит изготовление, снизит стоимость производства и создаст гарантии своевременности выполнения вашего заказа.

Последовательность проектирования

На рис. 1 представлена блок-схема основных шагов полного проектирования печатной платы, начиная с технических характеристик требуемого конечного продукта и до получения или сохранения базы данных проектирования в форме, которая дала бы возможность изменять конструкцию или обновлять документацию при необходимости поддержки текущего производства. Этот процесс использует все преимущества разработанных компьютерных средств, обеспечивающих проектирование с первого раза, исключая всякие переделки.

Технические характеристики системы

Проектная группа начинает новый проект с разработки технических характеристик системы. Они содержат:

- Перечень функций, которые должны быть обеспечены в результате выполнения проекта.
- Условия, при которых он будет выполняться.
- Предполагаемые затраты на реализацию проекта.
- Затраты на освоение проекта.
- График выполнения проектных работ.
- Регламент наладочных работ.
- Степень новизны используемых для него технологий.
- Массу и габариты проектируемого изделия.
- Другие требования (при необходимости).

В самом начале требуется лишь грубая оценка этих параметров, дающая возможность выбрать материалы, инструментальные средства и необходимые приборы. Например, речь может идти о проектировании портативного компьютера, который должен весить менее 2 кг, помещаться в портфель, работать от батареи в течение двух часов, иметь среднее время безотказной работы, равное 200 000 часам или более, стоить менее \$2000, иметь 400 Мбайт оперативной памяти, запоминающее устройство емкостью 240 Гбайт

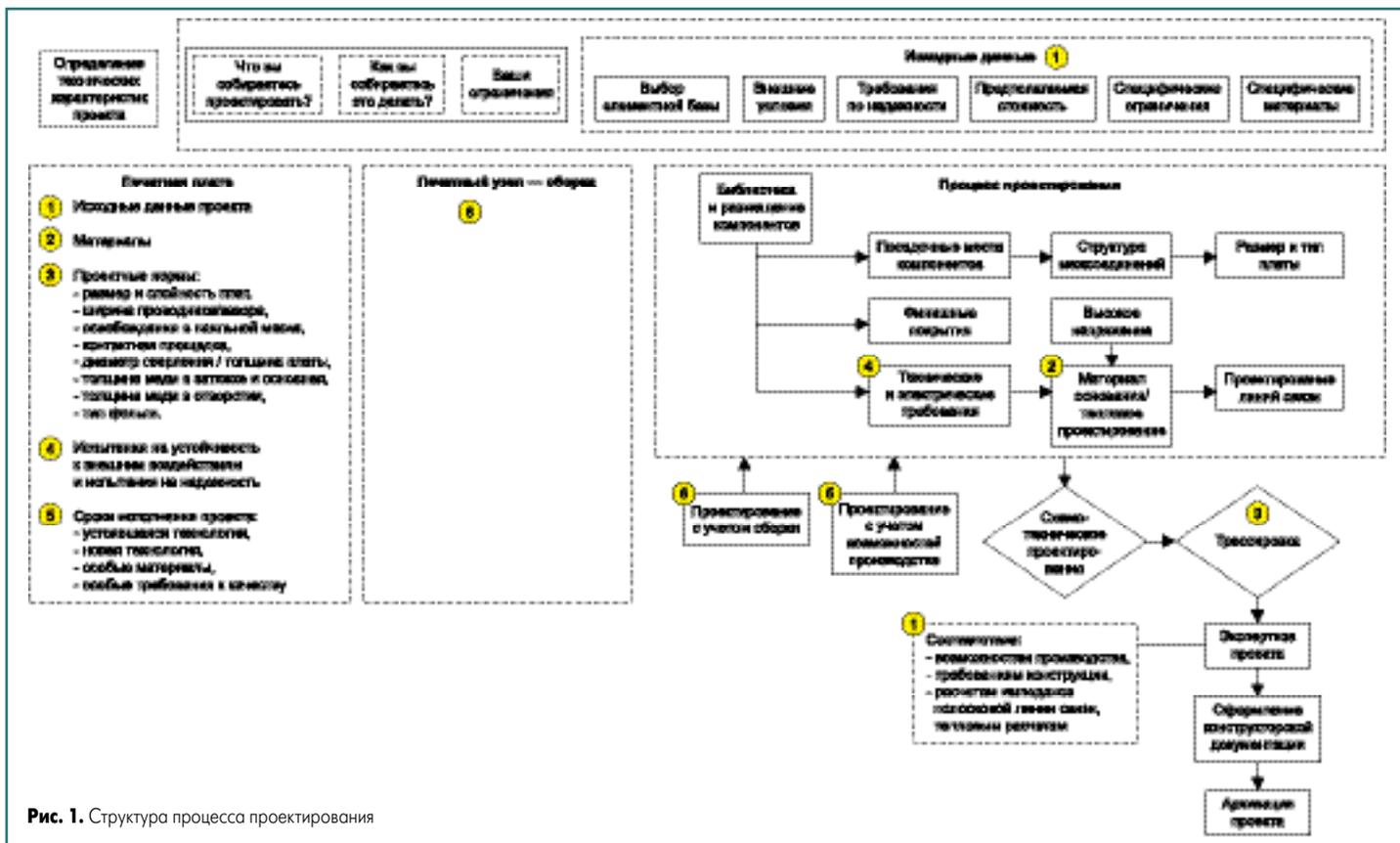


Рис. 1. Структура процесса проектирования

или более и быть совместимым с MS-DOS. Эти технические характеристики служат отправной точкой нового проекта.

