

Руководство пользователя Power SIM

Глава 1. Руководство пользователя

Настоящее руководство представляет собой контекстную справку по программному продукту Power SIM. Включает в себя подробные сведения о пользовательском интерфейсе программы, управлении файлами, описания определений граничных условий, настроек сетки и расчетов, расчетов задач и анализ результатов.

Введение

Этот раздел является введением в руководство пользователя Power SIM и содержит важные сведения об эффективной навигации и использованию этого ресурса. Здесь представлены функциональные возможности программного продукта Power SIM, поддерживаемые типы файлов и обзор пользовательского интерфейса.

Условные обозначения

В настоящем документе используются следующие символы, единицы измерения, шрифты, терминология и другие условные обозначения:

Правила форматирования

Для обеспечения единообразия и лучшего понимания ко всей документации применяются следующие правила.

Определения

- **Определения:** Все ключевые термины поясняются при первом использовании и выделены жирным шрифтом.

Пример: **Граничное условие** — ограничение, применяемое на границе расчетной области.

Код и команды

- **Фрагменты кода:** Текст набран моноширинным шрифтом.

Пример: Для запуска симуляции выполните команду `simulate.exe`.

Выражения

- **Математические уравнения:** Размещаются в центре страницы с числом для удобства ссылки.

Пример:

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

Выделение важной информации

- **Примечания:** Примечания заключены в специальную рамку.



Примечание:

Убедитесь, что все входные параметры в рамках указанных диапазонов.

Диаграммы и рисунки

Диаграммы и рисунки демонстрируют наиболее продвинутые теории. Все диаграммы и рисунки соответствуют следующим правилам:

- **Нумерация:** Все рисунки нумеруются в порядке их появления, например, рисунок 3.1.
- **Подписи:** Подписи располагаются под рисунками.

Пример:

Рисунок 3.1: Схематическое представление проточной области.

- **Ссылки:** Ссылки на рисунки указаны в порядке их нумерации.

Пример: Течение жидкости происходит от входа к выходу, как показано на Рисунке 3.1.

Интерфейс пользователя

Для обозначения элементов интерфейса и навигации по программному продукту в Power SIM используются следующие условные обозначения.

Элементы интерфейса

- **Меню и кнопки:** Элементы пользовательского интерфейса выделены жирным шрифтом.

Пример: Чтобы запустить анализ, нажмите на кнопку **Запустить расчет**.

- **Опции и Настройки:** Навигация по программе осуществляется в виде меню.

Пример: Настройки > Параметры моделирования > Шаг по времени

Возможности программы

Power SIM — комплексное программное решение компьютерного инженерного анализа (CAE), разработанное для решения широкого спектра инженерных задач. Возможности программы включают:

- моделирование целостности питания в печатных платах;
- анализ кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена в проектируемых изделиях;
- моделирование напряженно деформированного состояния;
- численное моделирование процессов низкочастотного электромагнетизма;
- моделирование явлений оптики и фотоники.

Типы файлов

Power SIM поддерживает следующие типы файлов:

- **ODB++ (*.tar, *.tar.gz, *.tgz) , IPC-2581B (*.xml)** — файлы топологии печатной платы. Файлы доступны для чтения. После открытия такой файл можно сохранить в файл платы *.smtbrd или файл сборки *.smtdoc.
- **Power Sim board** — файл PCB с фильтрами компонентов, которые были предварительно применены к исходной топологии платы. Настройка фильтров перед импортом печатной платы позволяет упростить работу со сложными платами.
- **Document *.smtdoc** — файл сборки, в который можно импортировать файл топологии платы и задать все настройки для расчета. Для активного файла *.smtdoc с загруженной топологией платы доступна полная функциональность программного продукта.

Интерфейс пользователя

Пользовательский интерфейс представляет собой графическую область, меню основных команд, ленточную панель, левые боковые панели с деревом слоев, компонентов, схем платы и выбором типа задачи, а также нижнюю панель для задания граничных условий.

- **Графическая область.** В графической области отображается импортированная модель печатной платы. Смотрите [Графическое окно \(на странице 5\)](#).
- **Меню.** Включает команды для открытия/закрытия файла платы, сохранения изменений, закрытия программного продукта, переключения между открытыми окнами и доступа к пользовательской документации. Смотрите [#unique_8 \(на странице 8\)](#).
- **Ленточная панель Инструменты.** Расположена в верхней части окна, содержат кнопки с помощью которых запускаются диалоговые окна, где можно задать все условия задачи: окружающая среда, VRM, дискретные источники, потребители и другие, а также для запуска расчета и постпроцессинга. Смотрите [Ленточная панель \(на странице 8\)](#).
- **Панель Менеджер свойств** включает в себя дерево слоев, компонентов и цепей платы. Здесь можно выбрать типа задачи. Расположена в левой части окна программы. Панель состоит из вкладок **Слои**, **Компоненты**, **Печатные платы**. Также слева открывается вкладка **Окружающая среда**, где необходимо указать тип задачи. Смотрите [Вкладки \(на странице 12\)](#).

Графическое окно

После импорта модель печатной платы отображается в графической области в двумерном представлении.

Элементы управления областью просмотра

В верхней части графического окна отображаются следующие элементы управления:

1. **Изменить в размер экрана** . Масштабирование модели по размеру окна.
2. **Увеличить элемент вида** . Масштабирование модели по размеру области, выбранной ограничивающей рамкой. Щелкните на значок, чтобы активировать режим.

Затем нажмите и потяните за ограничивающую рамку по диагонали, чтобы охватить необходимую область. Чтобы выйти из режима, щелкните на значок еще раз.

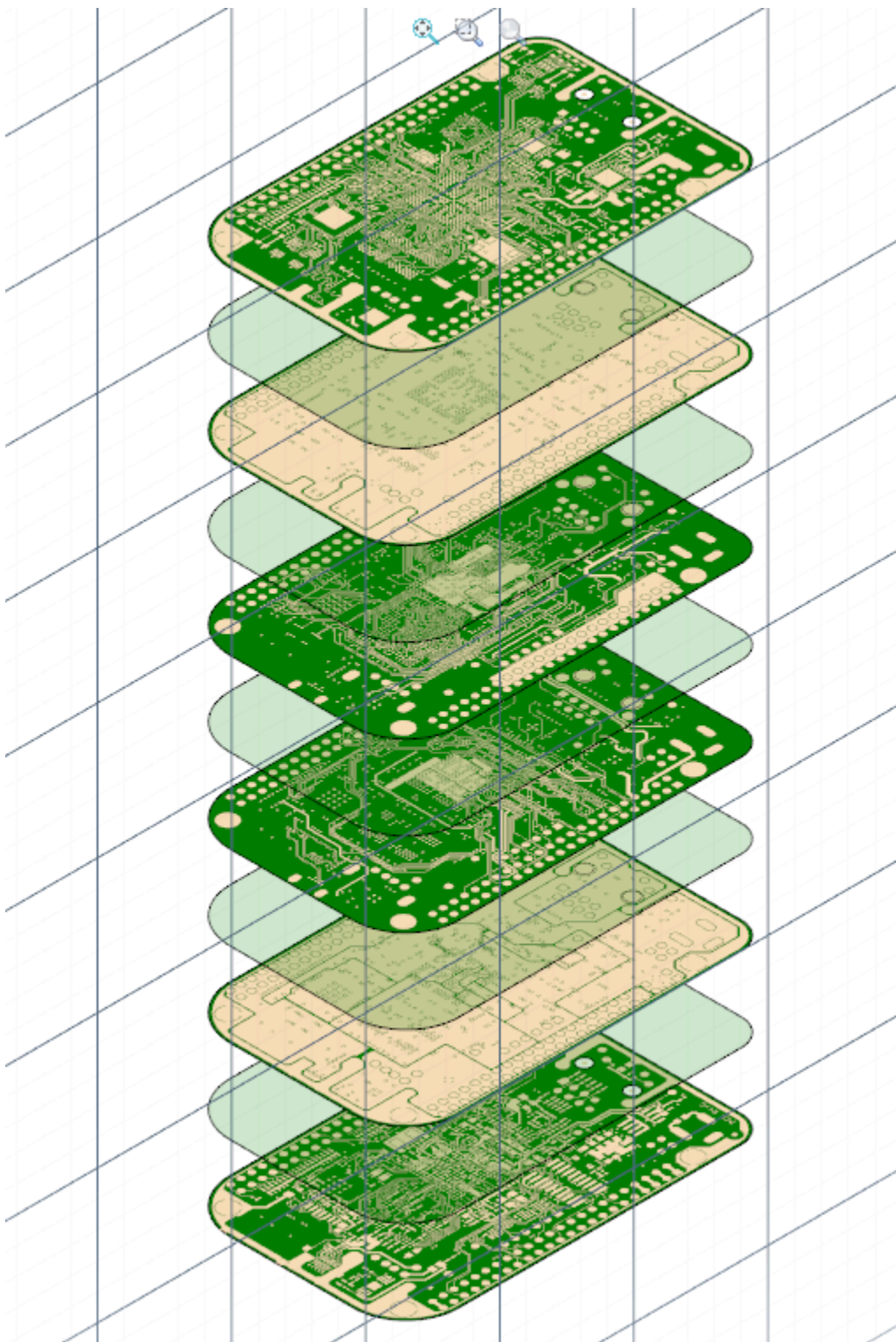
3. **Увеличить/уменьшить вид** . Этот режим позволяет увеличивать или уменьшать вид модели. Щелкните на значок, чтобы активировать режим. Чтобы увеличить вид модели, переместите указатель вверх. Чтобы уменьшить вид модели, переместите указатель вниз. Чтобы выйти из режима, щелкните на значок еще раз.

