

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиоэлектронных средств

В. И. Журавлёв, В. С. Колбун, Н. А. Смирнова

Тепловой анализ печатных плат в Mentor HyperLynx Thermal

Методические указания к лабораторным работам
по дисциплине «Моделирование и компьютерный анализ РЭС»
для студентов специальности 1-39 02 01
«Моделирование и компьютерное проектирование
радиоэлектронных средств»

Минск БГУИР 2009

УДК 621.396.6:004.42(076)
ББК 32.844+32.973.26-018.2я73
Ж91

Рецензент:

доцент кафедры электронной техники и технологии
учреждения образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»,
кандидат технических наук В. М. Бондарик

Журавлёв, В. И.

Ж91 Тепловой анализ печатных плат в Mentor HyperLynx Thermal : метод. указания к лаб. работам по дисц. «Моделирование и компьютерный анализ РЭС» для студ. спец. 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств» / В. И. Журавлёв, В. С. Колбун, Н. А. Смирнова. – Минск : БГУИР, 2009. – 28 с. : ил.
ISBN 978-985-488-496-7

Рассматривается порядок подготовки и проведения теплового анализа печатных плат в программе HyperLynx Thermal, позволяющей оценить нагрев компонентов, распределение температуры и градиента температуры на плате для оптимальной компоновки печатного узла и выбора средств для его охлаждения.

УДК 621.396.6:004.42(076)
ББК 32.844+32.973.26-018.2я73

ISBN 978-985-488-496-7

© Журавлёв В. И., Колбун В. С., Смирнова Н. А., 2009
© УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВЫ РАБОТЫ В HYPERLYNX THERMAL.....	5
1.1. Назначение и возможности программы	5
1.2. Интерфейс программы	6
1.3. Необходимые понятия теплового моделирования	8
2. ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ПП К МОДЕЛИРОВАНИЮ	10
2.1. Создание и редактирование свойств ПП.....	10
2.2. Задание свойств локальных областей.....	11
2.3. Размещение компонентов на ПП и редактирование их свойств.....	13
2.3.1. Управление библиотеками	13
2.3.2. Размещение ЭРЭ на ПП.....	16
2.3.3. Импорт данных о размещении компонентов ПП.....	19
2.3.4. Импорт теплофизических данных компонентов.....	20
2.4. Размещение теплоотводов на ПП	20
2.5. Размещение винтов на ПП	22
2.6. Размещение тепловых трубок на ПП.....	23
2.7. Размещение тепловыделяющих проводников на ПП.....	24
2.8. Редактирование расположения и характеристик компонентов на ПП	24
2.9. Задание краевых условий теплопереноса.....	24
2.10. Рабочие файлы и сохранение проекта.....	26
3. ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА И ПРОСМОТР РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	26
ЛИТЕРАТУРА.....	28

ВВЕДЕНИЕ

Содержимое данного пособия создано на основе руководства пользователя «HyperLynx[®] Thermal», которое является собственностью компании Mentor Graphics[®] Corporation. Торговая марка HyperLynx, а также программное обеспечение HyperLynx Thermal во всех его вариантах, графические изображения, логотипы, наименования услуг и домен компании Mentor, указанные в данном пособии, являются собственностью компании Mentor Graphics Corporation и защищены международными законами об авторском праве и смежных правах. Они не могут быть ни коим образом использованы в сочетании с любыми товарами или услугами, не предоставляемыми компанией Mentor Graphics, с целью ввести потребителей в заблуждение, опорочить либо иным образом скомпрометировать компанию Mentor Graphics. Все остальные торговые марки, не принадлежащие компании Mentor Graphics, упомянутые в данном пособии, являются собственностью соответствующих владельцев, которые могут или не могут вступать в партнерские отношения с компанией Mentor Graphics или её компаньонами, быть связанными с ними либо финансироваться ими.

Зарегистрированные торговые марки, указанные в данном пособии, которые являются собственностью компании Mentor Graphics Corporation:

Mentor Graphics[®], BoardStation[®], HyperLynx[®], PADS[®], PCB Expedition[®].

В процессе разработки конструкций радиоэлектронных средств (РЭС) постоянно возникает задача расчёта и анализа тепловыделения, на основании которого производится выбор конструктивных решений при проектировании надёжных систем. В современных условиях многие предприятия не в состоянии «содержать» специальные подразделения для проведения таких расчётов, выполнять их приходится разработчику, не имеющему специальной подготовки в области теплопередачи.

Особенностью электронной аппаратуры является тесная взаимосвязь конструктивных (массогабаритных), электрических и теплофизических параметров. Поэтому оптимизация проектируемого изделия, как правило, ведётся по многим показателям и с учётом предусмотренных ограничений по каждому из них. В результате при моделировании процессов теплообмена электронных узлов в современных САПР предусмотрен обмен данными с подсистемами проектирования топологии, оценки надёжности и т. д. Иными словами, тепловое моделирование следует рассматривать как составную часть процесса проектирования, причём качество проекта и затраченное время во многом определяются методикой или маршрутом проектирования – последовательностью различных этапов синтеза, верификации и моделирования.

Современные РЭС характеризуются не только сложными алгоритмами работы, но и сложной физической реализацией. С точки зрения теплового анализа картина представляется следующей: с одной стороны, плотность монтажа и выделяемые мощности растут, а с другой, – повышается чувствительность эле-

ментной базы к температуре. В этой ситуации всё сложнее оптимально компоновать элементы на печатной плате (ПП) и обеспечивать надёжность конструкции.

Существенную помощь в анализе тепловых процессов печатной платы РЭС может оказать специализированное программное обеспечение, позволяющее провести необходимые расчёты и доступное для работы инженеру-конструктору. На практике при проведении теплового моделирования часто используются численные методы, основанные на методах конечных разностей с адаптивными сетками, которые генерируют адаптивные местные сетки для того, чтобы не допускать снижения точности на мелких деталях проекта, не попадающих в основную сетку платы. Преимущество расчёта по конечно-элементной схеме – повышенное быстродействие анализа при высокой точности.

Программный продукт HyperLynx Thermal предлагает принципиально новый подход к проектированию и тепловому анализу РЭС, суть которого заключается в том, что два процесса идут практически параллельно: как только установлены высокочувствительные к температуре электрорадиоэлементы (ЭРЭ) или компоненты с высоким приоритетом можно начать тепловое моделирование, которое может работать в связке с пакетом проектирования ПП. Такой подход значительно повышает эффективность проектирования РЭС и позволяет разработчику выбрать наилучший вариант конструкции.

Алгоритмы HyperLynx Thermal позволяют достигнуть быстродействия приблизительно в 50 раз выше, чем традиционные конечно-элементные алгоритмы. Моделируются процессы теплообмена, теплопроводности, конвекции и излучения. Особое внимание уделено моделированию воздушной конвекции с учётом трёхмерного расположения компонентов на плате.

Несомненным преимуществом программы HyperLynx Thermal является наличие специального конвертера, обеспечивающего интерфейс с САПР печатных плат различных производителей, что значительно сокращает время подготовки исходных данных для теплового анализа ПП.

1. ОСНОВЫ РАБОТЫ В HYPERLYNX THERMAL

1.1. Назначение и возможности программы

Пакет Mentor HyperLynx Thermal предназначен для оценочного расчёта тепловых режимов РЭС и включает в себя модули HyperLynx PCB Thermal Board, HyperLynx Thermal Trace и HyperLynx Thermal MCM. Пакет имеет следующие возможности:

- моделирование стационарного и нестационарного тепловых режимов комплексов, блоков, печатных плат и отдельных компонентов РЭС, включая ИС и СБИС;
- моделирование термического поведения многослойных ПП нерегулярной формы;
- оценка температуры корпусов компонентов ПП, *pn*-переходов и переходов «нагретая зона – корпус ЭРЭ»;

- одновременный анализ до 3000 компонентов, размещённых на каждой из сторон ПП в корпусах DIP, BGA, SMD, PDIP, CLCC, CLDCC, PCC, QFP, SO, PGA, PPGA, CPGA, PQFP, TO в полном соответствии с международными стандартами JEDEC и IPC;

- вывод результатов в виде цветовой карты температуры и градиента температур, а также вывод численных значений рассчитанных температур в табличной форме;

- высокая точность моделирования, обусловленная частным решением более 50 уравнений теплопереноса, учитывающих трёхмерное распределение тепла на основе 3D-граничных условий для ПП нерегулярной формы;

- встроенный интерфейс импорта из наиболее распространенных систем САПР ПП: Mentor (PADS, PCB Expedition, BoardStation), Altium® P-CAD, Designer; Cadence® (Allegro, OrCAD), Zuken® (CADSTAR, Visula), Protel и др.;

- возможность экспорта выходных данных в пакеты анализа надёжности;

- работа в различных ОС: Microsoft Windows® (NT, 95/98, 2000/XP), UNIX, DOS (консольная версия).