Блок-схема системы

Сразу после составления технических характеристик системы разрабатывается блок-схема основных функций, которая будет показывать, как эта система будет распределена и как будут связаны между собой ее функции.

Распределение системы по платам

После того как стали известны основные функции и определены технологии, с помощью которых они будут реализованы, схема разделяется по платам, при этом группируются те функции, которые должны работать вместе на одной плате. Обычно такое распределение производится там, где шины данных соединяют функции вместе. Часто эти шины находятся на соединительной плате, в которую вставляется группа дочерних плат. При работе с персональным компьютером такое распределение часто приводит к использованию материнской платы и нескольких небольших съемных модулей, таких как карта памяти, видеокарта, контроллер диска и карта интерфейса компьютера.

Определение размера печатной платы

Как только становится известна совокупность схемотехнических решений и принцип размещения их частей по платам, можно сразу оценить размер и площадь каждой печатной платы. Очень часто размер ПП заранее фиксируется ее конечным назначением. Например, система, основанная на VME или многошинной технологии, должна использовать печатные платы, размеры которых определены

стандартом «Евромеханики». В этом случае распределение системы и технология компоновки будут продиктованы тем, что можно будет разместить в эти печатные платы стандартного размера.

Окончательная стоимость ПП часто зависит от числа слоев и от количества плат, которые можно разместить на заготовке стандартного размера (у большинства производителей размер заготовки составляет 457×610 мм с рабочей областью 420×560 мм). Выбор такого размера печатных плат, при котором можно было бы использовать всю или большую часть площади заготовки, оказывается наиболее рентабельным.

Разработка принципиальной схемы

После того как были определены функции системы, ее распределение и соответствующие технологии, можно приниматься за схему или детальные соединения между компонентами. Принципиальные схемы и блок-схемы обычно выполняются с помощью систем автоматизированного инженерного проектирования САЕ (computer-aided engineering). Эти системы позволяют конструкторам нарисовать принципиальную схему на экране дисплея или другом терминале. Данные, необходимые для всех последующих шагов выполнения проекта, создаются с помощью системы САЕ из этой принципиальной схемы.

Создание библиотек компонентов

Средства, используемые в процессе проектирования печатной платы, должны быть обеспечены разнообразной информацией о каждой ее части для возможности выполнения каждого этапа проектирования. Эта информация вводится в библиотеку или набор

библиотек, по одной записи на каждый компонент. Среди необходимых элементов информации:

- тип корпуса, вмещающего компонент, например корпус для монтажа в сквозные отверстия, QFP, DIP;
- размер корпуса компонента, расстояние между выводами, размер выводов, форма выводов, посадочное место под компонент;
- функция, выполняемая каждым выводом, например ввод/вывод, вывод подачи питания;
- электрическая характеристика каждого вывода, например емкость, полное выходное сопротивление.

Модельное проектирование

Для уверенности в том, что проект будет выполнять предназначенную ему функцию в определенном диапазоне внешних и внутренних условий, необходимо провести проверку правильности проектирования. Эти условия могут включать точность параметров компонента, диапазон скоростей исполнения, диапазоны рабочей температуры, условия вибрационных и ударных нагрузок, диапазоны влажности и напряжения питания. Исторически это осуществлялось конструированием макетов и прототипов, которые подвергались строгим испытаниям. По мере того как системы и их программное обеспечение становились все совершеннее, эта методика становилась все менее адекватной. Для решения этой проблемы были разработаны программы, которые позволяли компьютеру моделировать функцию без ее конструирования. Эти модели дали возможность намного быстрее проводить испытания, которые стали

строже и многосторонней, чем когда-либо можно было ожидать от любого макета или прототипа.

Обнаруживаемые дефекты можно с легкостью исправлять в имитационной модели, а затем повторно проводить тестирование, прежде чем поручать делать его на аппаратном уровне.

Размещение компонентов на печатных платах

После успешного завершения процесса логико-временного моделирования следует начинать фактическое размещение. Оно начинается с размещения компонентов проекта на поверхности печатной платы по рисункам, которые бы группировали логические функции вместе. После этого получившиеся группы компонентов располагают на рабочем поле ПП так, чтобы взаимодействующие функции оказались смежными, компоненты, создающие тепло, должным образом охлаждались, а компоненты, которые граничат с внешней схемой, оказались рядом с разъемами и т.п. Эту операцию размещения можно выполнять вручную, используя графические средства, или автоматически, с помощью системы САПР для печатных плат.

Порядок проектирования высокочастотных схем

Большинство логических элементов имеют небольшое время переключения, и задержки в линиях (конструктивные задержки) достаточно малы, чтобы полностью исключить проблемы наводок и отражений в линиях связи. Для уверенности в том, что требования по электромагнитной совместимости удовлетворены, необходимо принять меры по согласованию линий связи по импедансу, то есть снабдить их соответствующими импедансу согласующими сопротивлениями. После того как компоненты размещены на поверхности печатной платы, выполняется пространственное расположение всех межсоединений в соответствии с электрической схемой. На этом этапе можно определить, как соединить линии с нагрузками и оконечными устройствами для формирования линий связи, чтобы исключить формирование ошибочных шлейфов и обеспечить согласующие сопротивления в конце линии.

