

УДК 004.9; 519.2

**ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛООВОГО АНАЛИЗА
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

И.И. Шибут

Рассматриваются основные этапы проведения компьютерного теплового анализа на базе суперкомпьютерных технологий. Изложены теоретические и методические подходы к подготовке и проведению теплового анализа радиоэлектронных устройств в целом. Рассмотрен пример проведения теплового анализа телевизора марки «Horizont» с использованием мультипроцессорной версии пакета LS-DYNA на базе суперкомпьютера семейства «СКИФ К – 1000».

Ключевые слова: тепловой анализ, суперкомпьютер, радиоэлектронные устройства.

Введение

В современных условиях радиоэлектронные устройства различного назначения применяются во всех областях жизни человека. Поэтому в связи с постоянным стремлением к миниатюризации, повышению плотности расположения компонент внутри устройств, требований к снижению стоимости и уменьшению жизненного цикла изделия возрастает потребность в быстром и качественном решении такой проблемы, как эффективный теплоотвод в устройстве.

Наиболее приемлемым путем решения проблемы является внедрение компьютерного теплового анализа в процесс проектирования и производства радиоэлектронных устройств. Компьютерный тепловой анализ позволяет сократить не только затраты на проведение натурных испытаний, но и время, затрачиваемое на выявление недостатков и внесение изменений в конструкцию анализируемого устройства. Из-за сложности современных радиоэлектронных устройств и необходимости учета сложного комплекса физических процессов, протекающих в конструкциях, целесообразно применение суперкомпьютерных технологий для проведения теплового анализа

В Республике Беларусь одним из лидеров в области производства радиоэлектронных устройств бытового назначения является ОАО «Горизонт». Внедрение компьютерного теплового анализа в цикл производства и проектирования продукции ОАО «Горизонт» обеспечит повышение уровня конкурентоспособности предприятия на мировом рынке. В настоящий момент из-за отсутствия квалифицированных кадров и высокой стоимости лицензионного программного обеспечения разработка новых моделей целиком основана на опыте специалистов завода. Это значительно снижает скорость разработки и запуска в производство новых моделей из-за необходимости проведения натурных испытаний и последующей доработки моделей. В то же время ведущие фирмы-изготовители радиоэлектронной продукции (Philips, Sony) успешно применяют компьютерный инженерный анализ в сквозном цикле проектирования и производства.

На базе Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси создан и применяется для расчетов суперкомпьютер семейства «СКИФ К-1000». Для внедрения компьютерного теплового анализа на предприятии использовались возможности суперкомпьютера, что позволило значительно ускорить процесс получения результатов и повысить их точность по сравнению с применением персональных компьютеров. Исследования по тепловому анализу моделей телевизионных устройств марки Горизонт проводились на базе мультипроцессорной версии пакета LS-Dyna [1, 2].

Постановка задачи

Для видеотехники одним из важнейших показателей качества является обеспечение оптимального режима тепловыделения в процессе эксплуатации с целью удовлетворения определенным требованиям к надежности и безопасности функционирования устройства.

Традиционно оценка тепловых режимов работы любой радиоэлектронной аппаратуры на отечественных предприятиях проводилась на завершающих этапах ее проектирования посредством стендовых испытаний. Однако сложность современной аппаратуры, высокие требования к надежности требуют уже на ранних этапах разработки учета сложного комплекса физических процессов, протекающих в конструкциях РЭА. Так, отклонение тепловых режимов работы устройства ведет к изменению его эксплуатационных характеристик, вплоть до выхода из строя.

Тепловой расчет работы конструкции радиоэлектронного устройства – это анализ распределения температур в конструкции в зависимости от времени и заданных граничных условий. Источниками тепла в конструкции устройства являются различные электронные элементы. Большая часть мощности, потребляемой электронными элементами, выделяется в виде тепловой энергии. Полезная мощность при этом составляет величину порядка 10%. Тепловые поля всех электронных элементов устройства формируют общую тепловую картину, возникающую при работе устройства. Вид тепловой картины устройства зависит от мощности и распределения источников тепла, конструкции, режима работы устройства и его системы охлаждения, геометрических параметров, физических свойств материалов, из которых оно изготовлено, условий эксплуатации.

Проведение теплового анализа позволяет: определить температурные режимы работы как отдельных элементов, так и изделия в целом; выявить необходимость, параметры и эффективность применения дополнительных теплоотводящих элементов и конструкций (к примеру, введение дополнительных вентиляционных отверстий).

