

1.15. ВВЕДЕНИЕ В РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРО- И ГАЗОДИНАМИКИ

Цель лекции: проведение расчетов тепловых режимов изделий приборостроения с применением методов вычислительной гидро- и газодинамики приборных конструкций.

1.15.1. ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМАТИКУ

Расчет тепловых режимов изделий приборостроения – узкоспециализированная задача, для решения которой долгое время требовалось привлекать отдельный класс специалистов, занимающихся исключительно анализом тепловых потоков. Проектирование систем охлаждения осуществлялось на этапе проектирования механической части изделия и практически не учитывало особенности электронной составляющей. Процесс проектирования имел блочный характер, при котором ошибки проектирования могли быть выявлены лишь после конечной компоновки узлов, после чего проект отправлялся на доработку и цикл повторялся заново.

В современных реалиях, когда темпы выпуска новой продукции выросли в разы, а уменьшающиеся размеры устройств стали требовать все более тщательной проработки систем охлаждения, производителям приходится менять свой подход к проектированию и интегрировать этапы проведения тепловых расчетов непосредственно в процесс разработки как механической, так и электронной части изделия.

Общая тенденция к миниатюризации изделий приводит к тому, что геометрия внутренних компонентов становится чрезвычайно сложной. При этом плотность размещения компонентов настолько высока, что вопрос тепловыделения и охлаждения становится особенно острым. При уменьшении размеров компонентов и воздушных зазоров между ними становится необходимым учитывать не только общие параметры источников тепла и систем охлаждения, но и взаимное их воздействие друг на друга в условиях компактной компоновки.

Необходимо, чтобы специалисты, не имеющие глубоких познаний в анализе тепловых процессов, могли эффективно проводить тепловые расчеты непосредственно в конструкторских САПР (CAD-системах). Существующие базовые модули инженерного анализа конструкций (CAE), встроенные по умолчанию в большинство CAD – систем, не имеют функционала, достаточного для моделирования протекающих процессов с нужной степенью проработки. Они требуют от конструктора введения множества параметров и свойств среды в явном виде (например, коэффициента конвективного теплообмена для усло-

вий охлаждения детали), которые конструктор, как правило, не в состоянии указать с достаточной степенью точности. Также, набор моделируемых процессов в таких модулях сильно ограничен и не охватывает весь набор исследуемых параметров.

Ведущими поставщиками программных пакетов разрабатываются специальные инструменты для проведения анализа газовых и жидкостных потоков – CFD системы (computational fluid dynamics – вычислительная гидродинамика). Они позволяют создавать математические модели и выполнять тепловой анализ, имеют широкую интеграцию с САД системами и лишены тех недостатков, которые имеют базовые САЕ – решения.

В данном разделе курса будут рассмотрены возможности существующих инструментов для анализа тепловых режимов в электронных модулях I и II уровня (модули на печатных платах и блоки). Задачей является рассмотрение способов анализа типовых конструктивных элементов ЭА и разработка методики проведения теплового расчета типовых изделий ЭА с использованием данных инструментов.

В качестве используемого инструмента выбран CFD-модуль FloEFD, разрабатываемый компанией Mentor Graphics, входящей в компанию Siemens. Выбор данного программного обеспечения обусловлен широкими возможностями для моделирования основных физических процессов, происходящих в текучей среде, а также его интеграцию в большинство ведущих САД-систем (Solid Edge, SolidWorks, Creo, NX, Catia).

1.15.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ АНАЛИЗА

Вычислительная гидро- и газодинамика (CFD) – это одна из ветвей механики жидкости и газа, которая использует численные методы и алгоритмы для решения и анализа проблем, включающих в себя анализ потоков жидкости и газа. Используются вычислительные ресурсы компьютеров для совершения миллионов необходимых математических операций для симуляции взаимодействия жидкостей и газов со сложными поверхностями физических объектов.

Физические параметры любого потока жидкости или газа определяются 3 основными законами:

- ◆ закон сохранения массы;
- ◆ второй закон Ньютона;
- ◆ закон сохранения энергии.

Эти законы выражаются с помощью математических уравнений, которые в общем случае являются интегральными уравнениями или уравнениями в частных производных. Особенностью CFD-методов является способность замены интегралов или частных производных в этих уравнениях на дискретизированные алгебраические представления, которые, в свою очередь, решаются

для получения численных значений параметров потока текучей среды в дискретных точках во времени и/или пространстве.

Существует 3 метода дискретизации:

- ◆ метод конечных разностей (МКР);
- ◆ метод конечных объемов (МКО);
- ◆ метод конечных элементов (МКЭ).

МКР основан на замене производных разностными схемами. Область расчета обычно делится на шестигранные ячейки (сетку), и расчет ведется для каждой узловой точки.

МКО основан на интегрировании систем дифференциальных уравнений в частных производных. Уравнения частной производной записываются в форме, которая может быть решена для заданного конечного объема (или ячейки). Область расчета дискретизируется на конечные объемы, и затем для каждого объема решаются уравнения. В отличие от МКР, данный метод не требует наличия структурированной сетки, что существенно упрощает моделирование процессов для объектов со сложной геометрической формой. Как и в МКО, конечное решение является дискретным, но результаты расчета обычно полагаются не в узловых точках, а в центрах ячеек.

МКЭ основан на разбиении области расчета на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах).

Прямое сравнение 3-х методов довольно затруднительно в силу большой вариативности каждого из методов в различных реализациях. МКО и МКР дают дискретные решения, тогда как МКЭ дает непрерывное решение. МКО и МКР обычно проще в программной реализации, чем МКЭ, но возможны исключения.