Элементы управления указателем мыши в области просмотра

- **Сдвиг.** Указатель сдвига  всегда активный. Нажмите кнопку мыши и переместите изображение.
- **Увеличить вид.** Наведите курсор на изображение и прокрутите колесо мыши от себя, чтобы увеличить изображение. Прокрутите колесо мыши на себя, чтобы уменьшить вид.

Вид изометрии

Чтобы активировать вид изометрии печатной платы, нажмите на кнопку **Режим изометрии**. В этом режиме плата отображается послойно, как показано на рисунке ниже:



Чтобы вернуться к предыдущему режиму отображения, нажмите кнопку **Режим редактирования** на ленте.

Ленточная панель

Ленточный интерфейс оптимизирует рабочий процесс, обеспечивая быстрый доступ к основным функциональностям. Ниже представлен подробный обзор основных кнопок ленты.

[Ленточная панель Файл \(на странице 8\)](#). Доступ к основным функциональностям управления проектами.

[Ленточная панель Главная страница \(на странице 9\)](#). Базовые настройки проекта.

[Ленточная панель Плата \(на странице 9\)](#). Доступ к настройкам печатной платы.

[Ленточная панель Геометрия \(на странице 9\)](#). Доступ к командам по позиционированию геометрии.

[Ленточная панель Тепловой анализ \(на странице 10\)](#). В этой панели располагаются все настройки проекта для задач гидродинамики, теплопроводности и сопряженного теплообмена.

[Ленточная панель Целостность питания \(на странице 11\)](#). Доступ к настройкам задач целостности питания.

[Ленточная панель Расчет \(на странице 12\)](#). Обеспечивает доступ к настройкам решателя.

[Ленточная панель Результаты \(на странице 12\)](#). Эта панель содержит инструменты обработки результатов.

Ленточная панель Файл

Доступ к основным функциональностям управления проектами.

- **Новый:** Запускает новый проект. Нажмите на эту кнопку, чтобы инициировать настройку нового проекта.
- **Открыть:** Открывает существующий проект из ваших файлов.
- **Конвертировать в сборку:** Конвертирует текущий проект в формат сборки.
- **Сохранить как сборку:** Сохраняет проект в формате сборки.
- **Добавить:** Позволяет импортировать файл *.smtdoc.
- **Заккрыть.** Закрывает текущий проект или документ.
- **Сохранить:** Сохраняет текущий ход выполнения проекта.

- **Сохранить как:** Создает новую копию проекта, предлагая сохранить ее под другим именем.
- **Сохранить все:** Сохраняет все открытые проекты и документы.

Ленточная панель Главная страница

Базовые настройки проекта.

Раздел Общие

- **Окружающая среда:** Открывает вкладку **Окружающая среда** в **Менеджер свойств** для настройки начальных значений параметров (Смотрите [Задание настроек окружающей среды \(на странице 23\)](#)).
- **Материалы:** Открывает вкладку **Материал** в **Менеджер свойств**, в которой можно задать материал геометрии.
- **Система единиц измерения:** Открывает вкладку **Система единиц измерения** в **Менеджер свойств**, где можно задать необходимую систему единиц измерения.
- **Параметры:** Открывает вкладку **Параметры** в **Менеджер свойств**.

Раздел Инструменты

- **Тема:** Переключение между темным и светлым режимами фона.

Ленточная панель Плата

Доступ к настройкам печатной платы.

Раздел Плата

- **Структура.** Открывается раздел Структура, где можно задать свойства слоев платы.

Раздел Вид

- **Реалистичная.** Реалистичное представление печатной платы.
- **Цвета слоев.** Просмотр только слоев.
- **Цвета цепей.** Просмотр только цепей.

Ленточная панель Геометрия

Доступ к командам по позиционированию геометрии.

Раздел Позиционирование

- **Перемещать:** Изменяет положение курсора, позволяя перемещать геометрию в любом направлении по оси X, Y.
- **Вращать:** Изменяет положение курсора, позволяя перемещать геометрию относительно любой оси.

Ленточная панель Тепловой анализ

В этой панели располагаются все настройки проекта для задач гидродинамики, теплопроводности и сопряженного теплообмена.

Общие

- **Расчетная область :** Позволяет определить пространство, в котором проводятся расчеты течения и теплообмена.
- **Критерии завершения :** Используется для задания критериев завершения расчета.

Тепловые источники

- **Объем :** Позволяет задать объемный тепловой источник в твердом теле или в текучей среде.
- **Поверхность :** Позволяет задать поверхностный тепловой источник на поверхности, контактирующей с текучей средой, а также на поверхности, лежащей на границе между твердыми телами.

Тепловые контакты

- **Тепловое сопротивление :** Позволяет задать контактное **тепловое сопротивление** на границах разделов твердых тел и твердого тела и текучей среды.

Сетка

- **Основная сетка :** Позволяет управлять параметрами автоматического построения начальной расчетной сетки в Power SIM.
- **Локальная сетка :** Это диалоговое окно используется для задания начальной сетки в локальной расчетной области, чтобы улучшить разрешение конкретной геометрии модели и/или особенностей потока (и/или теплообмена в твердых телах) в этой области, которые не удалось разрешить с помощью глобальной начальной сетки.

Цели

- **Глобальная сетка** : Позволяет задать физический параметр, вычисляемый во всей **Расчетная область** .
- **Объем** : Эта сущность позволяет задать физический параметр, вычисляемый в указанных объемах внутри **Расчетная область** .
- **Поверхность** : Эта возможность позволяет задать физический параметр, вычисляемый на выбранных поверхностях.
- **Точка** . Задаёт значение физического параметра, рассчитываемое в выбранной точке.
- **Выражение** : Позволяет задать цель, определяемую уравнением (базовые математические функции) с заданными целями или параметрами для условий входных данных (граничных условий, вентиляторов, начальных условий и т.д.) в качестве переменных.