Дополнительные возможности программы:

- плата с помощью креплений различного типа может быть расположена в любом месте открытого или закрытого корпуса, при этом учитывается отвод тепла через крепёжные устройства и специальные радиаторы, а также наличие естественной и принудительной вентиляции.

- возможно моделирование с учётом гравитации, атмосферного давления и направления воздушного потока;

- к различным элементам системы могут быть подключены различные теплоотводы (радиаторы), тепловые трубы, охлаждающие вентиляторы и просто металлизированные контактные площадки;

- удачное сочетание простого интуитивного пользовательского интерфейса на основе командного меню и мощного вычислительного ядра;

- встроенные и пополняемые пользователем библиотеки, которые содержат информацию о более чем 2500 полностью описанных ЭРЭ, а также теплофизические данные по основным материалам, используемым при конструировании ПЭС.

1.2. Интерфейс программы

Пользовательский интерфейс программы несложен, характерен для обычных приложений MS Windows и включает в себя меню, панель инструментов, рабочее поле и статусную строку (рис. 1). После выполнения моделирования соответствие цветových уровней числовым значениям отображаются в левой части главного окна.

Статусная строка. В левой части статусной строки отображается информация о выполняемой команде, а также даются указания по её выполнению. В правой части статусной строки показывается информация о текущем положе-

нии указателя мыши, количестве установленных ЭРЭ на ПП и суммарной рассеиваемой мощности ЭРЭ.

Инструменты отображения. Режимы просмотра элементов, располагаемых в рабочем поле, находятся в меню **View**, а также на панели инструментов:

(View – Reset) – первоначальный режим просмотра (по умолчанию);

(Zoom in) – увеличивает масштаб. Детализация отображения определяется прямоугольной областью, задаваемой очерчиванием левой кнопкой мыши;

(Zoom out) – уменьшает масштаб посредством задания прямоугольной области;

(View – Rotate) – вращение ПП с компонентами;

(View – side/layer) – выбор отображаемой стороны (слоя) ПП;

(Show component reference designator) – отображение обозначений компонентов;

(View computational grid) – отображение расчётной сетки.

В случае искажения отображения элементов рабочего поля воспользуйтесь командой меню **View – Redraw**.

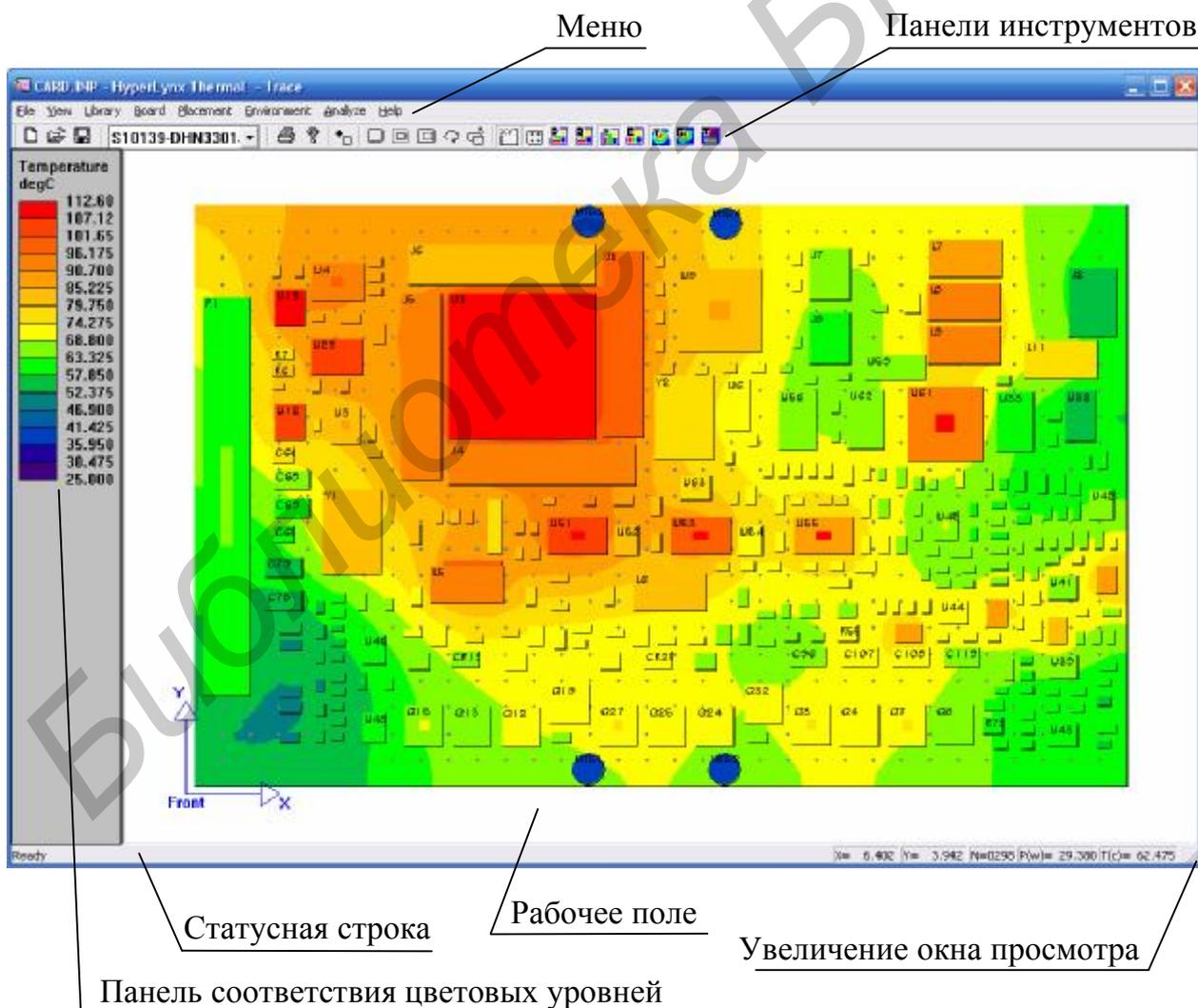


Рис. 1. Интерфейс программы

1.3. Необходимые понятия теплового моделирования

Мощность ЭРЭ – рассеиваемая мощность ЭРЭ, установленного на ПП. При расчётах необходимо учитывать коэффициент электрической нагрузки ЭРЭ при работе устройства. При этом рассеиваемая мощность ЭРЭ может не являться постоянной величиной. В таком случае часто производят расчёты для максимальной рассеиваемой мощности при заданном коэффициенте нагрузки ЭРЭ.

Температура нагрева ЭРЭ – температура корпуса ЭРЭ.

Температура нагретой зоны ЭРЭ – температура наиболее нагретой части конструкции ЭРЭ. Например, для транзисторов часто это *pn*-переход, для ИС – температура кристалла.

Предельная температура нагрева ЭРЭ – максимальная температура нагрева ЭРЭ, при которой гарантируется выполнение ЭРЭ своих функций. Интенсивность отказов компонентов в основном имеет экспоненциальную зависимость от температур переходов и определяется используемой технологией изготовления интегральных схем. Следовательно, различные типы компонентов имеют различные предельно допустимые температуры. HyperLynx Thermal позволяет индивидуально задавать предельные температуры для различных элементов и отображать на экране с помощью цвета разницу между только что рассчитанной температурой корпуса и этим пределом.

Перегрев ЭРЭ – разность между текущей и допустимой температурой ЭРЭ. Наличие перегрева не всегда приводит к его катастрофическому отказу ЭРЭ, но, как правило, вызывает ухудшение качества его функционирования. Перегрев может быть кратковременным и постоянным. Кратковременный перегрев возникает достаточно часто, однако трудно поддаётся моделированию и ведёт к деградации характеристик ЭРЭ и нарушению работоспособности всего устройства в целом.