Методика проведения компьютерного теплового анализа радиоэлектронного устройства

Для внедрения технологии теплового анализа радиоэлектронного устройства на базе суперкомпьютерных технологий была проведена серия вычислительных экспериментов по расчету теплового режима модели телевизора в среде системы LS-DYNA [3]. Исследовалось влияние нескольких источников тепла на общую тепловую картину в корпусе телевизора.

При анализе теплового режима внутри корпуса радиоэлектронного устройства учитываются наиболее существенные черты конструкции и протекающие в корпусе физические процессы. Все второстепенные элементы конструкции, которые не влияют существенно на изучаемый объект и физический процесс теплообмена, могут быть проигнорированы. Такой идеализированный объект называют обычно тепловой моделью [4]. Основное требование к тепловой модели может быть сформулировано следующим образом: тепловая модель должна быть адекватна изучаемому явлению и реализуема математически.

Таким образом, на этапе анализа конструкторской модели необходимо выполнить следующие действия:

- провести анализ исходной САД–модели конструкции радиоэлектронного устройства и технической документации;
- выявить основные конструктивные элементы, которые будут участвовать в процессе тепловыделения и теплообмена;
- на основе технической документации выявить источники тепла и провести сравнительный анализ тепловых характеристик тепловыделяющих элементов.

Удаление источников тепла, которые имеют малую мощность тепловыделения (вторичных), позволяет упростить тепловую модель устройства, снизить общий объем памяти для вычислений, а также время расчета. Удаление вторичных источников не приводит к значительному искажению тепловой модели, так как их тепловое поле локализовано в малой окрестности элемента и имеет лишь местное значение.

Следует также отметить, что в конструкции существуют элементы, не вносящие существенных изменений в общую тепловую картину. Это различные ребра жесткости, выступы, кнопки управления, разъемы для аудио- и видеовходов, внешние элементы, такие как стойки, кронштейны или другие устройства крепления. Удаление таких элементов снижает объем модели и упрощает ее обработку. На рис. 1 приведен пример изменения конструкторской модели телевизора для проведения теплового анализа.

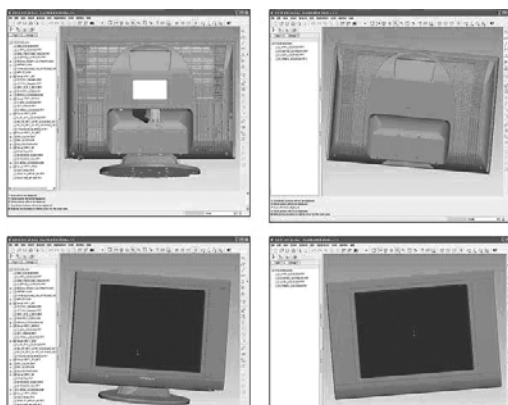


Рис. 1. Исходная (слева) и модифицированная (справа) модели телевизора

Для работы с конструкторской моделью устройства в САЕ-среде необходимо создание конечно-элементной модели (КЭМ), на базе которой и будет проводиться анализ. Существует несколько базовых принципов построения КЭМ, которые приведены ниже.

Конечно-элементная сетка должна генерироваться из конечных элементов, размеры которых находятся в соответствии с размерами геометрической модели. Минимальный размер конечного элемента определяется минимальным размером элементов геометрической модели и наличием в ней мелких конструктивных элементов. При разбиении следует стремиться к равномерности размеров ячеек конечных элементов. Сгенерированная сетка конечных элементов должна отвечать требованию непрерывности: в ней должны отсутствовать «дыры», дублирующие элементы, пересекающиеся элементы. Сгенерированная конечно-элементная сетка не должна содержать конечных элементов низкого качества. Скорость и точность расчетов зависит от качества конечных элементов. При построении сетки конечных элементов необходимо стремиться, чтобы она состояла из правильных треугольников и четырехугольников, также должны отсутствовать треугольники с малыми углами.

Следующим этапом работ по проведению инженерного анализа является создание расчетно-аналитической модели [5]. Под расчетно-аналитической моделью понимается твердотельная и (или) поверхностная модель исследуемой конструкции, представленная конечными элементами и их узлами, к граням которой, или к узлам конечных элементов, прикладываются нагрузки и ограничения.