Ленточная панель Целостность питания

Доступ к настройкам задач целостности питания.

Анализ

- **Падение напряжение** : Доступ к настройкам расчета **Падение напряжение** .
- **PDN импеданс** : Доступ к настройкам расчета **PDN импеданс** .

Условия

- **VRM** : Открывает меню Структура, где можно задать VRM.
- **Потребитель** : Открывает меню Структура, где можно задать Потребитель.
- **Дискретный компонент** : Открывает меню Структура, где можно задать Дискретные компоненты.
- **Развязывающие конденсаторы** : Открывает меню Структура, где можно задать Развязывающие конденсаторы.

Сетка

Плата

Моделирование

Целостность питания > Моделирование > Развертка по частоте

Ленточная панель Расчет

Обеспечивает доступ к настройкам решателя.

- **Вычислительные ресурсы** : Доступ к настройкам вычислительных ресурсов.
- **Сетка** : Содержит настройки сетки.
- **Запустить** : Запуск расчета для текущего проекта
- **Стоп** : Останавливает расчет.

Ленточная панель Результаты

Эта панель содержит инструменты обработки результатов.

- **Загрузить** : Позволяет загрузить текущие результаты расчета или загрузить их из файла.
- **Визуализация ПП** : Позволяет визуализировать результаты моделирования.
- **Расчетные данные ПП** : Позволяет отобразить результаты моделирования в виде таблицы.
- **Кривая импеданса** : Позволяет распечатать кривую импеданса.
- **Картина в сечении** : Отображает распределение параметра в сечении.
- **Картина на поверхности** : Отображает распределение параметра на выбранных гранях или поверхностях модели.
- **Измерение в точке** : Позволяет проверить значение параметров в каждой точке графической области. Выберите этот инструмент и переместите курсор мыши в соответствующую точку, чтобы увидеть значение.

Вкладки

В левой части окна отображается вертикальная панель с вкладками. В этом разделе описывается функциональность каждой вкладки.

- Вкладка **Геометрия** : Открывает панель с деревом компонентов.
- Вкладка **Исследования** : Открывает панель с расчетами, включенными в проект.
- Вкладка **Печатная плата** : Открывает вкладки Слои, Компоненты и Цепи со списками элементов.
- Вкладка **Анализ** : Открывает вкладку, на которой отображается тип анализа, заданный для проекта.
- Вкладка **Тепловой анализ** : Открывает панель настроек теплового анализа (доступна только когда выбран Тепловой анализ).

- Вкладка **Целостность питания** : Отображает настройки анализа целостности питания (доступна только когда выбран тип анализа Целостность питания).
- Вкладка **Результаты** : Открывает панель результатов.

Печатные платы Панель

Панель Печатные платы, расположенная в левой части окна Power SIM, позволяет проверить свойства печатной платы.

В разделе **Печатные платы** можно увидеть список импортированных печатных плат. Выберите печатную плату для работы.

позволяет показать или скрыть плату.

позволяет показать или скрыть систему координат.

Препроцессинг

В этом разделе рассматриваются необходимые шаги подготовки к расчету.

Создание нового проекта и импорт файлов PCB.

Сначала создайте файл проекта с расширением *.smtdoc, в котором будет храниться вся информации, связанная с проектом.

1. Можно создать проект двумя способами:
 - В ленточной панели выберите Файл > Файл > Новый.
 - В меню выберите Файл > Новый.
2. В окне **Сохранить как** выберите папку и задайте имя проекту.
Новый проект создан.
3. Импорт файла топологии печатной платы в проект:
 - В ленточной панели выберите Файл > Файл > Добавить файл EDA.

Теперь можно перейти к следующему этапу - [Задание настроек с помощью Менеджера свойств. \(на странице 13\)](#).

Задание настроек с помощью Менеджера свойств.

В этом разделе рассмотрим следующие шаги после создания проекта.

При открытии созданного проекта в правой части рабочей области появляется окно Менеджер свойств. Менеджер свойств позволяет применять к проекту различные настройки, включая тип задачи, параметры геометрии и настройки теплового анализа.



Примечание:

Настройки теплового анализа особенно существенны для проектов, которые включают только задачи гидродинамики, теплопроводности и сопряженного теплообмена.

В следующих разделах рассмотрим, как использовать эти параметры для настройки вашего проекта.

Задание типа задачи

Когда проект создан можно задать тип задачи. При открытии проекта в левой части рабочей области появляется окно Менеджер свойств.

Задание типа задачи:

1. В Менеджере свойств выберите вкладку **Анализ**.
2. На этой вкладке расположены четыре переключателя для включения/выключения каждого типа задачи:
 - **Течение жидкости/газа**. Используйте этот переключатель для задач с течением жидкости/газа.
 - **Теплопроводность**. Используйте этот переключатель для задач сопряженного теплообмена между твердыми телами и текучими средами.
 - **Радиационный теплообмен**. Используйте этот переключатель для задач радиационного теплообмена между телами.
 - **Целостность питания**. Используйте этот переключатель для расчетов падения напряжения или PDN импеданса. Когда включен, появляются кнопки **Падение напряжения** и **PDN импеданс**. Выберите необходимый переключатель.

Задание геометрии

При открытии проекта в левой части рабочей области появляется окно Менеджер свойств.

Конфигурирование геометрии:

1. В Менеджере свойств выберите вкладку .
2. На этой вкладке можно задать конфигурацию геометрии и просмотреть список компонентов:
 - В разделе **Конфигурация** выберите конфигурацию геометрии для вашего проекта.
 - В разделе **Компоненты** отображается список компонентов геометрии. При выборе компонента из списка в графической области будет подсвечиваться соответствующая часть геометрии.

Задание теплового анализа

При открытии проекта в левой части рабочей области появляется окно Менеджер свойств.

Настройка теплового анализа:

1. В Менеджере свойств выберите вкладку .
2. На этой вкладке можно задать материалы и расчетную область для геометрии и просмотреть список компонентов:
 - В разделе **Компоненты** отображается список компонентов геометрии. При выборе компонента подсвечивается соответствующая часть графической области.
 - В разделе **Материалы** можно задать материал детали:
 - Нажмите на кнопку **Создать новый материал**.
 - Появится окно для нового **Материал** :
 - Щелкните поле ввода **Выбор геометрии** и в графической области выберите нужную геометрию.
 - В раскрывающемся меню **Материал по умолчанию** выберите материал для заданной геометрии.
 - Чтобы применить изменения, нажмите кнопку **ОК**.
 - Расчетная область для проекта задается в разделе **Расчетная область**.
 - Нажмите на кнопку **Расчетная область** и выберите **Изменить**.
 - Появится окно для новой **Расчетная область** :
 - Задайте размер расчетной области.
 - Чтобы применить изменения, нажмите кнопку **ОК**.
 - Нажмите на кнопку **Расчетная область** и выберите **Показать/Скрыть** для переключения видимости расчетной области в графической области.

Задание слоев

При открытии проекта в левой части рабочей области появляется окно Менеджер свойств.

Настройка слоев:

1. В Менеджере свойств выберите вкладку **Слои**.
2. На этой вкладке отображается список слоев вашего проекта. Чтобы изменить значения параметров **Имя** и **Толщина**, дважды щелкните по ним.

Задание компонентов

При открытии проекта в левой части рабочей области появляется окно Менеджер свойств.

Настройка компонентов:

1. В Менеджере свойств выберите **Компоненты**.
2. На этой вкладке отображается две группы компонентов из проекта в виде списка. Активные и Неактивные компоненты. Дважды щелкните на **Условное обозначение** и **Номер детали**, чтобы изменить их значение.