Моделирование эффектов в линиях связи и синхронизации

После завершения размещения компонентов и установки порядка следования узлов в каждой из схем можно оценить длину и характеристики каждой линии. Это возможно, поскольку координаты каждой точки в плоскости X-Y в схеме известны, известен порядок их соединения, а также известно, что фактическая прокладка соединения должна выполняться в одном из направлений по осям X или Y. Эта информация о длине связи может быть использована при моделировании характеристик быстродействующего переключения каждой схемы и прогнозирования наличия чрезмерных помех и отражений, а также оценки промежутка времени, требуемого сигналу на прохождение каждой линии. И все это — до выполнения фактической трассировки или конструирования печатной платы.

Этот этап имитационного моделирования дает возможность обнаружить потенциальные нарушения функций сигналов и до выполнения трассировки решить эту проблему при весьма скромном ресурсе времени моделирования.

Настройка порядка следования и размещения

Если моделирование выявило чрезмерные задержки времени или проблемы с отражениями, то следует отрегулировать размещение компонентов и переместить линии с критическими участками или добавить в схемы согласующие сопротивления для уменьшения отражений. Выполнив эту модельную настройку, вы можете считать, что достигли поставленной цели «с первого раза», что очень важно для проектирования конструкций с повышенными рабочими характеристиками.

Тестирование трассируемости для выбранного размещения

На этом этапе уже многое было проанализировано для того, чтобы выяснить, правильно ли будет функционировать создаваемая конструкция после ее трассировки. Однако трассировка может и не получиться в ряде слоев сигнальной разводки из-за требований, которые накладывает конечная стоимость конструкции. Большинство САД-систем (САПР) имеют инструмент для анализа трассируемости, который помогает проектировщику определить, разместится ли трассировка в разрешенных слоях сигнальной разводки. Если она не будет помещаться, то анализатор трассируемости может дать информацию о том, как нужно пересмотреть размещение компонентов, чтобы получить удачную трассировку. После урегулирования размещения следует повторить шаги по моделированию линий связи и синхронизации и убедиться в достижении намеченных целей.

Если она не будет помещаться, то анализатор трассируемости может дать информацию о том, как нужно пересмотреть размещение компонентов, чтобы получить удачную трассировку. После урегулирования размещения следует повторить шаги по моделированию линий связи и синхронизации и убедиться в достижении намеченных целей.

Разводка печатной платы

Этот шаг включает в себя размещение всех соединений в слоях сигнальной разводки в виде медных трасс, при этом следует соблюдать правила выбора длины и шага трасс. Обычно на этом этапе используют комбинацию ручной трассировки цепей специальных сигналов и автоматическую трассировку всего остального.

Проверка результатов трассировки

После прокладки всех соединений в слоях сигнальных связей становится известной фактическая форма и длина каждой линии и слой, на котором они были проложены, а также какие из цепей смежные. Эти физические данные могут быть загружены в анализатор линий связи и синхронизации для выполнения окончательной проверки, все ли проектные цели были достигнуты. Любые обнаруженные нарушения могут быть исправлены при необходимости перетрассировкой вручную. После выполнения этих проверок и завершения всех регулировок необходимо проверить окончательную разводку по списку соединений в схеме, чтобы убедиться в отсутствии расхождений. Окончательную проверку выполняют по данным Gerber, чтобы убедиться, что требования к ширине проводников и зазоров выполнены и что на каждой контактной площадке нет паяльной маски, а также что трассы и другие элементы рисунка, которые должны быть защищены от припоя, покрыты паяльной маской.

Таблица 1. Типичный набор файлов проектирования, которые направляются производителю печатных плат

Имя файла	Содержимое файла
BVBBpCCC.arc*	Архивный файл с файлами Gerber, содержащий:
applist.p	перечень апертур фотопечати для трафарета
ly1 thru lyx.ger	данные протокола Gerber для X слоев печатной платы
topmsk.ger	данные фотопечати Gerber для верхней паяльной маски
botmsk.ger	данные фотопечати Gerber для нижней паяльной маски
topslk.ger	данные фотопечати Gerber для верхней трафаретной сетки
botslk.ger	данные фотопечати Gerber для нижней трафаретной сетки
pc_356.out	данные IPC 356 для тестирования пустой печатной платы
name0.rep	отчет по распределению высверленных отверстий с металлизацией
name0.prf	файл для сверления всех металлизированных отверстий
name1.rep	отчет о расположении высверленных неметаллизированных отверстий
XX.XX.fab	рабочие чертежи в формате HPGL, лист XX из XX

Примечание. * BVBBpCCC является номером детали печатной платы.