Градиент температуры – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры по этому направлению. Другими словами, численно это перепад температур на участке ПП. Наличие высокого температурного градиента может вызвать тепловой удар, обусловленный большой разницей в условиях температурного расширения различных участков платы. Наличие таких областей при многократном циклическом нагревании и охлаждении ведёт к разрушению как самой платы, так и расположенных на ней элементов. Нередки случаи, когда при отсутствии перегревов ЭРЭ происходят повреждения материала ПП и обрывы металлизации вследствие возникновения областей больших локальных градиентов температур в ПП. HyperLynx Thermal позволяет своевременно прогнозировать наличие этих областей и принимать меры по их устранению.

Тепловое сопротивление – способность тела (его поверхности или какого-либо слоя) препятствовать распространению теплового движения молекул. Тепловое сопротивление в $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ означает, что прибор становится теплее на

1 °C с повышением мощности на 1 Вт. Чем меньше тепловое сопротивление, тем лучше с точки зрения отвода тепла. При выполнении теплового моделирования важно верно задать значение теплового сопротивления компонентов, так как оно играет большую роль в иницировании перегревов ЭРЭ и возникновении значительных градиентов температуры.

В HyperLynx Thermal чаще используется частный параметр **тепловое сопротивление «переход – корпус» (THERAJc)**. Для большинства ЭРЭ это тепловое сопротивление между нагретой зоной ЭРЭ и его корпусом, измеряемое в единицах °C/Вт. Для ИС это тепловое сопротивление между кристаллом и корпусом микросхемы.

Условные слои. В HyperLynx Thermal вся ПП условно разделяется на три слоя, толщина которых задаётся по оси OZ. Эти слои, как правило, не связаны непосредственно с электрическими характеристиками ПП, а определяются способностью проводить тепло и наличием на них тепловыделяющих или теплопроводящих элементов.

Для обычных ПП, не содержащих сплошного металлического слоя, достаточно задать толщину одного физического слоя, при этом толщины 2-го и 3-го слоёв могут быть установлены в ноль. При этом первый слой является определяющим. Это связано с тем, что градиент температуры по оси OZ ПП практически не превышает 1 – 2 °C. Например, если используется обычная двусторонняя ПП, то толщина первого (определяющего) слоя равна суммарной толщине диэлектрика и слоёв металлизации. При необходимости разработчик может дополнительно указать большие локальные участки металлизации внутри контура ПП через меню локальных свойств ПП.

Если ПП имеет сплошной слой металлизации, металлическое основание, общий теплоотвод с другой ПП или крепится к шасси (корпусу) специальной теплоотводящей внутренней конструкцией, то необходимо задать толщину всех трёх слоёв. При этом слои 1 и 3 соответствуют диэлектрическому основанию плат, а слой 2 задаёт слой, значительно отличающийся своими теплопроводящими характеристиками от слоёв 1 и 3. Если используется четырёхслойная ПП с внутренними сплошными слоями металлизации цепей питания, то 1 и 3 слои будут соответствовать внешним слоям трассировки ПП, а 2-й слой целесообразно представить как сумму толщин металла слоёв питания.

Следует отметить, что данное деление на слои является условным, и пользователь может гибко варьировать параметрами слоёв в зависимости от решаемых задач.

Массовая доля металла (MVF) – объёмная доля металлизации ПП. Данная величина существенно влияет на результат расчёта температур вследствие учёта механизма теплопроводности проводников ПП. Для обычных ПП, не содержащих отдельных областей сплошной металлизации и тепловых переходных отверстий, эта величина составляет 1 – 3 % для всей ПП. Более точную информацию можно узнать из выходных данных САПР трассировки.

2. ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ПП К МОДЕЛИРОВАНИЮ

2.1. Создание и редактирование свойств ПП

Загрузите Mentor HyperLynx Thermal. Создайте новый проект с помощью команды меню **File – New** (Файл – Новый). Установите единицы измерения СИ в меню **File – Unit** (Файл – Единицы измерения).

Укажите ориентацию ПП в пространстве. Для этого вызовите меню **View – Side** (Вид – Сторона) и выберите один из вариантов ориентации ПП: **Front side** (Верхняя сторона) или **Back** (Нижняя сторона).

Вызовите окно задания свойств ПП через меню **Board – Property** (Плата – Свойства) или через её контекстное меню в рабочем поле (рис. 2). Введите следующие параметры ПП:

Xmax – длина ПП в миллиметрах.

Ymax – ширина ПП в миллиметрах.

Thickness of layer – толщина условного слоя в миллиметрах.

Conductivity non-metal, layers 1 and 3 – удельная электрическая проводимость неметалла для слоёв 1 и 3. В данном поле необходимо задать электропроводность диэлектрического материала ПП. При этом можно выбрать материал, нажав кнопку Specify conductivity by select material. В данном списке имеется стандартный стеклотекстолит FR-4.

Conductivity metal traces, layers 1 and 3 – удельная электрическая проводимость металлизации. В раскрывающемся списке можно выбрать наиболее часто используемые материалы: медь (Copper) и алюминий (Aluminum).

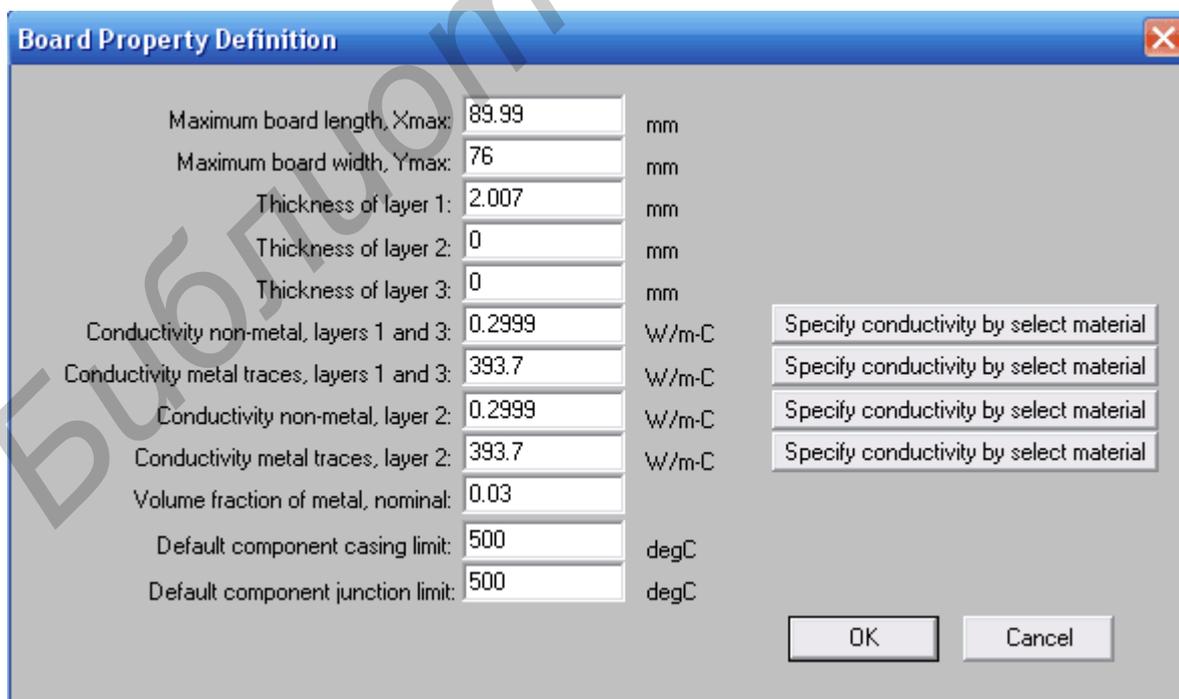


Рис. 2. Окно задания свойств ПП

Volume fraction of metal (MVF) – объёмная доля металлизации. В данное поле не следует включать значение MVF, обусловленное тепловыми переходными отверстиями и областями сплошной металлизации.

Default component casing limit – предельная температура корпуса ЭРЭ (по умолчанию). Это общее значение, устанавливаемое для ЭРЭ всей платы, используемое для определения перегрева некоторых ЭРЭ относительно какой-либо температуры. Реальный перегрев ЭРЭ, когда он подвергается риску теплового повреждения, определяется вводом значения предельной температуры в локальных свойствах каждого компонента ПП.

Default component junction limit – предельная температура нагретой зоны или *pn*-перехода ЭРЭ (по умолчанию).