Задание цепей

При открытии проекта в левой части рабочей области появляется окно Менеджер свойств.

Задание цепей:

1. В Менеджере свойств выберите вкладку **Цепи**.
2. На этой вкладке отображается список слоев цепей вашего проекта. Можно изменить тип цепей на **Земля, Сигнал, Питание или Без имени**.

Целостность питания

Чтобы задать граничные условия для задачи целостности питания, перейдите ленточную панель «Целостность электропитания» и следуйте инструкциям:

[Задание потребителя тока \(на странице 19\)](#)

[Задание VRM \(на странице 19\)](#)

[Задание дискретного компонента \(на странице 20\)](#)

[Задание развязывающего конденсатора \(на странице 20\)](#)

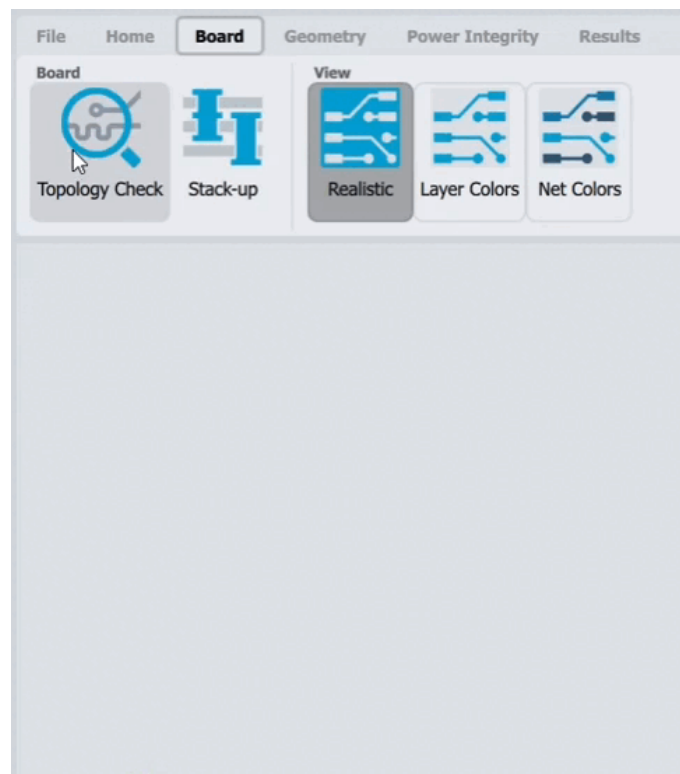
Задание свойств платы

В этом разделе рассмотрим возможность Power SIM задавать свойства печатной платы.

Проверка топологии

Эта опция проверяет, разделилась ли дорожка печатной платы на несколько топологически несвязанных областей.

1. В ленточной панели выберите **Плата > Плата > Проверка топологии**.
2. В разделе **Выбор цепи** укажите тип цепи для проверки или выберите **Все**, чтобы проверить все имеющиеся цепи.
3. Нажмите кнопку **Проверить**.
4. В разделе **Разрывы цепей** найдите список имен **Разрывов цепей** и количество несвязанных расчетных областей (**Количество регионов**).



Структура

Инструменты структуры платы позволяет: проверить структуру печатной платы, задать свойства, проверить или изменить толщину слоя, задать тип слоя: CORE или Pre-PREG.

1. В ленточной панели выберите **Плата > Плата > Структура**.
2. Выберите единицы измерения, установив флажок **Единицы измерения**.
3. Для опции **Свойства препрега** выберите **Автоматический режим** или **Задано пользователем**:
 - a. **Автоматический режим. Диэлектрическая постоянная и Тангенс угла потерь** для ячеек проводящих материалов недоступны для задания вручную и будут рассчитаны автоматически.
 - b. **Задано пользователем. Диэлектрическая постоянная и Тангенс угла потерь** для ячеек проводящих материалов будут доступны для задания пользователем.
4. В строке **Слои** отображается список имен слоев диэлектрика и металлизации, импортированных из файла топологии.
5. В строке **Толщина** дважды щелкните по значению толщины слоя, чтобы изменить его.
6. В строке **Материал** дважды щелкните тип материала и из раскрывающегося меню выберите тип материала.
 - a. Для слоев металлизации доступны следующие типы материалов:
 - i. Алюминий
 - ii. Медь
 - iii. Золото
 - b. Для слоев диэлектрика доступны следующие типы материалов:
 - i. FR4
 - ii. Полиамид
7. В строке **Тип** дважды щелкните тип слоя и из раскрывающегося меню выберите тип слоя.

Для слоев диэлектрика выберите Pre-PREG или CORE. Для слоев металлизации доступен только тип Фольга.
8. В строке **Проводимость** можно задать значение проводимости слоя металлизации. Нажмите на кнопку и в окне **Редактор зависимостей** задайте значение проводимости как постоянную или функцию.
9. В строке **Диэлектрическая постоянная** задается значение диэлектрической постоянной для диэлектрических слоев. Нажмите на кнопку и в окне **Редактор**

зависимостей задайте значение диэлектрической постоянной: постоянная или функция.

10. В строке **Тангенс угла потерь** задается значение тангенса угла потерь для слоев диэлектрика. Нажмите на кнопку и в окне **Редактор зависимостей** задайте значение для тангенса угла потерь: постоянная или функция.



Примечание:

При изменении значений Проводимости, Диэлектрической постоянной или Тангенса угла потерь, в базе данных материалов появляется новый тип материала с новыми свойствами и префиксом "-сору".

Вид печатной платы

Для удобства можно изменить вид печатной платы.

В ленточной панели выберите **Плата > Показать** и выберите **Реалистичная, Цвета слоев** или **Цвета цепей**.

Задание потребителя тока

Чтобы задать потребитель тока, выполните следующие шаги:

1. В ленточной панели выберите **Целостность питания > Условия > Потребитель**.
2. В нижней части окна программы появится окно Структура.
3. В разделе **Выбрать цепи** выберите пару цепей для задания Потребителя.
4. В разделе **Выбрать компоненты** выберите компоненты для Потребителя.
5. В разделе **Свойства потребителя**, укажите распределение тока, значение, ожидаемое напряжение и допуск по нижней границе.
6. В разделе **Контактные площадки компонента** выберите распределение тока для каждой контактной площадки.
7. Нажмите **ОК**, чтобы сохранить и завершить. Или нажмите **Создать**, чтобы создать еще одно условие Потребителя.

Задание VRM

Чтобы задать VRM, следуйте следующим инструкциям:

1. В ленточной панели выберите **Целостность питания > Условия > VRM**.
2. В нижней части окна программы появится окно Структура.
3. В разделе **Выбрать цепи** выберите пару цепей для задания VRM.
4. В разделе **Выбрать компоненты** выберите компоненты для VRM.
5. В разделе **Свойства VRM** задайте напряжение.
6. В разделе **Контактные площадки компонента** выберите распределение напряжения для каждой контактной площадки.
7. Нажмите **ОК**, чтобы сохранить и завершить. Или нажмите **Создать**, чтобы создать еще одно условие VRM.

Задание дискретного компонента

Чтобы задать параметры дискретного компонента, следуйте следующим инструкциям:

1. В ленточной панели выберите **Целостность питания > Условия > Дискретный компонент**.
2. В нижней части окна программы появится окно Структура.
3. В разделе **Выбрать цепи** выберите пару цепей для задания дискретного компонента.
4. В разделе **Выбрать Компоненты** выберите компоненты для дискретного компонента.
5. В разделе **Свойства дискретного компонента** укажите модель, задайте значения для параметров Сопротивление, Максимальный ток и Допуск.
6. В разделе **Контактные площадки компонента** выберите распределение для каждой контактной площадки.
7. Нажмите **ОК**, чтобы сохранить и завершить. Или нажмите **Создать**, чтобы создать еще одно условие дискретного компонента.