Таблица 2. Типичный набор файлов проектирования, которые направляются в сборочно-монтажное производство

Имя файла	Содержимое файла
BVBBaCCC.arc*	Архивный файл всех данных монтажа, содержащий:
applist.a	перечень апертур для нанесения маски из пасты
readme.osy	ознакомительный файл с описанием монтажа
tpstmsk.ger	данные фотопечати Gerber для верхнего трафарета для нанесения пасты
bpstmsk.ger	данные фотопечати Gerber для нижнего трафарета для нанесения пасты
BVBB-CCC.dbg	Mfg. выходной, формат информационных данных
BVBB-CCC.dip	Mfg. выходной, положение по x-y устанавливаемых компонентов
BVBB-CCC.log	Mfg. выходной, регистрационный журнал компонентов
BVBB-CCC.man	Mfg. выходной, положение по x-y компонентов, вставляемых вручную
BVBB-CCC.smt	Mfg. выходной, положение по x-y компонентов, устанавливаемых сверху
BVBB-CCC.smb	Mfg. выходной, положение по x-y компонентов, устанавливаемых снизу
BVBB-CCC.unp	Mfg. выходной, несмонтированные части
BVBB-CCC.vcd	Mfg. выходной
XX_XX.asy	монтажные чертежи в формате HPGL, лист XX из XX
XX_XX.fab	рабочие чертежи в формате HPGL, лист XX из XX

Примечание. * BVBBaCCC является номером детали печатной платы.

Создание файлов с производственными данными

Этот шаг включает выпуск файлов для фотоплоттера, сверления, установки компонентов, файлов тестирования плат без монтажа и плат с компонентами, для чертежей и описи материалов, необходимых для производства. Типичный перечень таких файлов приведен в таблицах 1 и 2.

Архивация проектов

После того как созданы все данные для производства, база данных проектирования и все файлы с данными для производства сохраняются на магнитной ленте или другом носителе для будущего использования при внесении изменений и в качестве резервной копии в случае потери файлов и чертежей, созданных для производства.

Средства проектирования

Из определения цели процесса проектирования печатной платы можно видеть, что процесс начинается концепцией и заканчивается сборкой и тестированием. Средства автоматизированного проектирования используются для автоматизации или увеличения скорости и точности каждого шага этого процесса. Эти средства можно разделить на три основные группы, основываясь на том, где они применяются:

- средства автоматизированного конструирования (computer-aided engineering, CAE);
- средства автоматизированного проектирования (computer-aided design, CAD);
- автоматизированные средства подготовки производства (computer-aided manufacturing, CAM).

Названия этих средств говорят о том, что они используются для проектирования схем, физического конструирования печатной платы и изготовления плат без монтажа и плат с монтажом.

Средства инженерного проектирования

Средствами инженерного проектирования (CAE) обычно обозначают автоматизированные средства и системы, которые используют на стадиях проектирования до этапа физического конструирования или для анализа и оценки электрических характеристик окончательной физической трассировки. Они включают в себя следующее.

Системы ввода описания электрической схемы

Как и предполагается по названию, эти средства применяются инженером-конструктором для проектирования принципиальной электрической схемы. Простейшие системы являются графической заменой классической чертежной доски (кульмана), предоставляя инженеру возможность помещать логические и электрические символы на поверхность чертежа и соединять их выводы с помощью линий. Усовершенствованные системы выполняют основную проверку ошибок, таких как защита от многократного использования одного вывода или имени логической цепи. Неудача подключения важных выводов, таких как точки питания, может быть преодолена с помощью информации, содержащейся в библиотеках компонентов по каждой детали. Кроме того, эти системы могут создавать таблицы соединений, которые применяются имитационными моделями и программами автоматической трассировки печатных плат, а также ведомости материалов для применения в монтаже печатных плат.

Синтезаторы

Синтезаторами являются специализированные средства CAE, которые позволяют конструктору определить логические функции, выполняемые в форме логических операций, таких как полный двоичный сумматор, регистр шириной в 16 бит или другие макрофункции. Синтезатор будет извлекать эквивалентные логические функции цепей из библиотеки функций и соединять их вместе согласно установленному конструктором порядку для получения полной логической схемы. Эта синтезированная схема затем может быть использована как часть более крупной схемы. Некоторые преимущества синтезаторов заключаются в том, что все функции данного типа будут внедряться одинаково и не будут содержать ошибок, а время, требуемое для составления схемы системы, уменьшится за счет устранения работы, необходимой для проектирования повторяющихся схем.

Имитаторы

Имитаторы — это средства программирования, с помощью которых создаются автоматизированные модели цепи и которые запускают с входными тестовыми схемами цепи для проверки того, будет ли схема выполнять предназначенную ей функцию при ее использовании в аппаратных средствах. Даже при выполнении этих программ на очень больших компьютерах имитаторы обычно работают только при малой доле скорости фактической цепи. Когда цепь вырастает и становится сложной, как в случае 32-битного микропроцессора или процессора цифровых сигналов, то время, требуемое для выполнения полной имитации, может оказаться довольно большим, иногда настолько большим, что этот метод проверки цепи становится непрактичным.

Типичная скорость имитации составляет 1 или 2 с для каждого тактового цикла ЭВМ. Такт работы ЭВМ может составлять 2 нс или 500 млн/с для систем с тактовой частотой 500 МГц. Это эквивалентно уменьшению скорости в 500 млн к одному! По мере роста сложности цепей и вместе с ней времени имитации, которое становится чрезмерным, инженеры предприняли усилия для создания физических моделей предлагаемой схемы, чтобы исполнять программу в абсолютных адресах в противоположность модели для гарантии того, что конструкция безошибочна. Ясно, что это увеличивает и время, и расходы на цикл разработки за счет добавления как времени, необходимого для конструирования модели, так и времени, необходимого для локализации конструкторских ошибок и их устранения. Решить эту проблему можно с помощью эмуляции схем.