В CFD-методах используется 2 основных вида дифференциальных уравнений: уравнения Навье – Стокса и уравнения Навье – Стокса, осредненный по Рейнольдсу.

Уравнения Навье – Стокса

Уравнения Навье – Стокса описывают движение текучей среды. Эти уравнения выводятся из применения 2 закона Ньютона к движению жидкости, учитывая ее вязкость в зависимости от скорости потока и давления в среде.

Уравнения описывают скорость потока текучей среды. Решение уравнений Навье – Стокса называется полем потока, которое является описанием скорости жидкости в конкретной точке в пространстве и времени. Как только найдено решение для поля потока, другие параметры среды могут быть выведены из него.

Уравнения Навье – Стокса в общем виде выглядят следующим образом:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \nabla \cdot T + f ,$$

где:

v – скорость потока,

ρ – плотность жидкости,

p – давление,

T – тензор напряжений,

f – силы, действующие на каждую ячейку объема жидкости,

∇ – оператор набла.

Уравнения Навье-Стокса являются нелинейными уравнениями в частных производных практически в любой реальной ситуации, и их решение возможно только с использованием численных методов.

Численное решение уравнений для турбулентного потока чрезвычайно сложное, и, из-за значительно отличающихся масштабов процессов, происходящих в турбулентном потоке, стабильное решение требует настолько высокого разрешения сетки, что вычислительное время становится чрезмерно большим. Попытки расчета турбулентного потока, используя ламинарный решатель, сводятся к нестабильному во времени решению, сходимость которого находится под вопросом. Для решения этой проблемы, используются осредненные по времени уравнения, такие как уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу (RANS).

Уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу

RANS уравнения – это осредненные по времени уравнения движения потока жидкости. Метод осреднения Рейнольдса заключается в замене случайно изменяющихся характеристик потока (скорость, давление, плотность) суммами осредненных и пульсационных составляющих. RANS уравнения используются, в первую очередь, для описания турбулентных потоков. Для стационарного течения несжимаемой ньютоновской жидкости уравнения Рейнольдса записываются в виде:

$$\rho \bar{u}_j \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_j + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right]$$

Переменные, осредненные по времени, отмечены в этом уравнении чертой сверху, а пульсационные составляющие — апострофом. Левая часть уравнения (нестационарный член) описывает изменение количества движения жидкого объема, вследствие изменения во времени осредненной составляющей скорости. Это изменение компенсируется (см. правую часть уравнения) осредненными внешними силами $\rho \bar{f}_j$, осредненными силами давления $-\bar{p} \delta_{ij}$, вязкостными силами $\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$. Кроме того, в правую часть входят кажущиеся напряжения (напряжения Рейнольдса, турбулентные напряжения) $-\rho \overline{u'_i u'_j}$, учитывающие дополнительные потери и перераспределение энергии в турбулентном потоке (по сравнению с ламинарным потоком).

В результате решения приведенных выше уравнений в каждой узловой точке с помощью численных методов, для каждой из этих точек будут рассчитаны все необходимые параметры среды или твердого тела, такие как: температура и ее градиент, динамическое и статическое давление, скорость потока текучей среды, плотность среды, объемный и массовый расход текучей среды и т.д.

1.15.3. Возможности модуля CFD

Расчет теплового режима – это, в первую очередь, исследовательская, а не конструкторская задача. 3D – модель устройства, которая разрабатывается в основном для конструкторских целей и имеет высокую степень сходства с геометрией реального устройства, зачастую не подходит для моделирования CFD-системами без предварительной подготовки в силу избыточной сложности.

Проведение правильной подготовки модели к расчету особенно критично для электронных модулей, имеющих большое количество элементов на печатной плате, или блоков, имеющих сложную конструкцию корпуса. Дело в том, что микросхемы и другие электронные компоненты, а также элементы конструкции блоков, имеют довольно сложную и разнообразную форму (ножки микросхем, корпус сложной формы, крепежные элементы), а также сложную внутреннюю структуру (кристалл, внутренние проводники и т.д.). Большое количество таких элементов на плате и в блоке значительно усложняет генерацию сетки решателя, а также, ухудшает сходимость расчетов.

Правильная подготовка 3D – модели к исследованию заключается в упрощении конструктивных элементов через идеализацию ее компонентов. Так, модели корпусов блоков следует упростить, убрав элементы, не влияющие на тепловой режим блока (крепежные, декоративные элементы). Идеализацию компонентов ячеек ЭА, которые, как правило, имеют сложную форму и внутреннюю структуру, следует выполнять с помощью имеющихся в CFD-модуле идеализированных компонентов, которые имеют существенно более простую конструкцию, но при этом способны моделировать свойства определенной группы электронных компонентов с достаточной степенью точности.

Тесты к лекции 15

1. Какой метод дискретизации используется в рассматриваемой CFD-системе?
 - а) метод конечных разностей (МКР);
 - б) метод конечных объемов (МКО);
 - в) метод конечных элементов (МКЭ).
2. Какие уравнения применяются для решения задач в CFD-системах?
 - а) уравнения Навье – Стокса;
 - б) уравнения Навье – Стокса, осредненный по Рейнольдсу;
 - в) критерии подобия (Нуссельта, Грасгофа, Прандтля).
3. Необходима ли идеализация моделей для решения тепловых задач в CFD-системах?
 - а) да, идеализация необходима, как и в прочих системах инженерного анализа;
 - б) CFD-система самостоятельно выполняет идеализацию моделей;
 - в) для анализа тепловых режимов идеализация конструкторской модели не требуется.