Для описания задачи теплового анализа радиоэлектронного устройство необходимо:

- задать параметры материалов, из которых изготовлены элементы конструкции устройства;
- определить начальные и граничные условия;

- задать тепловые нагрузки;
- задать тепловой контакт между деталями сборки модели устройства;
- задать параметры расчета на VMBC.

Создание расчетно-аналитической модели телевизора проводилось в среде пре-, постпроцессора LS-PrePost.

После передачи КЭМ устройства в среду LS-PrePost на первом этапе проверяется содержание базовых опций *Part, *Mat и *Section. Опция *Section определяет формулировки конечных элементов, правило их интегрирования, толщину элементов в узлах, а также характеристики поперечного сечения. В некоторых случаях, например, при импорте конечно-элементных моделей из среды HyperMesh, сведения о конечных элементах не передаются. Поэтому следует задавать значения параметров опции *Section вручную. Таким образом, первым шагом при создании расчетно-аналитической модели является задание параметров опции *Section.

Описание параметров материала осуществляется в разделе ключевого слова *Mat. Опция позволяет задавать разные типы материалов для различных видов анализа. В случае теплового анализа используется тип материала *Mat_Thermal{Option}:

- в случае использования при изготовлении устройства изотропных материалов применяется тип *Mat_Thermal_Isotropic. Данный тип используется при описании теплофизических характеристик материалов класса пластмасс, металлов, стекла;
- в разделе задаются такие параметры, как плотность, теплопроводность и теплоемкость материала.

Описание частей модели производится при помощи ключевого слова *Part. При импорте сборки конечно-элементных моделей устройства для каждой отдельной конечно-элементной модели по умолчанию создается карта *Part, которую необходимо заполнить вручную:

- каждой части модели поставить в соответствие идентификатор ключевого слова *Section;
- для каждой части определить идентификатор материала в поле TMID.

Известно, что температура телевизора в начальный момент времени одинакова во всех узлах модели. В связи с этим в набор узлов для задания начальных условий должны входить все узлы модели.

Начальные условия для теплового расчета описываются картой ключевого слова *Initial, задается начальная температура устройства. У телевизора, как было упомянуто выше, все узлы имеют одинаковую начальную температуру. Поэтому удобно вместо идентификатора набора узлов в поле nsid поставить 0, что по умолчанию присваивает значение заданной начальной температуры всем узлам модели.

Граничные условия описываются ключевым словом *Boundary_Convection_Set. Каждому сегменту ставится в соответствие температура окружающей среды и коэффициент конвективной теплоотдачи.

В качестве тепловой нагрузки в модели задаются коэффициенты объемного тепловыделения. Постоянная тепловая нагрузка задается в поле smult ключевого слова *Load_heat_generation_set. Коэффициент объемного тепловыделения рассчитывается по формуле $Q=p/V$, где p – мощность тепловыделения, V – объем детали. В качестве источников тепловыделения в модели телевизора задаются наборы твердотельных элементов конечно-элементных моделей процессора обработки сигналов и трансформатора.

Для описания процессов теплообмена в модели используется ключевое слово *Contact_automatic_surface_to_surface(Thermal)_MPP. С помощью опции задается тепловой контакт между деталями сборки, находящимися в непосредственном контакте, а также между деталями, разделенными воздушной прослойкой.

Для описания контакта частей модели, между которыми расположена воздушная прослойка, используется поле *cf*, в котором задается удельная теплопроводность воздуха. Поле *frad* используется для описания передачи тепла радиацией, однако при температурах менее 100 °С данным видом теплообмена можно пренебречь.

Параметры расчета на суперкомпьютере задаются при помощи ключевого слова **Control*:

- процедура выполнения только теплового анализа задается ключевым словом **Control_Solution*;
- время завершения анализа задается в поле *ENDTIM *Control_Termination*;
- в полях **Control_Thermal_Solver* задаются опции теплового расчета, такие как тип анализа, тип задачи, тип решателя;
- параметры управления шагом решения по времени задаются в ключевом слове **Control_Thermal_Timestep*.

В поле *SOLN *Control_Solution* определяется вид анализа как только тепловой, что соответствует значению *SOLN=1*.

Тип теплового анализа задается в поле *ATYPE*. В случае теплового анализа монитора выбираем переходный тип теплового анализа *ATYPE=1*. Такой анализ проводится с помощью неявных методов.