Эмуляторы

Эмуляторы, или эмуляторы схем, являются коллекцией программируемых логических элементов, таких как PLA (programmable logic arrays, программируемые логические матрицы), которые можно компоновать так, чтобы представлять практически любой вид логической схемы. Эти эмуляторы выпускаются серийно в качестве стандартной продукции несколькими компаниями EDA (electronic design automation, автоматизация проектирования электроники). Результирующая аппаратная эмуляция цепи может функционировать существенно быстрее, чем программная модель, иногда доходя до 1/100 от фактического конечного быстродействия. Благодаря этой увеличенной скорости проверка схемы может быть выполнена существенно быстрее.

В некоторых случаях эмуляции используются как замена фактической цепи, чтобы проверить, что созданное для работы со схемой программное обеспечение не содержит ошибок, прежде чем проводить работу с конечными аппаратными средствами. Эта методика широко используется в проектировании сложных интегральных схем, таких как микропроцессоры и заказные БИС. Фактически микропроцессор Intel Pentium и его операционная система были полностью эмулированы и успешно работали на большом аппаратном эмуляторе до изготовления образца первой производственной партии.

Применение технологии эмуляции устранило необходимость итеративного проектирования или изменения конструкций по мере обнаружения ошибок, сохраняя значительные средства на разработку, а также требуемое на эти операции время. В некоторых случаях это делает схемы реализуемыми. Например, большинство суперкомпьютеров и другая современная продукция конструируются с применением многослойных керамических печатных плат и многокристальных модулей на их основе. Эти технологии компоновки не позволяют вносить какие-либо изменения с помощью внешней проводки для устранения ошибок. В результате необходимо изготавливать полностью новую сборку для устранения ошибок проектирования. То же самое справедливо и в отношении интегральных схем в системе.

Анализаторы схем

Анализаторы схем — это средства проверки, которые нужны для подтверждения, что схемы будут функционировать надлежащим образом в диапазоне временных вариаций и допусках на характеристики компонентов, с которыми можно столкнуться в обычном процессе производства. Проверка выполняется с помощью разработки математических моделей каждой из схем, а затем варьированием параметров каждого из компонентов в пределах ожидаемых допустимых значений этих вариаций. Поведение схемы рассчитывается с помощью ее

модели, а результат сравнивается с предварительно установленными предельными значениями. Нарушения — тревожный знак для инженера-проектировщика. Среди всех проверяемых условий есть условие отсутствия чрезмерных наводок от соседних цепей и условие, что переходной режим, подобный отражениям, выбросам на заднем и переднем фронтах импульса, а также «звон» находятся в надлежащих пределах. Этот тип анализа часто называют допуском наихудшего и временным. Его можно проводить до начала физической трассировки, а также после ее завершения.

Примеры анализаторов схем — программа моделирования с ориентацией на интегральные схемы (SPICE) и ее аналог для персональных компьютеров (PSPICE). SPICE и PSPICE создают математические модели каждой из схем, а затем выполняют тысячи сложных расчетов для прогнозирования того, как схема будет откликаться на входные сигналы. Большинство поставщиков систем CAD также предлагают собственные адаптации этих аналитических инструментов.

Прогнозирование волнового сопротивления

Средства, используемые для проверки поперечных сечений, размеров трасс и свойств материалов печатной платы, предназначены для того, чтобы результирующее волновое сопротивление линии связи находилось в допустимых пределах, или для итеративной настройки этих параметров для достижения требуемого конечного значения волнового сопротивления. Этот шаг важен при конструировании печатной платы как таковой. Большинство поставщиков систем CAD, предназначенных для быстродействующих конструкций, предлагают некоторую разновидность средств оперативного анализа волнового сопротивления в составе этих систем.

Средства CAD

Средства автоматизированного проектирования (computer-aided design, CAD) применяются для преобразования электрической цепи, описанной принципиальной схемой, в физическую компоновку связей или печатную плату. Средствами проектирования CAD обычно управляет специалист по проектированию ПП, который имеет опыт в области производства и сборки плат, а не инженер-электротехник. Эти средства обеспечиваются таблицами соединений, перечнями компонентов, правилами трассировки и другой информацией размещения с помощью систем ввода этих описаний или средствами САЕ. В своем простейшем виде они позволяют проектировщику создавать схемы контактных площадок для выводов компонентов и форму печатной платы, а затем вручную соединять выводы компонентов медными трассами.

Наиболее изощренные средства CAD в состоянии автоматически определять оптимальное положение каждого компонента печатной платы (авторазмещение) и затем автоматически соединять (автотрассировка) все выводы, соблюдая при этом правила компоновки с сохранением быстродействия. Завершается этот процесс с помощью свода правил, определяющих, какие компоненты должны быть размещены в группах или вблизи разъемов, а также какое пространство нужно обеспечить между соседними трассами и какова максимально допустимая длина между точками на схеме и т. п.

Выходными данными программных средств проектирования CAD являются информационные файлы, которые необходимы для производства, сборки и тестирования печатной платы. К этим файлам относятся тестовые таблицы соединений, файлы для фотоплоттера, ведомости материалов, файлы по монтажу и сборочные чертежи. Средства CAD состоят из программы трассировки схем, установки компонентов, средств тестирования и средств создания выходных файлов.

Средства размещения компонентов

Они используются для установки компонентов на рабочем поле печатной платы. Средства размещения обычно являются составной частью полной системы CAD, а не модулем, приобретаемым отдельно. К входным данным средств размещения относятся:

- Список компонентов или ведомость материалов.
- Список соединений в схеме или способ соединения компонентов друг с другом.
- Формы, размеры и пространственная расстановка выводов компонентов.