Задание развязывающего конденсатора

Чтобы задать параметры Развязывающего конденсатора, следуйте следующим инструкциям:



Примечание:

Эта опция доступна только для анализа целостности питания.

1. В ленточной панели выберите **Целостность питания > Условия > Развязывающие конденсаторы**.
2. В нижней части окна программы появится окно Структура.
3. В разделе **Выбрать цепи** выберите пару цепей для задания дискретного компонента.

4. В разделе **Выбрать Компоненты** выберите компоненты для дискретного компонента.
5. В разделе **Свойства развязывающих конденсаторов**, укажите модель, емкость, значения ESR и ESL.
6. В разделе **Контактные площадки компонента** выберите распределение для каждой контактной площадки.
7. Нажмите **ОК**, чтобы сохранить и завершить. Или нажмите **Создать**, чтобы создать еще одно условие дискретного компонента.

Развертка по частоте

Опция **Развертка по частоте** в Power SIM позволяет моделировать поведение цепи в диапазоне частот. Доступен выбор двух режимов: **Адаптивный** — для подробного анализа или **Равномерный** для согласованности точек данных, что полезно для сравнения результатов.

Настройки диапазона

Табл. 1.

Параметр	Описание	Значение по умолчанию
Начальная частота	Задаёт начальную частоту для развертки	100 МГц
Конечная частота	Задаёт конечную частоту для развертки	3 ГГц

Режимы для Шага по частоте

Раздел **Шаг по частоте** позволяет задать распределение точек по частоте. Для переключения между двумя режимами используйте сегментированную кнопку.

Адаптивный режим

Адаптивный режим использует интеллектуальный алгоритм для автоматического определения расположения дополнительных частотных точек с целью обеспечить более высокое разрешение в рассматриваемых областях, например, вокруг резонансных пиков. Это рекомендуемый режим по умолчанию для общего анализа.

- Уровень дробления: Этот ползунок управляет чувствительностью адаптивного алгоритма. Более высокое значение приведет к более плотному распределению частотных точек. В результате, расчет будет более подробным, но более длительным.
- Диапазон: 0 - 10
- По умолчанию: 6

Равномерный режим

Равномерный режим использует постоянный шаг по частоте во всем диапазоне частот. Это полезно для создания наборов данных с равномерно распределенными точками, что упрощает сравнение результатов расчета с данными, полученными из других программных продуктов.

- Значение: Введите необходимый размер шага по частоте.
- Диапазон: Любое положительное значение (> 0)
- По умолчанию: 10 МГц
- Единица измерения: МГц

Задание развертки по частоте

Эта опция обеспечивает анализ частотного отклика для оценки и характеристики отклика цепи в диапазоне различных частот.

Опция Развертка по частоте в позволяет моделировать поведение цепи в диапазоне частот. Доступен выбор двух режимов: Адаптация — для подробного анализа или Равномерный для согласованности точек данных, что полезно для сравнения результатов.

1. В ленточной панели выберите **Целостность питания > Моделирование > Развертка по частоте**.
2. Откроется окно **Развертка по частоте**.
3. В разделе **Частотный диапазон** для анализа частотного отклика задайте Начальную частоту, Конечную частоту и Уровень дробления.
4. Нажмите кнопку **ОК**.

Тепловой анализ

Задание настроек окружающей среды

После задания настроек в Менеджере свойств можно задать настройки окружающей среды для проекта.

Настройки окружающей среды включают такие параметры, как Воздух, Твердые тела, Скорость и Турбулентность, в зависимости от тип выбранной задачи.

Чтобы задать настройки окружающей среды:

1. В ленточной панели выберите:
 - Тепловой анализ > Общие > Окружающая среда, если проект включает только задачи гидродинамики, теплопроводности и сопряженного теплообмена.
 - Главная страница > Общие > Окружающая среда для всех других задач.
2. В Менеджере свойств выберите вкладку **Окружающая среда**.
3. На этой вкладке можно задать параметры Воздух, Твердые тела, Скорость и Параметры турбулентности:
 - В разделе **Воздух** можно задать начальные значения **Температуры** и **Давления**.
 - В группе **Твердые тела** можно задать **Начальную температуру твердого тела**.



Напоминание:

Настройка **Начальной температуры твердого тела** доступна только с включенной опцией **Теплопроводность**.

- Параметр **Скорость** позволяет задать начальную скорость в направлении X, Y, Z.
 - В разделе **Параметры турбулентности** можно задать соответствующие параметры. Можно задать **Интенсивность и масштаб турбулентности** или **Диссипация и энергия турбулентности**.
4. Нажмите кнопку **ОК** на вкладке **Окружающая среда**, чтобы сохранить и применить настройки.

Материалы

Создание **материала** позволяет задать материал, который отличается от материала по умолчанию для конкретного компонента.

Ограничение:

Эта функциональность доступна, только когда включена опция Теплопроводность.

Можно задать материал для компонента или нескольких компонентов.

Свойства конструкционных материалов, которые требуются для расчета, берутся из Power SIM **Базы данных материалов**, где они могут быть **Предопределенными** (встроенными в Power SIM) или **Заданными пользователями** Power SIM. Такими свойствами являются удельная теплоемкость, теплопроводность, радиационные свойства, электропроводность, удельное электрическое сопротивление, контактное тепловое сопротивление и т.д.

Задание материала

Можно задать материал следующим образом:

1. В ленточной панели **Тепловой анализ** или **Целостность питания** нажмите **Общие > Материалы**.
2. Откроется вкладка **Материал**.
3. В группе **Выбор геометрии** выберите необходимую геометрию.
4. В разделе **Материал** выберите материал из базы данных материалов.

Области текучей среды

Области текучей среды — это область, заполненная одним или несколькими материалами одного типа. Существует два типа областей текучей среды:

- **Глобальная область текучей среды**. Позволяет задать жидкость/газ для всей **Расчетной области**.
- **Локальная область текучей среды**. Позволяет выбрать замкнутую область текучей среды и определить **Область текучей среды** с типом текучей среды.

Чтобы определить области текучей среды перейдите к

- Тепловой анализ > Общие > Глобальная область текучей среды.
- Тепловой анализ > Общие > Локальная область текучей среды.

Задание Глобальная область текучей среды

Задайте Глобальная область текучей среды следующим образом:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Общие > Глобальная область текущей среды**.
2. В разделе **Текущая среда** задайте следующие параметры:
 - a. Нажмите для поиска материала в **Библиотеке**.
 - b. Укажите относительные концентрации жидкостей как **Массовые** или **Объемные концентрации**.
3. В группе **Свойства** задайте следующие параметры:
 - a. Задайте начальную статическую **Температуру** среды.
 - b. Задайте начальное статическое **Давление**.
4. В разделе **Скорость внешней среды** задайте вектор скорости.
5. В группе **Опции** выберите тип течения **Ламинарное** или **Турбулентное**. По умолчанию используются оба типа.
6. Нажмите кнопку **ОК**.

Задание Локальная область текущей среды

Чтобы задать Локальная область текущей среды, выполните следующие шаги:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Общие > Локальная область текущей среды**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите грани, для которых необходимо указать локальные свойства жидкости.
3. В группе **Свойства** задайте следующие параметры:
 - a. Задайте начальную статическую **Температуру** среды.
 - b. Задайте начальное статическое **Давление**.
4. В разделе **Скорость внешней среды** задайте вектор скорости.
5. В группе **Опции** выберите тип течения **Ламинарное** или **Турбулентное**. По умолчанию используются оба типа.
6. Нажмите кнопку **ОК**.