2.2. Задание свойств локальных областей

Дополнительные свойства каждого из слоёв ПП можно также задать локально. Если на ПП имеются довольно большие области сплошной металлизации с тепловыми переходными отверстиями, то целесообразно установить объёмную долю металлизации отдельно для таких областей через меню локальных свойств. Для этого необходимо задать слой, на котором находится область металлизации в меню **View – Layer** (Вид – Слой). Затем выбрать меню **Board – Local Property** (Плата – Локальные свойства) и обозначить мышью прямоугольный контур области ПП, для которого нужно задать локальные свойства слоя (рис. 3). В этом окне можно ввести объёмную долю металлизации (MVF) и задать преимущественное направление проводников в этой области посредством задания соотношения проводимостей по осям X и Y в поле *Kx/Ky ratio of conductivity*.

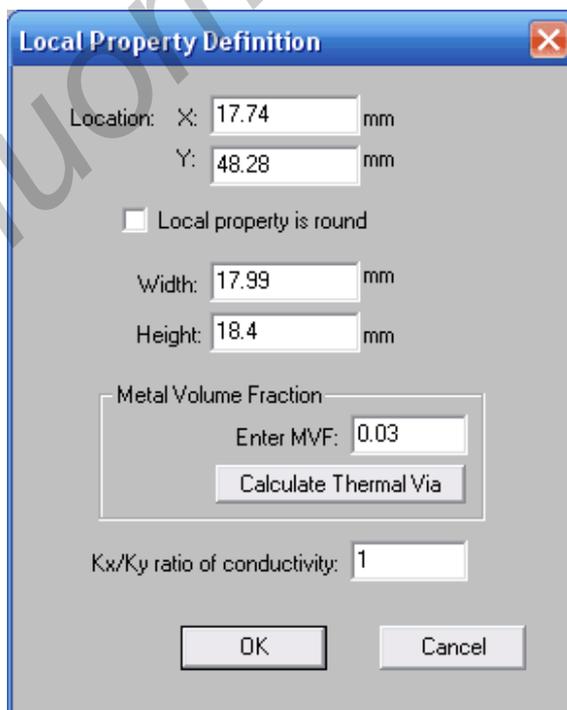


Рис. 3. Окно задания локальных свойств слоя ПП

Если в данной области имеются тепловые переходные отверстия, необходимо к объёмной доле металла локальной области добавить значение MVF, обусловленное наличием переходных отверстий. Для расчёта MVF переходных отверстий следует нажать кнопку **Calculate Thermal Via** и в окне **Thermal Via Calculator** ввести следующие параметры (рис. 4):

Total number of thermal via in this area – общее количество тепловых переходных отверстий в этой области.

Outside diameter of the via – внешний диаметр переходного отверстия.

Thickness of the plating near the outside diameter of via – толщина металлизации около внешнего диаметра переходного отверстия.

Thermal conductivity of the plating material – теплопроводность материала металлизации.

Thermal conductivity of the material filling the via holes – теплопроводность материала, заполняющего переходное отверстие.

Thermal Via Calculator

This calculator assumes that vias are distributed evenly over the present local area and run through the total thickness of this layer.

Width of area: 20 mm

Length of area: 20 mm

Thermal Conductivity of Metal in this Layer: 393.7 W/m-C

Total number of thermal via in this area: 6

Outside diameter of the via: 1.5 mm

Thickness of the plating near the outside diameter of via: 0.7 mm

Thermal conductivity of the plating material: 393.7 W/m-C Specify by select material

Thermal conductivity of the material filling the via holes: 393.7 W/m-C Specify by select material

Equivalent Metal Volume Fraction: 0.0265

Calculate

Exit

This is the contribution of thermal VIAs. Please add on the Metal Volume Fraction of the board (except the thermal vias) of this layer, then enter the total value manually into the local property dialog box.

Рис. 4. Окно задания локальных свойств слоя ПП

Для получения суммарного значения MVF переходных отверстий необходимо нажать кнопку **Calculate**. При расчёте предполагается, что переходные отверстия распределены равномерно по существующей локальной области и проходят через всю толщину слоя.

Изменение формы ПП. Для создания выреза в ПП вызовите команду **Cutout** (Вырез) в меню **Board** (Плата). Обозначьте мышью положение выреза. В появившемся окне можно более точно ввести положение (Location) и размеры

выреза (Width, Height) или установить его круглым (Cutout is round) с заданным диаметром.

Для скругления углов ПП используется команда **Board – Trim Corner** (Плата – Скруглённый угол).

Вырезы и скругления ПП можно удалить, выделив их и нажав кнопку **Delete** на клавиатуре.

2.3. Размещение компонентов на ПП и редактирование их свойств

На ПП в HyperLynxThermal могут быть размещены для дальнейшего анализа следующие компоненты: ЭРЭ, теплоотводы (радиаторы), винты (болты), теплопроводящие трубки. Каждый из этих элементов имеет набор задаваемых свойств, которые можно редактировать индивидуально.

2.3.1. Управление библиотеками

Для работы с библиотеками компонентов предназначено меню **Library** (Библиотека).

Команда **Library – Master** (Библиотека – Главная) вызывает для редактирования основную встроенную библиотеку компонентов программы (рис. 5), в которой можно как редактировать имеющиеся, так и создавать новые компоненты нажатием на следующие кнопки:

Add by parameters (Добавить по параметрам). Вызывает окно для добавления компонента в главную библиотеку указанием основных параметров компонента, таких, как размер, мощность, количество выводов и т. п.

Add by shape definition (Добавить по типоразмеру). Позволяет начать ввод компонента в главную библиотеку на основе уже описанного заранее типоразмера. Использование этой команды позволяет задать тепловое сопротивление «переход – корпус» (T_{HETAjс}) для компонента, у которого данное значение неизвестно. Для этого из списка типоразмеров выбирается наиболее подходящий типоразмер для нового компонента.

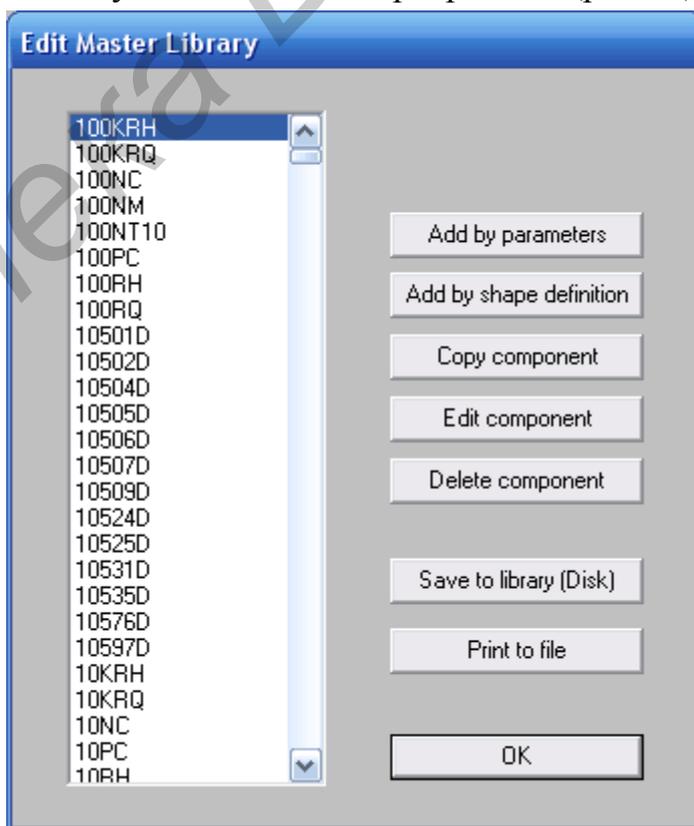


Рис. 5. Окно работы с главной библиотекой компонентов

Copy component (Копировать компонент). Удобно использовать, если требуется создать похожий компонент по параметрам уже имеющегося в библиотеке, для чего достаточно изменить лишь некоторые параметры.

Edit component (Редактировать компонент).

Delete component (Удалить компонент).

Save to library (Disk) (Сохранить в библиотеке). Используется в случае изменения состава библиотеки. Запись производится в файл `betasoft.mlb`.

Print to file (Печатать в файл). Команда записывает список всех компонентов главной библиотеки в текстовый файл формата ASCII с расширением `.LST`.

Разработчик достаточно легко может настроить свою собственную *рабочую библиотеку* компонентов, учитывающую все особенности проекта. Для этого используется команда **Library – Working** (Библиотека – Рабочая), которая содержит только те компоненты, которые предполагается использовать в текущем проекте (рис. 6). Перед размещением компонентов на ПП требуется, чтобы рабочая библиотека содержала все необходимые для этого компоненты, поскольку текущий проект работает только с рабочей библиотекой. Это выполняется либо добавлением уже имеющегося в главной библиотеке компонента (кнопка `>>`), либо созданием нового компонента с помощью команд, вызываемых аналогичными кнопками, как и в окне редактирования главной библиотеки. При необходимости разработчик может перенести все компоненты рабочей библиотеки в главную библиотеку (кнопка `<< All <<`) и сохранить их там (кнопка **Save Master**).