- Форма печатной платы с указанием областей, где компоненты размещаться не могут (свободные зоны).
- Инструкции по фиксированному расположению компонентов, таких как разъемы.
- Правила электрических соединений, такие как максимальное и минимальное расстояние между точками цепи.
- Правила теплового режима, указывающие, какие части следует держать в стороне или вблизи от источников потока воздуха.

Средства размещения варьируются от полностью ручного режима до полностью автоматизированных. Все их разновидности имеют некоторую форму графической обратной связи с проектировщиком, что позволяет оценивать качество размещения в терминах возможности трассировки или соединения в требуемом числе слоев сигнальной разводки. Большинство из них используют правила размещения, что обеспечивает достаточное пространство между компонентами для успешной сборки, наладки и тестирования.

Трассировщики

Трассировщики являются частью системы CAD; они осуществляют физические соединения между компонентами, как это определено списками межсоединений. Трассировщик работает по спискам соединений печатной платы, после того как был завершен шаг по размещению компонентов. Трассировщики варьируются от функционирующих полностью в ручном режиме, в которых проектировщик определяет, где будут размещены трассы, с помощью графического дисплея с мышью или светового пера, до полностью автоматизированных, в которых специализированная программа берет список соединений и, используя правила размещения и правила создания пространств между компонентами, а также правила трассировки, принимает все решения, необходимые для полного соединения всех компонентов между собой.

Основное преимущество ручной трассировки в том, что проектировщик может подогнать каждое соединение по своему вкусу. Основной недостаток — в том, что она выполняется достаточно медленно, иногда разработчик затрачивает несколько минут для полной трассировки и проверки одной цепи. Автоматизированные трассировщики делают эту работу быстро. Однако возможность детального контроля формы каждой цепи ограничена способностью автотрассировщика следовать правилам трассировки соединений. Некоторые современные автотрассировщики в состоянии согласовывать трассировку с очень сложными правилами.

Существенная проблема автотрассировщиков заключается в том, что они не в состоянии найти способ успешной трассировки всех проводников. Когда такое происходит, проектировщик должен добавить больше места для проводников за счет дополнительных слоев или попытаться завершить трассировку в ручном режиме. Важной функцией хорошего автотрассировщика является вариант дотрассировки в ручном режиме, поскольку это существенно влияет на упрощение выполнения этой финальной операции, которая бывает часто необходима для завершения трассировки. Почти все трассировщики имеют комплект средств проверки, и это гарантирует, что окончательная трассировка согласуется со списком соединений и что все правила по резервированию свободного пространства между компонентами были соблюдены.

Программы трассировки поставляются в нескольких видах и могут быть приобретены в составе системы CAD или в качестве модулей, которые добавляются в системы CAD. Рассмотрим некоторые типы программ трассировки.

Трассировщик с сеткой

Этот тип трассировщика размещает проводники на предварительно заданной координатной сетке. Все рабочее поле, предназначенное под разводку, делится на регулярную сетку, которая обеспечивает должный зазор между проводниками, когда проводники проходят по каждой из линий сетки. Это первый вариант программы, предлагаемой в случае применения как автоматизированного, так и ручного трассировщика, который поступает с системой CAD.

Основные недостатки трассировщиков с координатной сеткой:

- сложность управления более чем одним шагом трасс без потери в плотности прокладки;

- необходимость задания конечных точек цепей, которые должны быть на сетке трасс для их успешного соединения.

Соединения компонентов вне координатной сетки обычно необходимо выполнять вручную и проверять аналогичным образом.

Трассировщик без сетки

Расположение проводников в этой разновидности программы трассировки не зависит от координатной сетки. Вместо нее программа размещает как можно больше проводников в имеющемся пространстве при соблюдении правил резервирования свободных промежутков, устанавливаемых инженером-конструктором для обеспечения надлежащих электрических характеристик при оптимизации технологичности процесса изготовления. Эта разновидность программы трассировки может легко обрабатывать трассы разной ширины, располагающиеся на одном слое. После выполнения трассировки программа делит любое оставшееся неиспользованное пространство на равные части.

Преимущество этого метода состоит в возможности оптимизации технологичности процесса изготовления за счет поддержания как можно больших промежутков между компонентами. Однако обычно она зависит от данного слоя разводки, который предполагает ортогональную систему размещения проводников (либо горизонтально, либо вертикально). А это является существенным недостатком при использовании технологии SMT, где компоненты не нуждаются в сквозных отверстиях, и требует очень мощную программу трассировки для регулярной матрицы очень большого числа штырьковых выводов элементов, таких как CPU или многопроцессорная система с массой выводов.

Эта разновидность трассировщиков является «рабочей лошадкой» цифровых конструкций очень высокой сложности, в которых немало регулярности и требуется реализовать прогнозируемые шаги и длину трасс из соображений быстродействия и производительности.

Трассировка с учетом формы

Этот тип трассировщика распознает формы уже установленных на монтажной поверхности элементов и прокладывает проводники в обход. Свободное пространство между проводниками и другими объектами, такими как сквозные отверстия, используемые для перехода на другой слой, и контактные площадки, сохраняется как трассировочное. Этот тип трассировщика необходим при конструировании плат на основе SMT.