Расчетная область

Расчетная область представляет собой пространство, в котором проводятся расчеты течения и теплопередачи. При создании нового проекта с помощью Power SIM автоматически создается Расчетная область модели. Расчетная область строится как для трехмерных, так и для двумерных задач и представляет собой прямоугольный параллелепипед. Границы расчетной области параллельны плоскостям **глобальной системы координат**.

Во **Внешних** задачах плоскости, ограничивающие расчетную область, автоматически располагаются на некотором расстоянии от модели.

Во **Внутренних** задачах плоскости, ограничивающие расчетную область, автоматически захватывают всю модель (если **Теплопроводность** учитывается) или только проточные каналы модели (если **Теплопроводность** не учитывается, а **Течение жидкости/газа** учитывается).

Задание расчетной области

Задайте расчетную область, как описано ниже:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Общие > Расчетная область**.
2. Открывается окно **Расчетная область**.
3. В разделе **Размер** задайте размер расчетной области.
4. Нажмите кнопку **ОК**.

Тепловые условия

Задание граничного условия типа Вход

Условие **Вход** позволяет создавать граничные условия втекающего потока на выбранных поверхностях, контактирующих с жидкостью, как для **Внутренних**, так и **Внешних** задач.

Чтобы задать граничное условие **Вход**, выполните следующие шаги:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Условия > Вход**.
2. В графической области, в разделе **Выбор геометрии** выберите поверхности, на которых необходимо задать граничное условие.
Для глобальной **Системы координат** выберите базовую ось.
3. В разделе **Область текучей среды** задайте относительные концентрации жидкостей:
Массовые или **Объемные концентрации**.
4. В группе **Свойства** задайте следующие параметры:
 - a. **Граничное условие: Объемный расход**. Позволяет задать **Объемный расход** и **Температуру** жидкости в **Области текучей среды**.
 - b. **Граничное условие: Скорость**. Позволяет задать **Скорость по нормали к поверхности** и **Температуру**.

- c. **Граничное условие: Массовый расход.** Позволяет задать **Массовый расход** и **Температуру**.
- d. **Граничное условие: Избыточное давление.** Это условие трактуется программой Power SIM как полное давление на входе в модель и статическое на выходе. Избыточное давление рассчитывается по формуле:

$$P_{gauge} = P_{absolute} - P_{ambient}$$

5. В разделе **Направление** задайте параметры втекающего потока, выбрав один из следующих способов задания вектора скорости или направления и задав значения соответствующих параметров:

- Тип **По нормали** означает, что направление течения перпендикулярно поверхности, представляющей вход.
- Тип **Закрученный поток** позволяет задать закрутку потока вокруг оси базовой системы координат, указанной в группе **Выбор геометрии**.

Укажите следующие составляющие вектора скорости закрученного потока относительно **Базовой оси**:

- **Угловая скорость** коллинеарна **Базовой оси**.
- **Радиальная скорость** направлена по нормали к **Базовой оси**.
- **Z-компонента** касательная к окружности, проведенной вокруг **Базовой оси**.
- Тип **Угол** позволяет задать вектор скорости или направления потока с помощью его составляющих в направлениях X, Y и Z.

6. В разделе **Цели** можно выбрать **Цели**, которые будут связаны с граничным условием.

7. Нажмите кнопку **ОК**.

Задание граничных условий типа Выход

Граничные условия типа Выход позволяет создать граничные условия вытекающего потока на выбранных поверхностях, контактирующих с текучей средой, для **Внутренних** и **Внешних** задач. Чтобы задать граничное условие **Выход**, выполните следующие шаги:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Условия > Выход**.
2. В графической области, в разделе **Выбор геометрии** выберите поверхности, на которых необходимо задать граничное условие.
Для глобальной **Системы координат** выберите базовую ось.

3. В разделе **Область текучей среды** задайте относительные концентрации жидкостей: **Массовые** или **Объемные концентрации**.
4. В группе **Свойства** задайте следующие параметры:
- a. **Граничное условие: Объемный расход.** Позволяет задать **Объемный расход** жидкости в **Области текучей среды**.
 - b. **Граничное условие: Скорость.** Позволяет задать **Скорость по нормали к поверхности**.
 - c. **Граничное условие: Массовый расход.** Позволяет задать **Массовый расход**.
 - d. **Граничное условие: Избыточное давление.** Это условие трактуется программой Power SIM как полное давление на входе в модель и статическое на выходе. Избыточное давление рассчитывается по формуле:

$$P_{gauge} = P_{absolute} - P_{ambient}$$

5. В разделе **Направление** задайте параметры вытекающего потока, выбрав один из следующих способов задания вектора скорости или направления и задав значения соответствующих параметров:
- Тип **По нормали** означает, что направление течения перпендикулярно поверхности, через которую вытекает поток.
 - Тип **Закрученный поток** позволяет задать закрутку потока вокруг оси базовой системы координат, указанной в группе **Выбор геометрии**.

Укажите следующие составляющие вектора скорости закрученного потока относительно **Базовой оси**:

- **Угловая скорость** коллинеарна **Базовой оси**.
 - **Радиальная скорость** направлена по нормали к **Базовой оси**.
 - **Z-компонента** касательная к окружности, проведенной вокруг **Базовой оси**.
 - Тип **Угол** позволяет задать вектор скорости или направления потока с помощью его составляющих в направлениях X, Y и Z.
6. В разделе **Цели** можно выбрать **Цели**, которые будут связаны с граничным условием.
7. Нажмите кнопку **ОК**.

Задание условий на стенках

Тип **Стенка Граничных условий** позволяет создать непроницаемые граничные условия на выбранных поверхностях, контактирующих с текучей средой, для **Внутренних** и **Внешних**

задач. По умолчанию все поверхности тел, за исключением тех, на которых заданы входные или выходные условия течения являются непроницаемыми. Для задач с граничным условием Выход тепловые условия на стенках могут быть созданы на выбранных внешних стенках.

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Условия > Стенка**.
2. В графической области, в разделе **Выбор геометрии** выберите поверхности, на которых необходимо задать граничное условие.
3. В разделе **Свойства** укажите **Коэффициент теплоотдачи** поверхности тела, **Текущую среду** и **Температуру стенки**.
4. В разделе **Цели** можно выбрать **Цели**, которые будут связаны с граничным условием.
5. Нажмите кнопку **ОК**.

Задание вентилятора

Вентилятор является одним из типов граничных условий. Условие **Вентилятор** можно задать на выбранной поверхности твердого тела, где не заданы **Условия** или **Тепловые источники**.

Вентилятор рассматривается как идеальное устройство, создающее **Объемный** (или **Массовый**) **расход** (с возможными завихрениями) в зависимости от разницы входных и выходных давлений, усредненных на выбранной поверхности. Пользователь может выбрать существующий вентилятор из **Библиотек** или создать пользовательский вентилятор, указав его параметры.

Можно задать вентиляторы следующих типов:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Условия > Вентилятор**.
2. В группе **Тип** задайте вентиляторы следующих типов:
 - **Входной внешний вентилятор**. Вентилятор этого типа создает поток, втекающий в модель, и используется как граничное условие на входе. **Входной внешний вентилятор** следует задавать на внутренней поверхности модели, где изначально установлен вентилятор.
 - **Выходной внешний вентилятор**. Вентилятор этого типа создает поток, вытекающий из модели, и используется как граничное условие на выходе. **Выходной внешний вентилятор** следует задавать на внутренней поверхности заглушки, закрывающей выход, в котором в модели изначально установлен вентилятор.