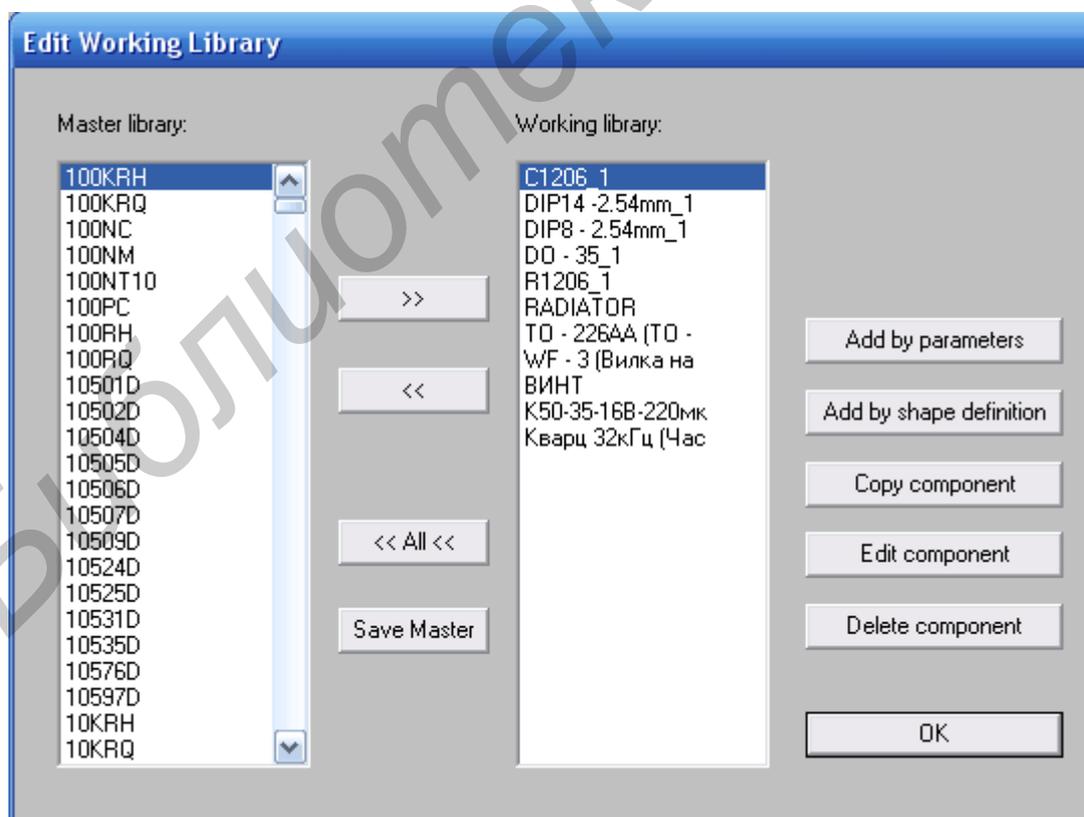


Рис. 6. Окно редактирования рабочей библиотеки

Pin Thickness – толщина вывода.

Pin Width – ширина вывода.

Pin Length – длина вывода.

Pin Thermal Conductivity – теплопроводность материала вывода (можно определить, выбрав материал из списка).

Для редактирования библиотеки материалов предназначена команда **Library – Material** (Библиотека – Материалы). Основным параметром, значение которого нужно указать в свойствах материала, является его теплопроводность – *Conductivity* (рис. 8).

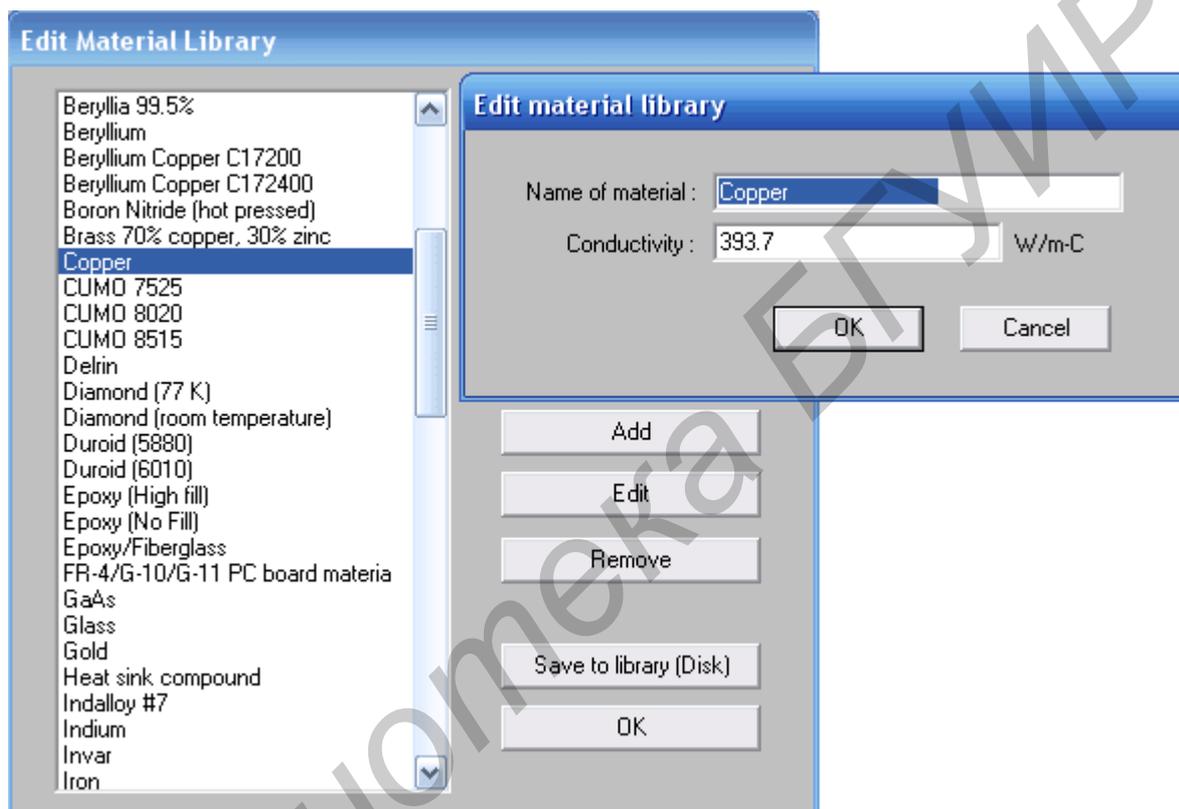


Рис. 8. Окно редактирования библиотеки материалов

2.3.2. Размещение ЭРЭ на ПП

Первоначальное размещение ЭРЭ на ПП может производиться двумя путями: ручным размещением или импортом из САПР трассировки. В дальнейшем положение компонентов на ПП можно редактировать, размещать новые компоненты и удалять ненужные.

При ручном размещении компоненты должны быть предварительно добавлены в рабочую библиотеку проекта. Для размещения выберите компонент в выпадающем списке рабочей библиотеки, вызовите команду меню **Placement – Component** (Размещение – Компонент) или нажмите на кнопку . Далее мышью укажите место установки компонента, при этом текущие координаты компонента указываются в строке координат X и Y справа внизу главного окна. После щелчка мышью появится диалоговое окно для ввода информации о ком-

поненте (рис. 9), в котором необходимо указать текущее обозначение *Reference designator* компонента в проекте. Остальные параметры задаются по умолчанию исходя из параметров компонента, заданных в библиотеке:

Default power in working library – заданная мощность в рабочей библиотеке.

Input power scaling factor – коэффициент масштабирования входной мощности. Используется при необходимости произвести тепловой расчёт с изменённой рассеиваемой мощностью без изменения номинальной мощности компонента в библиотеке. Такая ситуация возникает, например, если требуется определить тепловые режимы ПП при максимальной рассеиваемой мощности компонента, когда его коэффициент нагрузки близок к единице.

Component temperature – температура компонента.

Junction temperature – температура перехода. Обычно это температура нагретой зоны компонента (кристалла или *pn*-перехода для полупроводниковых ЭРЭ).