Средства проверки

С помощью этих инструментов выполняется проверка соответствия трассировки печатной платы правилам резервирования свободного пространства между трассами и между отверстиями и трассами путем сравнения фактических промежутков с теми, которые установлены правилами конструктора плат. Они также гарантируют, что все цепи полностью подсоединены и не соединены с объектами, с которыми соединять их не следует (другие цепи и механические элементы на печатной плате), после сравнения результатов трассировки с данными, которые поставляются системой CAD. Некоторые средства проверки также выполняют проверку соблюдения правил прокладки линии связи. Комплект средств проверки обычно входит в систему CAD.

Генераторы выходных файлов

После трассировки печатной платы и проверки точности всех соединений система CAD удерживает эту информацию в нейтральной форме, которая определяется используемой операционной системой. Для того чтобы эти данные оказались пригодными для использования, их следует преобразовать в формат, соответствующий интерфейсу технологического оборудования, такого как фотоплоттеры, сверлильные станки, тестеры, монтажное оборудование и т. д. Процедуры, генерирующие выходные файлы, выполняют это преобразование. Большинство систем CAD оснащены ограниченным набором этих процедур при поставке. Дополнительные генераторы или преобразователи следует заказывать.

Средства САМ

Средства автоматизированной подготовки производства (computer-aided manufacturing, САМ) относятся к системам CAD, которые применяют в интересах процесса изготовления. Результатом процесса проектирования печатной платы является набор файлов CAD, которые

описывают каждый рисунок слоя ПП, требования к фотошаблону и сверлению отверстий, а также информация в виде таблицы соединений. Эту информацию можно изменить, но так, чтобы это не могло изменить конструкцию печатной платы. Например, если производителю потребуется создать несколько копий печатной платы на одной заготовке, то ему нужно добавить специализированные технологические элементы на заготовку или изменить ширину трасс, чтобы компенсировать подтравливание проводников. Первоначально эти операции выполняли вручную с большой вероятностью ошибки и существенными затратами на выполнение такой работы. Станции САМ или набор соответствующих средств позволяют производителю выполнить все эти операции автоматически и достаточно быстро.

Станции САМ могут проверить фотошаблоны на соответствие правилам резервирования свободного пространства, правилам отделения платы от заготовки и правилам выполнения соединений и при необходимости вносить корректировки. Они же могут синтезировать списки соединений (способ соединения точек в конструкции) из данных Gerber для контроля платы до монтажа в тех случаях, когда заказчиком не был предоставлен такой список. Если заказчик предоставил такой список, то синтезируемый список соединений по данным Gerber можно будет сравнить со списком соединений, создаваемым САД в качестве окончательного способа подтверждения того, что фотошаблон действительно соответствует принципиальной схеме. Это еще одна мера предосторожности от искажения данных.

Входные данные для процесса проектирования

Библиотеки

Каждый из инструментов САЕ и САД пользуется наборами библиотек, содержащих информацию, описывающую каждый из компонентов, которым можно пользоваться при проектировании. Эти описания варьируются от простого описания физической конфигурации посадочных мест до полной логической модели, которую можно использовать в имитаторе. Обычно библиотеки не поставляются как часть системы. Их следует приобретать отдельно или разрабатывать по одной части одновременно усилиями пользователей. Библиотеки в работоспособных системах могут быть достаточно большими, и чтобы их разработать, нужно много времени. К сожалению, библиотеки зачастую уникальны для данного инструмента, и новый выбранный инструмент не может их легко заимствовать.

Формы посадочных мест и физические характеристики

Самая фундаментальная из библиотек, используемых системой САД, описывает физические характеристики любой детали так, что это позволяет системе САД создавать для нее расположения монтажных отверстий и контактных площадок, а также контур трафаретной формы и рисунок паяльной маски. Запись в такой библиотеке будет содержать посадочное место, которое описывает, например, какой величины должны быть отверстия для выводов компонента и форму контактных площадок для каждого типа слоя печатной платы.

Например, контактная площадка внешнего слоя должна быть достаточно большой, чтобы вмещать кольцевой ободок нужного размера, а перфорация в фольге должна находиться в плоскости слоя питания,

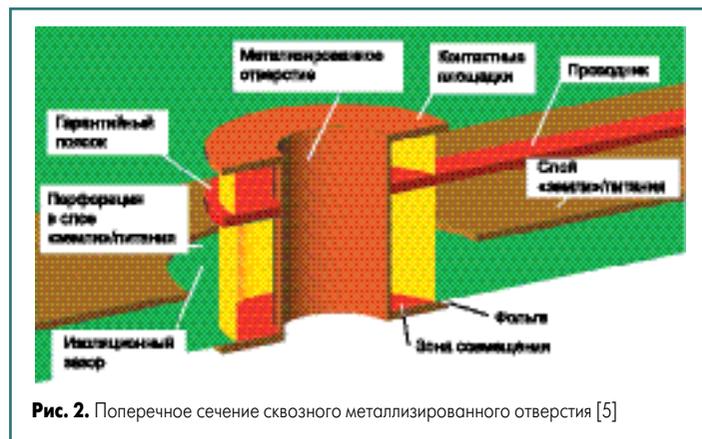


Рис. 2. Поперечное сечение сквозного металлизированного отверстия [5]

так, чтобы исключить касание цилиндром металлизированного сквозного отверстия плоскости слоя. Или нужно будет использовать тепловую площадку и выполнить соединение с плоскостью питания таким способом, который дал бы возможность применить надежную пайку (рис. 2). Эти записи в библиотеке могут содержать индивидуальные номера деталей, используемые компанией для создания ведомости материалов, и в этом случае система САD будет в состоянии создать ведомость материалов в форме, готовой к употреблению.