- **Внутренний вентилятор.** Вентилятор этого типа расположен внутри модели, при этом один его набор поверхностей используется для входа, а другой — для выхода. Поскольку и входные, и выходные поверхности **Внутреннего вентилятора** контактируют с текучей средой внутри расчетной области, то перепад статических давлений на входе и выходе определяет проточное сечение в соответствии с характеристиками выбранного вентилятора.
3. В разделе **Выбор геометрии**, выберите поверхности, для которых будет задано условие Вентилятор:
- При задании **Входного внешнего вентилятора** в графической области выберите поверхности, на которых необходимо задать вентилятор.
 - При задании **Выходного внешнего вентилятора** в графической области выберите поверхности, на которых необходимо задать вентилятор.
 - Для **Внутреннего вентилятора** в группе **Входные поверхности** выберите поверхности вентилятора с внутренней стороны в графической области. Затем в разделе **Внешний вентилятор** выберите поверхности на выходной стороне вентилятора.
4. В группе **Вентилятор** выберите нужный вентилятор из списка *Предопределенных* или *Заданных пользователем* вентиляторов, доступных в **Библиотеке**.
5. В разделе **Термодинамические параметры** укажите параметры потока вентилятора, которые не входят в определение вентилятора в **Библиотеке**. Эти параметры становятся доступными в зависимости от настроек задачи и типа вентилятора.
6. В разделе **Цели** можно выбрать **Цели**, которые будут связаны с граничным условием.
7. Нажмите кнопку **ОК**.

Тепловой источник

Эта возможность позволяет задать физический параметр, вычисляемый на выбранных поверхностях.

Тепловые источники можно задать на поверхности (**Поверхностные тепловые источники**) или в объеме текучей среды или твердого тела (**Объемные тепловые источники**).

- Для **Поверхностного теплового источника** можно задать источники тепла на поверхностях тел следующими способами:
 - В виде **Теплового потока** или **Плотности теплового потока** (если опция **Теплопроводность** отключена, а опция **Течение жидкости/газа** включена на вкладке **Тип задачи**;
 - В виде **Мощности тепловыделения** или **Удельной мощности поверхностного тепловыделения** (если опция **Теплопроводность** включена на вкладке **Тип задачи**).

В обоих случаях положительное значение означает выделение тепла, а отрицательное — поглощение тепла.

Ограничение:

Поверхностный тепловой источник не может быть задан на поверхностях тел компонентов с нулевой теплопроводностью.

- В **Объемном тепловом источнике** можно задать внутренние (объемные) тепловые источники в виде **Температуры**, **Мощности тепловыделения** или **Объемной мощности тепловыделения**.

В обоих случаях положительное значение означает выделение тепла, а отрицательное — поглощение тепла.

Можно задать **Объемный тепловой источник** для компонента (детали или под сборки в сборках), который рассматривается как твердое тело или текучая среда.

Если компонент трактуется как твердое тело, то задать в нем объемный тепловой источник можно только в том случае, если в задаче рассматривается теплопроводность в твердых телах. Если компонент должен рассматриваться как текучая среда, необходимо отключить этот компонент в диалоговом окне Расчетная область.

Задание поверхностного теплового источника

Чтобы задать поверхностный тепловой источник, выполните следующие действия:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Тепловые источники > Поверхность**.
2. Откроется окно **Поверхностный тепловой источник**.
3. В разделе **Выбор геометрии** выберите поверхности, на которые будет применен тепловой источник.
4. В разделе **Поверхностный тепловой источник** выберите кнопку **Полный** или **Поверхность**.
 - Выберите **Полный**, чтобы задать суммарный поток энергии.
 - Выберите **Поверхность**, если требуется задать расход энергии на единицу площади.
5. В разделе **Цели** задайте для проекта необходимые физические параметры.
6. Нажмите кнопку **ОК**.

Задание объемного теплового источника

Задайте объемный тепловой источник следующим образом:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Тепловые источники > Объем**.
2. Откроется окно **Объемный тепловой источник**.
3. В разделе **Выбор геометрии** выберите поверхности, на которые будет применен объемный тепловой источник.
4. В разделе **Объемный тепловой источник** выберите кнопку **Полный** или **Объемный**.
 - Выберите **Полный**, чтобы задать суммарный поток энергии.
 - Выберите **Объемный**, если требуется задать расход энергии на единицу объема.
5. В разделе **Цели** задайте для проекта необходимые физические параметры.
6. Нажмите кнопку **ОК**.

Цели

Изначально любая стационарная задача трактуется в Power SIM как нестационарная. Решатель выполняет итерации с заданным шагом по времени для достижения установившегося решения. Чтобы определить момент достижения установившегося решения и остановить расчеты, необходимо задать критерий остановки расчета.

В Power SIM имеются встроенные критерии для остановки процесса расчета, но пользователю рекомендуется использовать собственные критерии, которые называются Целями. Цели представляют собой физические параметры, необходимые для вашего проекта. Их сходимость указывает на достижение установившегося решения.

**Примечание:**

Сходимость целей является одним из условий завершения расчета. Для получения дополнительной информации обращайтесь к разделу Остановка расчета в документации Power SIM.

**Примечание:**

Задание целей позволяет не только предотвратить ошибки при расчете значений этих параметров, но и сократить общее время расчета задачи. Можно отслеживать поведение сходимости целей во время расчетов и вручную останавливать процесс, если дальнейшие итерации не требуются.

Индикатор сходимости цели является качественной и количественной характеристикой процесса сходимости цели. Программа Power SIM оценивает сходимость целей, вычисляя амплитудное отклонение, **дельту**, на интервале расчета с момента последней итерации.

Дельта сравнивается с критерием сходимости целей, который может быть задан пользователем или автоматически программой Power SIM. Отношение критерия к дельте выражается в процентах, называется индикатором сходимости и отображается на панели сходимости.

Для каждой цели можно указать, будет ли она использоваться для контроля сходимости (опция Исп. для сход.). Цели, не используемые для контроля сходимости, не повлияют на завершение расчета. Процесс может завершиться до того, как эти цели сойдутся. Такие цели используются исключительно для информации.

Цели, не используемые для контроля сходимости, отмечены желто-красным значком в дереве Power SIM анализ. Кроме того, индикатор сходимости для этих целей не отображаются в диалоговых окнах мониторов График целей и Таблица целей.

Типы целей

В Power SIM доступны следующие типы целей:

1. **Глобальная цель** (на странице 34): Физический параметр, вычисляемый по всей расчетной области.
2. **Точечная цель** (на странице 35) Физический параметр, вычисляемый в точке, заданной пользователем.
3. **Поверхностная цель** (на странице 36) Физический параметр, вычисляемый на поверхности модели, заданной пользователем.

4. **Объемная цель** (на странице 37) физический параметр, вычисляемый в указанных объемах внутри расчетной области, применимый к жидкостям или твердым телам в задачах сопряженного теплообмена.
5. **Цель-уравнение** (на странице) Цель, определяемая уравнением (с использованием базовых математических функций) с другими целями или входными параметрами (например, граничными условиями, начальными условиями и т. д.) в качестве переменных.

Для задачи можно задать столько целей, сколько необходимо.

Глобальная цель

Эта возможность позволяет задать физический параметр, вычисляемый во всей **Расчетной области**.

Для параметров, не являющихся интегральными (например, “Статическое давление”, “Полное давление” и т. д.), можно также выбрать значение параметра, которое будет использоваться в качестве глобальной цели. Все значения вычисляются по всей **Расчетной области**.

Доступны следующие значения параметров:

- минимальное (**Min**);
- среднее (**Av**)

$$\frac{\sum_{cells} A_i \cdot dV_i}{\sum_{cells} dV_i}$$

где A_i — усредненный параметр (например, температура), dV_i — объем i -й ячейки. Суммирование производится по всем ячейкам в расчетной области.