On Front Side – расположение на верхней стороне ПП.

On Back Side – расположение на нижней стороне ПП.

Rotated 90 degree – компонент повернут на 90°.

Refined output – уточнённые данные. При установке этого флажка данные о компоненте записываются в текстовый файл .los для детального анализа тепловых режимов корпуса компонента. Помеченные таким образом компоненты можно затем увидеть на ПП, выполнив команду **View – Refined** (Вид – Уточнённые данные). Данная команда обычно используется в связке с пакетом анализа нагрева полупроводниковых микросхем Mentor HyperLynx MCM (BETAsoft-MCM/IC).

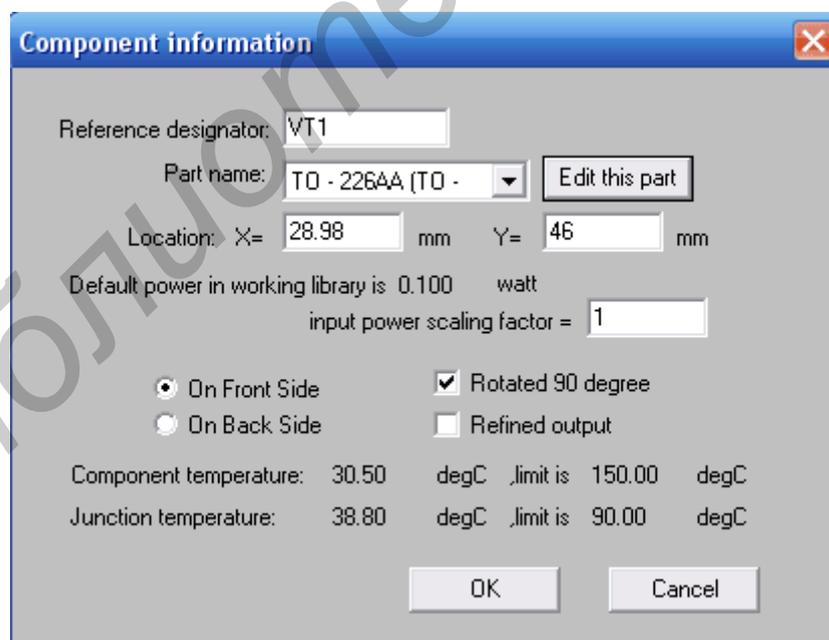


Рис. 9. Окно ввода информации о компоненте

Если требуется изменить библиотечные параметры компонента, нажмите кнопку **Edit this part** (рис. 10).

Рис. 10. Окно ввода библиотечной информации о компоненте

В левой половине окна задаются параметры, характеризующие геометрию используемого компонента, такие, как тип корпуса (*Class*), его размеры (*Length*, *Width*, *Height* или *Diameter*, если компонент круглый – *Rounded component*), количество выводов (*Number of pins*), величина воздушного зазора между компонентом и платой (*Air gap*), размеры выводов (*Pin thickness*, *length*, *width*).

В правой половине окна вводятся параметры, характеризующие тепловые свойства компонента, такие, как мощность рассеяния (*Power dissipation*), тепловое сопротивление между кристаллом и корпусом компонента (*Junction to casing thermal resistance*), тепловые сопротивления между воздушной средой и корпусом компонента при различных скоростях обдува (*Sink to air thermal resistance*), коэффициент теплообмена излучением (*Radiative Emissivity*), свойства теплопроводности зазора (*Gap conductivity*), предельные значения температур корпуса (*Casing temperature limit*) и нагретой зоны компонента (*Junction Temperature limit*). В окне необходимо указать теплопроводность выводов (*Pin thermal conductivity*) и теплопроводность зазора между компонентами и ПП (*Gap conductivity*).

Класс (*Class*) компонента определяется типом номинала его корпуса, свойствами теплообмена и функциональным назначением:

DIP-Through hole – корпус имеет два ряда штыревых выводов, расположенных друг напротив друга.

SMD long leads – SMD корпус, имеет четыре ряда планарных выводов, длина которых требует учёта их конвективного теплообмена с окружающей средой.

SMD medium leads – корпус аналогичен SMD long leads, но его выводы лишь частично участвуют в конвективном теплообмене.

SMD leadless – корпус аналогичен SMD long leads, но теплообмен с выводами чрезвычайно мал или значительно затруднён. Обычно к этому классу относятся поверхностно монтируемые и вертикально стоящие компоненты, выводы которых находятся под корпусом, а также относятся большинство поверхностно монтируемых резисторов и конденсаторов.

SMD small outline – SMD-корпус, выводы которого расположены в два ряда на противоположных сторонах корпуса.

BGA – корпус с обычными или с шарообразными выводами, находящимися на нижней стороне корпуса и размещёнными по определённой матрице.

Screw – винт (см. подразд. 2.5).

Heat sink – теплоотвод (см. подразд. 2.4).

Heat pipe – теплоотводящая трубка (см. подразд. 2.6).

Daughter Board – параллельно или перпендикулярно размещённая дочерняя ПП.

Обдув компонентов в HyperLynx Thermal задаётся в единицах «футы в секунду» (feet per second – ft/s), несмотря на предварительно установленные единицы измерения в СИ. Для перевода этих единиц в «метры в секунду» используйте следующие соотношения: $1 \text{ м/с} \approx 3,2808 \text{ ft/s}$, $1 \text{ ft/s} = 0,3048 \text{ м/с}$. Естественной конвекции обычно соответствует величина 3 ft/s.

2.3.3. Импорт данных о размещении компонентов ПП

В Mentor HyperLynx Thermal предусмотрен интерфейс импорта данных о размещении ЭРЭ и трассировке ПП из наиболее распространённых программ проектирования ПП: Mentor PADS, Mentor Expedition, Cadence Allegro, Altium P-CAD, Protel, Zuken CADStar и др. Это чрезвычайно удобно, поскольку нет необходимости вручную задавать параметры размещения компонентов на ПП, точно соответствующие результатам работы в САПР ПП, а также создавать рабочую библиотеку размещённых компонентов.

Перед выполнением импорта в рабочую папку программы необходимо поместить IDF-файлы (файл ПП и соответствующую ей библиотеку ЭРЭ). Для импорта используется команда **File – Import – CAD Interface** (Файл – Импорт – CAD интерфейс). Далее указываются имена импортируемых файлов. В случае успешного импортирования в рабочем поле программы появится ПП с размещёнными компонентами.¹

¹ Для импорта рабочих файлов P-CAD или Protel воспользуйтесь специальной утилитой CFBS, которая автоматически создаёт готовые к моделированию входные файлы HyperLynx Thermal (см. подразд. 2.10). Для использования конвертора необходимо, чтобы выходной файл ПП с расширением .pcb был сохранён в формате ASCII

2.3.4. Импорт теплофизических данных компонентов

Чтобы вручную не вводить данные о рассеиваемой мощности и тепловых сопротивлениях ЭРЭ, нужную информацию можно импортировать из специально подготовленного текстового файла. Это особенно удобно в случае большого количества компонентов ПП. Указанную информацию предварительно нужно ввести в текстовый файл с расширением .PWR в следующем виде:

Component	Watt
C1CM37706	3.0
CY1107501	1.6
C1CM37605	1.0
CSOC22806	1.0
Reference Designator	Watt
U8	3.0
U23	1.6
U28	1.6
U26	1.0

где Component – наименование компонента; Watt – рассеиваемая компонентом мощность; Reference Designator – позиционное обозначение компонента.

Импорт данных выполняется посредством команды **File – Import – Power & Th-Resist**. (Файл – Импорт – Мощность и тепловое сопротивление).

2.4. Размещение теплоотводов на ПП

Расчёт теплового режима ПП, когда на ней находятся теплоотводы (радиаторы), представляет собой довольно сложную задачу и зависит как от параметров ЭРЭ и радиатора, так и от взаимного расположения всех компонентов на плате и направления обдува. HyperLynx PCB Thermal не рассчитывает непосредственно параметры радиаторов, но максимально учитывает их влияние на ЭРЭ, на которых они установлены, а также на общий температурный режим ПП.² Поэтому разработчику важно корректно подобрать соответствующую схему моделирования.