Некоторые библиотеки с физическими характеристиками содержат информацию о функции вывода, то есть является ли вывод контактом для ввода/вывода или предназначен для питания. Эти данные используются программой, выполняющей проверку, чтобы убедиться, что точки в цепи расположены в нужном порядке для обеспечения быстродействия или что цепь использует правильные функции выводов.

Функциональные модели

Инструменты САЕ, которые имитируют функционирование печатной платы, нуждаются в библиотеке моделей, которая бы описывала, как каждая часть работает логически. Эти модели называют функциональными. Такие модели не содержат информации о задержках в линиях связи или времени нарастания импульса, необходимом для подтверждения, что выполняются правила по времени. Функциональные модели часто применяют для настройки эмуляторов.

Имитационные модели

Имитационные модели являются расширенными версиями функциональных моделей. Они содержат всю функциональную информацию, а также подробные сведения о задержке в линии связи при прохождении той или иной ее части и времени установления и времени затухания. Их используют, чтобы убедиться, что наилучший вариант условия по времени не выводит конструкцию из надлежащего режима функционирования.

Характеристики печатной платы

Один из наборов данных, требуемых системой физического размещения, является описанием печатной платы или ее физических характеристик. Он включает в себя размер, число и тип слоев, толщину изолирующих слоев, толщину медной фольги и области, свободные от деталей и трасс.

Правила ширины проводников и зазоров

Для соответствия правилам производства и формирования линии связи ширина проводников и зазоров для каждого слоя должна быть введена в систему САD. Обычно это делается в виде таблицы.

Перечни соединений

Эти перечни описывают в системе САD, каким образом выводы одного компонента соединяются с выводами другого компонента. Системы, которые управляют трассировкой

или размещением согласно правилам проектирования систем с высоким быстродействием, используют списки соединений. Эти списки содержат инструкции о том, как формировать каждую цепь, то есть какое использовать волновое сопротивление, какие резервировать промежутки до соседних цепей и потребуются ли согласующие сопротивления или специальный порядок размещения.

Перечни деталей

Перечни деталей сообщают системе САD, какой тип библиотечной записи соответствует каждой детали конструкции.

Оформление конструкторской документации

Вся конструкторская документация должна быть выполнена в соответствии с ЕСКД (сборочный чертеж и спецификация). При разработке КД необходимо выполнять требования СТ4.42.02-93 п. п. 9.4–9.7 (схема нанесения точек клея, направления пайки, таблица координат центров компонентов...). Толщина припоя на контактных площадках для SMD-компонентов должна составлять 8–25 мкм.

Спецификация должна содержать следующую информацию:

- наименование компонента (детали, материала);
- номинал;
- допуск;
- тип корпуса;
- позиционное обозначение;
- количество;
- номер чертежа деталей;
- вариант исполнения.

Сборочный чертеж обязательно должен содержать: виды, сечения, разрезы и размеры, необходимые для изготовления электронного модуля, технические требования к установке и монтажу компонентов с указанием необходимых стандартов, применяемые материалы, варианты установки компонентов, выноски на нестандартную установку компонентов, номера позиций деталей и т. п.

Графическое изображение каждого из типов корпусов SMD-компонентов и других ЭРЭ на сборочном чертеже должно быть единым для всех изделий предприятия-разработчика. Изображение должно быть четким, понятным и максимально приближенным к конфигурации реального корпуса. Обозначение полярности (ключа) должно быть однозначным и соответствовать реальному виду (точка, скол, выступ и т. д.).

На сайтах производителей печатных плат и электронных модулей, как правило, размещаются подробные инструкции, отражающие индивидуальные требования к конструкциям и подготовке файлов, которые необходимо учитывать для предотвращения конфликтов [6].

Заключение

Конечно, после прочтения этой статьи читатель не научится сразу процессам проектирования, но он хотя бы проникнется уважением к этому виду творчества и, если захочет, нач-

нет вникать в подробности этих процессов. Здесь, как и везде, есть разделение при создании новых продуктов: от идеи рыночной востребованности к ее технической реализации на разных стадиях проектирования и производства. В свою очередь, в проектировании тоже имеется разделение труда при разработке схемотехнических решений, конструировании и адаптации проектов к реальным условиям производства. И наконец, всегда востребованы высокопрофессиональные технологи — при обновлении технологий и организации производства вслед за потребностями развивающейся электроники.

Литература

1. www.pcbtech.ru
2. Прилипко К. Семинар «Проектирование многослойных печатных плат высокой плотности // Производство электроники. 2008. № 8.
3. Медведев А. Перспективные технологии и материалы для разработчиков многослойных печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 1.
4. Печатные платы: Справочник / Под ред. К. Ф. Кумбза (мл.). Пер. с англ. Под ред. А. Медведева. В 2 книгах. Кн. 1. М.: Техносфера, 2011.
5. Медведев А., Арсентьев С. Анатомия сквозного металлизированного отверстия // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 5.
6. Медведев А., Мылов Г. Печатные платы. Требования для поверхностного монтажа // Компоненты и технологии. 2007. № 10.