Результаты исследования

На основе предоставленной информации моделирование процессов распространения тепла в корпусе одной из моделей телевизора проводилось при следующих ограничениях:

- равномерное распределение температур в начальный момент времени, $T_0 = 35^\circ\text{C}$;
- мощность тепловыделения LCD -матрицы телевизора $P=36$ Вт;
- мощность процессора обработки сигналов $P=3$ Вт;
- мощность трансформатора питания $P=12$ Вт;
- коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности корпуса и кожуха 2,72 Вт /(m^2c);
- коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности источников тепла 6 Вт /(m^2c).

Для запуска расчета на ВМВС было задействовано 4 узла по 2 процессора. Следует отметить, что при запуске решения задачи теплового анализа на суперкомпьютере необходимо установить двойную точность расчетов.

Результаты теплового анализа телевизора, проведенного по предложенной методике, представлены на рис. 2.

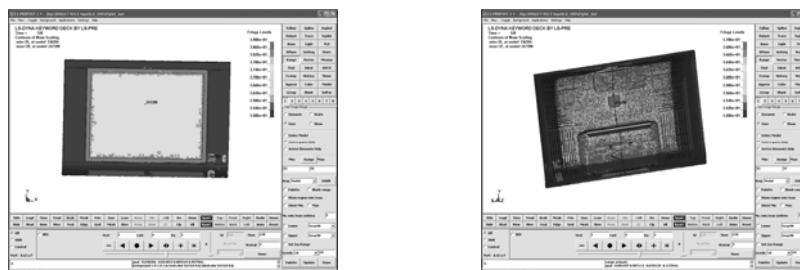


Рис. 2. Результаты анализа теплового состояния корпуса телевизора

В результате проведения вычислительных экспериментов по тепловому расчету в среде *Is-Dyna* были получены значения температур наиболее значимых источников тепла, таких как LCD-матрица телевизора, трансформатор питания и процессор обработ-

ки сигналов. Также было получено распределение температур на поверхности корпуса телевизора с учетом тепла, выделяемого перечисленными источниками. При проведении сравнительного анализа полученных данных и данных по натурным испытаниям было установлено, что рассчитанные температуры процессора и трансформатора близки к данным натурных испытаний с погрешностью от 3,5% до 6,7%. Погрешность расчетов связана со сложностью моделирования параметров материала тепловыделяющих элементов.

На основе анализа результатов были вынесены практические рекомендации по оптимизации конструкции телевизионного устройства.

Заключение

Разработанная методика создания расчетно-аналитической модели радиоэлектронного устройства позволяет в полной мере описать процессы теплообмена в устройстве с естественным способом охлаждения и низкой интенсивностью движения среды в корпусе. Методика проведения теплового анализа была успешно внедрена в процесс проектирования телевизионных устройств на предприятии «Горизонт» и позволила разработчикам повысить эффективность подготовки новых моделей телевизионных устройств к запуску в производство. Планируется, что дальнейшая работа в области внедрения компьютерного инженерного анализа на базе суперкомпьютерных технологий в процесс производства радиоэлектронной продукции в Беларуси позволит устранить погрешности, связанные с недостатком информации об импортируемых комплектующих, и снизить процент ошибки компьютерных расчетов.

Результаты, представленные в работе, получены в рамках выполнения задания ПА2.2 «Разработать и внедрить научно-методические основы компьютерного инженерного анализа конструкций аудио-, видеотехники на кластерных мультипроцессорных вычислительных системах с использованием пакетов мирового уровня» проекта ПА2 «Разработка научно-методических основ применения наукоемких информационных САЕ-технологий на базе кластерных высокопроизводительных мультипроцессорных вычислительных систем» научно-технической программы Союзного государства «Триада».

Литература

1. LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume 1. – Livermore Software Technology Corporation, 2001. – 853 p.
2. Shapiro Arthur B. Heat Transfer in LS-DYNA // Proc. of the 4th European Users Conference.
3. Губич Л.В., Шибут И.И. Тепловой анализ телевизионного устройства в среде системы LS-DYNA: подходы, методы, решения // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – № 9. – С. 20–25.
4. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984. – 248 с.
5. Шибут И.И. Формирование расчетно-аналитической модели для расчета теплового состояния радиоэлектронных устройств // Материалы второй Междунар. науч.-техн. конф. «Суперкомпьютерные системы и их применение» (SSA`2008). – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – С. 306–311.

Шибут Ирина Игоревна – Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, аспирант, irina_shibut@mail.ru