Для размещения теплоотвода (радиатора) на ПП используется команда **Placement – Heat sink** (Размещение – Теплоотвод). При этом важно правильно задать параметры размещения радиатора, которые зависят от его расположения относительно охлаждаемого ЭРЭ и ориентации ПП. Для всех типов радиаторов необходимо задать размеры радиатора: *Length* – длина или размер радиатора по оси X; *Width* – ширина или размер радиатора по оси Y; *Height* – общая высота теплоотвода (без ЭРЭ). При простановке размеров необходимо следить, чтобы они строго соответствовали ориентации ПП относительно осей, которые отображаются в нижнем левом углу рабочего поля HyperLynx Thermal.

² Для расчёта точных массогабаритных параметров радиатора для конкретного ЭРЭ воспользуйтесь специальными программами или следуйте рекомендациям производителей соответствующих радиаторов

Далее ввод параметров зависит от расположения радиатора.

1. Один радиатор установлен на одном ЭРЭ

Установите:

Air gap → 0.

Number of Pins – количество штырей (пластин) радиатора.

Pin thermal conductivity, *Pin thickness*, *Pin width*, *Pin lengths* – оставьте значения по умолчанию.

Power = 0.

Gap conductivity соответствует теплопроводности заполняющего материала между радиатором и ЭРЭ.

Sink to air thermal resistance – тепловые сопротивления между воздушной средой и теплоотводом при скорости обдува 3ft/s и 10ft/s.

Radiative Emissivity – коэффициент излучения, зависящий от материала радиатора.

Effective height, fraction of DZ – приведённый определяющий размер радиатора, зависящий от расположения штырей радиатора к стороне обдува, принимающий значения в диапазоне от 0 до 1. Этот параметр оценивает степень омываемости радиатора воздухом и его дальнейшее влияние на окружающие компоненты после прохождения через радиатор. Влияние радиатора заметно, если этот параметр не менее 0,5. Если напор охлаждающего воздуха направлен прямо на радиатор, то параметр можно установить равным 1. В случае, когда направление большей длины штырей радиатора совпадает с направлением обдува, данный коэффициент принимается равным 0,5.

Большинство из указанных характеристик можно узнать из спецификации радиатора конкретного производителя.

2. Несколько ЭРЭ крепятся на одном радиаторе

В данном случае способ оценки теплового режима заключается в размещении в этой области ПП дополнительного фиктивного компонента с минимальной толщиной, наверху которого установлен теплоотвод. Фиктивный компонент должен иметь рассеиваемую мощность ЭРЭ, который крепится на радиатор, или суммарную мощность ЭРЭ, устанавливаемых на один общий радиатор.

При расположении общего радиатора на нескольких ЭРЭ нужно оценить градиенты температуры в объёме радиатора. Если монтируемые ЭРЭ имеют примерно одинаковую мощность рассеивания и распределение температуры по теплоотводу не имеет резких скачков, то достаточно разместить один общий радиатор, поместив его обозначение на ЭРЭ в рабочем поле. Далее ввод параметров осуществляется как для случая, когда один радиатор установлен сверху нескольких ЭРЭ (п. 3).

Если монтируемые на радиатор ЭРЭ имеют большой разброс мощности между собой или ожидается неравномерное распределение температуры по радиатору, то на рабочем поле целесообразно разместить отдельный радиатор на каждый из ЭРЭ или в каждой из значительно различающихся по температуре

областей. При этом зазоры между размещаемыми радиаторами (фиктивными элементами) должны быть минимальны.

Тепловое сопротивление $\Theta_{\text{ETA}j_s}$ каждого из радиаторов, образующих общий радиатор, определяется его размерами и тепловым сопротивлением реального общего радиатора. Тепловое сопротивление составного радиатора увеличивается на коэффициент, обратно пропорциональный отношению площадей составного радиатора и реального радиатора:

$$R_{\text{сост}} = R \frac{S}{S_{\text{сост}}}.$$

Например, если оригинальный радиатор имеет тепловое сопротивление $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$, а составной радиатор занимает $1/3$ области общего радиатора, то тепловое сопротивление составного радиатора равно $6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

В результате моделирования температура общего радиатора будет равна температуре корпусов ЭРЭ. Если нужно определить соответствующую температуру нагретой зоны ЭРЭ, то к температуре корпуса нужно добавить разницу температур, равную произведению мощности ЭРЭ и его теплового сопротивления:

$$T_{\text{нз}} = T_{\text{корп}} + P \cdot \Theta_{\text{ETA}j_s}.$$

3. Один радиатор установлен сверху нескольких ЭРЭ

В данном случае большие градиенты температуры по длине радиатора маловероятны, и температуры корпусов ЭРЭ будут приблизительно равны температуре радиатора.

Удалите все ЭРЭ с рабочего поля, на которые будет устанавливаться радиатор. Поместите фиктивный компонент с минимальной толщиной (height) в области расположения радиатора с размерами (length, width), равными габаритам оригинального радиатора. Задайте параметр *Number of pins* как сумму выводов всех ЭРЭ, находящихся под радиатором. В поле *Power dissipation* задайте суммарную мощность ЭРЭ, находящихся под радиатором. В поле *Height* должна быть сумма высоты теплоотвода и средней высоты компонентов за вычетом высоты фиктивного компонента.

2.5. Размещение винтов на ПП

Винт в HyperLynx Thermal – любая крепёжная конструкция ПП, оказывающая влияние на теплоперенос. Учёт размещения винтов на ПП важен в следующих случаях:

- размер винта сравним со средним типоразмером ЭРЭ;
- винт участвует в теплопереносе посредством теплопроводности (винт имеет контакт с металлизацией ПП, ЭРЭ или радиатором с ЭРЭ);
- количество винтов довольно большое для оказания влияния на конвективный теплообмен.

Для размещения винтов используется команда **Placement – Screw** (Размещение – Винт). В качестве критичных параметров винта (рис. 11) нужно указать его размеры, тепловое сопротивление (*Thermal resistance across the screw*) и температуру в области крепления (*Temperature at end*).

Рис. 11. Окно ввода библиотечной информации о винте

2.6. Размещение тепловых трубок на ПП

При использовании охлаждающих трубок приходится учитывать ограниченные в пространстве каналы теплообмена, сильно влияющие на величину нагрева ЭРЭ. Размещение тепловых трубок осуществляется командой **Placement – Heat pipe** (Размещение – Тепловая трубка). Далее необходимо ввести наиболее критичные параметры для теплового моделирования (см. рис. 11):

Length – длина или размер по оси X.

Width – ширина или размер по оси Y.

Height – общая высота трубки при присоединении к ПП.

Air gap – расстояние между трубкой и ПП (обычно оно заполняется эпоксидным или адгезивным материалом для крепления трубки к ПП).

Power dissipation → 0.

Emissivity – коэффициент излучения материала трубки (внешней части).

Gap Conductivity (проводимость зазора) – теплопроводность материала, используемого для присоединения трубки к ПП.

2.7. Размещение тепловыделяющих проводников на ПП

В ряде случаев на ПП имеются печатные проводники, нагрев которых может существенно влиять на общее распределение температуры на ПП. Обычно это силовые проводники в источниках питания высокой мощности или выходные проводники мощных усилителей. В таких случаях можно разместить форму проводника на ПП командой **Board – Add Trace** (Плата – Добавить проводник), после чего задать удельную мощность, выделяемую проводником на квадратный миллиметр.³

2.8. Редактирование расположения и характеристик компонентов ПП

Для **выделения компонента** следует щёлкнуть по нему левой кнопкой мыши. При этом на компоненте появляется перекрестье как показатель выделения компонента. Далее элемент можно копировать, перемещать и удалять.

Для **редактирования параметров компонента** необходимо щёлкнуть по нему правой кнопкой мыши. Редактировать параметры компонента или группы компонентов можно также в рабочей библиотеке (команда **Library – Working**).

Команда **Placement – Shift Components** (Размещение – Сместить компоненты) сдвигает все компоненты на заданное расстояние по горизонтали и вертикали. Для этого необходимо ввести численного значения величины смещения. Ввод отрицательных чисел изменяет направление смещения компонентов на противоположное.

Поиск компонентов можно осуществлять по наименованию (команда меню **View – Search by Component Name**) или по обозначению (команда меню **View – Search by Reference Designator**). Найденный компонент помечается на рабочем поле перекрестием.

2.9. Задание краевых условий теплопереноса

Важным этапом подготовки к тепловому моделированию является правильное описание теплового взаимодействия ПП с окружающей средой и задание начальных условий нагрева. Частично граничные условия (среда моделирования) задаются в окне Board Property Definition (см. подразд. 2.1). Командой **Environment – Condition** (Краевые условия – Условия эксплуатации) указываются остальные необходимые параметры краевых условий (рис. 12):

Incoming Air Temperature (open) or Initial Temp. of Iteration – температура входящего воздуха (для перфорированного корпуса) или начальная температура (для герметичного корпуса).

Air pressure – давление воздуха.

Gravity – поправочный коэффициент на гравитацию. В программе полагается, что сила гравитации направлена строго вертикально вниз. Значение коэф-

³ Данная команда доступна только в расширенной версии пакета Mentor HyperLynx Thermal Trace

фициента может составлять от 0 (космос) до 20 (старт ракеты); для обычных наземных условий значение можно задавать равным единице.

Humidity ratio – относительная влажность среды.

Card guide width – ширина направляющих для платы (верхней и нижней). Если направляющих нет, введите толщину ПП.

Emissivity of this board – коэффициент излучения ПП без учёта излучения ЭРЭ. Для органических материалов ПП коэффициент составляет от 0,5 до 0,9.

Analysis accuracy control – точность анализа (0,1 ... 0,01 и более).

Air comes from – направление обдува ПП или преимущественное расположение перфорированных отверстий относительно ПП.

Incoming Air Temperature (open), or Initial Temp. of Iteration (closed):	20	degC
Air pressure:	760	mmHg
Gravity:	1	
Humidity ratio:	0.8	
Card guide width:	7.62	mm
Emissivity of this board:	0.8	
Analysis accuracy control:	0.001111	degC
Air comes from:	Top	
Board location:	Single board	
Comp. at front channel:	Both sides	
Board placed:	Horizontal	
No. of iterations:	High	
System:	Open rack	Open rack
Board spacing:	50.01	5.004
Adjacent board emissivity:	0.8	0.8
Adjacent board power dissipation:	0	0
Temperature of casing wall:	20	20
Incoming air velocity:	600.2	600.2

Рис. 12. Окно задания граничных условий

Board location – расположение платы. Задаёт положение ПП относительно смежных ПП и стенок корпуса: In rack (с обеих сторон рассматриваемой ПП находятся смежные ПП), single board (обе стороны ПП обращены к стенкам корпуса); right (left) of rack (ПП с обращена правой (левой) стороной к смежной ПП, а другой стороной – к стенке корпуса).

Comp. at front channel – расположение компонентов ПП к обдуву (одна сторона или две стороны ПП одновременно).

Board placed – ориентация платы.

No. of Iteration – количество итераций. Для проведения полного анализа с минимальной погрешностью установите в положение *high*.

System – система установки ПП. Для каждой из сторон анализируемой ПП задаётся наличие воздушного потока (*open rack*) или его отсутствие (*closed*).

Board spacing – расстояние до смежной ПП или стенки корпуса, к которой обращена рассматриваемая сторона ПП.

Adjacent board emissivity – коэффициент излучения смежной ПП.

Adjacent board power dissipation – рассеиваемая мощность смежной ПП.

Temperature of casing wall – температура смежной панели или стенки корпуса.

Incoming air velocity – скорость воздушного потока на входе ПП. В случае герметичного корпуса, не содержащего вентиляторов, установите значение «0».

Если ПП крепится посредством специального держателя (защёлки) к теплопроводящему основанию корпуса или шасси, то желательно указать также и этот путь теплопереноса, особенно в случае использования герметичного корпуса. Для указания теплопереноса по краям ПП используется команда меню **Environment – Boundary** (Краевые условия – Граница). При этом необходимо указать длину держателя (*Begin coordinate, End coordinate*), тепловое сопротивление «ПП – держатель» (*Thermal resistance of a wedge lock at end*), температуру теплоотвода в месте крепления держателя (*Temperature of sink of edge*).

2.10. Рабочие файлы и сохранение проекта

Для сохранения проекта выполните команду **File – Save (Save As)** или нажмите на кнопку . Проект HyperLynx Thermal хранится в следующих файлах:

.INP – входной файл размещения компонентов;

.INL – входной файл библиотеки компонентов;

.INB – входной файл описания контура ПП;

.INT – входной файл проводников.

Для обеспечения совместимости при выполнении моделирования избегайте использования кириллических шрифтов и спецсимволов в именах файлов и каталогах сохранения.

3. ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА И ПРОСМОТР РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

После ввода параметров ПП и ЭРЭ, а также задания краевых условий и условий эксплуатации, можно выполнять тепловое моделирование конструкции ПП. Для этого выполните команду меню **Analyze – Run** (Анализ – Запустить). Во время выполнения анализа должно появиться окно DOS с отображением процесса итераций, проводимого основным математическим ядром программы. После окончания анализа необходимо нажать любую клавишу для закрытия DOS окна для возврата в основное окно программы.

Примечание. В случае успешно проведённого анализа в окне DOS должно быть сообщение «HyperLynx Analysis finished», в противном случае выпол-

нение моделирования не произошло вследствие ошибок в процессе подготовки данных для анализа. Возможные причины ошибок можно посмотреть в текстовом файле .RVW.

После успешного проведения итераций необходимо выполнить команду **Analyze – Load** (Анализ – Загрузить) для последующего графического отображения результатов моделирования на рабочем поле.

Количество необходимых итераций определяется программой самостоятельно, однако их качественный уровень можно указать в меню *No. of Iteration* окна **Environment Property Definition**. Для закрытых (герметичных) систем большое количество итераций является необходимым.

Если нужно просмотреть информацию об итерациях последнего выполненного анализа, то можно открыть соответствующий текстовый файл командой **Analyze – Review** (Анализ – Просмотр). Далее с помощью панели инструментов или команд меню **View** можно отобразить следующие результаты моделирования:

-  (Component temperature) – температура компонентов;
-  (Excess temperature) – компоненты с перегревом;
-  (Board temperature) – распределение температуры на ПП;
-  (Board's temperature gradient) – распределение градиента температуры на ПП;
-  (Trace temperature) – температура печатных проводников.

Командой меню **File – Scale** (Файл – Шкала) можно задать диапазон температур и мощностей компонентов, отображаемых в рабочем поле.

Численные результаты моделирования находятся в текстовом файле *.out, автоматически сохраняемом в папке расположения входных файлов проекта, и могут быть просмотрены командой меню **View – Numerical Output** (Вид – Численные результаты). Выходные данные о моделировании компонентов представляются в следующем виде:

Side	Ref.Des.	Tc(C)	Tj(C)	X1	Y1(in)	Q(W)	Part Name	Tair(C)
1	C1	63.5	63.5	3.7	.3	.000	S10089-104KNFX	25.3
1	R101	70.2	70.2	5.6	1.2	.001	S10090A2491F	35.8
1	Q12	61.6	63.2	2.0	.3	.200	PC734-7092-6051	25.2

где Side – сторона ПП установки компонента; Ref.Des. – обозначение компонента; Tc(C) – температура корпуса компонента; Tj(C) – температура нагретой зоны (перехода) компонента; X1, Y1 – координаты расположения компонента в заданной системе измерений; Q(W) – рассеиваемая компонентом мощность; Part Name – наименование компонента или тип его корпуса; THETA или Tair(C) – тепловое сопротивление между ПП и компонентом.

Печать графически представленных результатов напрямую из программы невозможна. Кнопка (меню **File – Print**) вызывает окно сообщения о копировании изображения экрана в буфер обмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. HyperLynx PCB Thermal. User's Manual for Software Version 8.3.2. – Mentor Graphics Corporation, 2008. – 92 p.
2. HyperLynx Thermal [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа : <http://www.mentor.com/products/pcb-system-design/analysis-verification/hyperlynx-thermal/>.
3. Дульнев, Г. Н. Методы расчёта тепловых режимов прибора / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфёнов, А. В. Сигалов. – М. : Радио и связь, 1990. – 312 с.
4. Жаднов, В. В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств / В. В. Жаднов, А. В. Сарафанов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – 464 с.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Журавлёв Вадим Игоревич
Колбун Виктор Сильвестрович
Смирнова Наталья Анатольевна

Тепловой анализ печатных плат в Mentor HyperLynx Thermal

Методические указания к лабораторным работам
по дисциплине «Моделирование и компьютерный анализ РЭС»
для студентов специальности 1-39 02 01
«Моделирование и компьютерное проектирование
радиоэлектронных средств»

Редактор Л. А. Шичко
Компьютерная верстка Е. Г. Бабичева

Подписано в печать 09.10.2009.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,86.
Уч.-изд. л. 2,0.	Тираж 100 экз.	Заказ 441.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровка, 6