- максимальное (**Max**);
- среднемассовое (**Bulk av.**).

$$\frac{\sum_{cells} A_i \cdot \rho_i \cdot dV_i}{\sum_{cells} \rho_i \cdot dV_i}$$

где ρ_i — плотность i -й ячейки.

Задание глобальных целей

Глобальные цели вычисляются по всей расчетной области. Для параметров, не являющихся интегральными (например, Статическое давление, Полное давление), можно выбрать значение:

- Минимальное (Min)
- Среднее (Av)
- Максимальное (Max)
- Среднемассовое (Bulk av.)

Задайте глобальную цель следующим образом:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Цели > Глобальная цель**.
2. Выберите необходимые параметры из таблицы **Параметров**.
3. Выберите значение для параметров, не являющихся интегральными Min, Av, Max, or Bulk av.)
4. Нажмите кнопку **ОК**.

Новые **Глобальные цели (GT)** появляются во вкладке **Тепловой анализ**. Чтобы изменить **Цель**, нажмите правой кнопкой на **Цель** и выберите **Изменить**.

Точечная цель

Точечные цели вычисляются в конкретных точках, которые определяются с помощью ссылки или явных координат.

Задание точечной цели

Задайте точечную цель следующим образом:

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Цели > Точечная цель**.
2. В разделе **Точки** задайте координаты точки.
3. В разделе **Параметры** выберите необходимые параметры.
4. Нажмите кнопку **ОК**.

Новая **Точечная цель (РТ)** появляется во вкладке **Тепловой анализ**. Чтобы изменить **Цель**, нажмите правой кнопкой на **Цель** и выберите **Изменить**.

Поверхностная цель

Эта возможность позволяет задать физический параметр, вычисляемый на выбранных поверхностях.

- Для параметров, не являющихся интегральными (например, *“Статическое давление”*, *“Полное давление”* и т. д.), можно также выбрать значение параметра, которое будет использоваться в качестве поверхностной цели. Все значения вычисляются на выбранных поверхностях.

Доступны следующие значения параметров:

- минимальное (**Min**);
- среднее (**Av**)

$$\frac{\sum_{cells} A_i \cdot dS_i}{\sum_{cells} dS_i}$$

где A_i – усредненный параметр (например, *“Температура”*), dS_i – площадь пересечения для i -й ячейки. Суммирование производится по всем ячейкам, пересекающимся с поверхностью.

- максимальное (**Max**);
- среднемассовое (**Bulk av.**).

$$\frac{\sum_{cells} A_i \cdot |\rho_i \cdot v_i \cdot dS_i|}{\sum_{cells} |\rho_i \cdot v_i \cdot dS_i|}$$

где ρ_i и v_i – плотность и компонент скорости по нормали к поверхности в i -й ячейке соответственно.

В отличие от **Среднего значения**, при расчете которого учитывается только площадь поперечного сечения, **Среднемассовое значение** – это значение, усредненное по потоку, протекающему через поперечное сечение, т.е. при расчете учитывается также массовый расход.

Например, требуется рассчитать температуру несжимаемой текучей среды, протекающей через поперечное сечение трубы. В этом случае температура в ядре потока выше температуры в пристеночных областях, где скорость потока ниже. Таким образом, большая часть текучей среды с высокой температурой сосредоточена в центре потока. При расчете **Среднего** значения предполагается, что вес (относительное влияние) ячеек с низкой температурой и вес ячеек с высокой температурой одинаковы. Если общая площадь пристеночных ячеек (с низкой температурой) является значительной по отношению к площади поперечного сечения трубы, то полученное значение будет ниже действительного значения, полученного, например, в эксперименте. **Среднемассовое** значение температуры в этом случае будет выше, т.к. влияние пристеночных ячеек с низкой температурой и низким массовым расходом является менее существенным, чем влияние ячеек вблизи ядра потока, где температура и массовый расход выше.

Задание поверхностной цели

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Цели > Поверхностная цель**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите поверхности для анализа.
3. В группе **Параметры** выберите параметры и значения.
4. Нажмите кнопку **ОК**.

Новая **Поверхностная цель (ST)** появляется во вкладке **Тепловой анализ**. Чтобы изменить **Цель**, нажмите правой кнопкой на **Цель** и выберите **Изменить**.

Объемная цель

Эта возможность позволяет задать физический параметр, вычисляемый в указанных объемах внутри **Расчетная область**.

Можно выбрать компонент детали или сборочного узла в сборках в качестве компонента, для которого задается объемная цель.

Параметры рассчитываются в текучей среде или в твердом теле в зависимости от состояния компонента (текучая среда или твердое тело; состояние компонента можно изменить в диалоговом окне **Расчетная область**). Если сопряженный теплообмен не учитывается (опция **Теплопроводность** выключена на вкладке **Тип задачи**, то для расчета твердых тел недоступны никакие параметры.

Для параметров, не являющихся интегральными (например, “Статическое давление”, “Полное давление” и т. д.), можно также выбрать значение параметра, которое будет использоваться в качестве объемной цели. Все значения вычисляются в выбранных компонентах.

Доступны следующие значения параметров:

- минимальное (**Min**);
- среднее (**Av**)

$$\frac{\sum_{cells} A_i \cdot dV_i}{\sum_{cells} dV_i}$$

где A_i — усредненный параметр (например, температура), dV_i — объем i -й ячейки. Суммирование производится по всем ячейкам в выбранном компоненте (объем).

- максимальное (**Max**);
- среднемассовое (**Bulk av.**).

$$\frac{\sum_{cells} A_i \cdot \rho_i \cdot dV_i}{\sum_{cells} \rho_i \cdot dV_i}$$

где ρ_i — плотность i -й ячейки.

Задание объемной цели

1. В ленточной панели выберите **Тепловой анализ > Цели > Объемная цель**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите поверхности для анализа.
3. В группе **Параметры** выберите параметры и значения.
4. Нажмите кнопку **ОК**.

Новая **Объемная цель (VT)** появляется во вкладке **Тепловой анализ**. Чтобы изменить **Цель**, нажмите правой кнопкой на **Цель** и выберите **Изменить**.

Электромагнетизм

Эта функциональность позволяет задавать параметры для численного моделирования процессов низкочастотного электромагнетизма, такие как Электромагнитная расчетная область, Граничные условия и Сетка.

Чтобы отобразить ленточную панель для модуля **Электромагнетизм**, измените тип задачи на **Магнитный анализ**.

Задание электромагнитной расчетной области

ЭМ Расчетная область задает область для выполнения расчетов электромагнитного поля. При задании настроек моделирования программа автоматически генерирует расчетную область, охватывающую геометрию модели. Для большинства электромагнитных решателей расчетная область представляет собой 3D прямоугольную призму с границами, выровненными по осям глобальной системы координат.

1. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Общие > Расчетная область**.
2. В разделе **Тип** определите геометрию расчетной области:
 - **Прямоугольный**. Позволяет задать границы расчетной области, выровненные относительно глобальной системы координат.
 - **Сектор**. Позволяет задать расчетную область с вращательной симметрией.
3. В разделе **Размер** задайте размер расчетной области.
 - Если выбран тип **Прямоугольный**:
 - Укажите диапазон для каждого направления **X, Y, Z**.
 - Если выбран тип **Сектор**:

- В качестве **Оси вращения** выберите любую ось в графической области.
- Выберите **Плоскость или поверхность**, чтобы создать сектор в графической области. Периодический сектор создается путем вращения заданной плоскости (или поверхности) относительно **Оси вращения**.
- Задайте **Начальный угол** сектора **Расчетной области**.
- **Количество секторов** задает общее количество секторов на 360 градусов, которые составляют всю модель.
- Выберите **Z**, чтобы задать диапазон координат для сектора оси вращения.
- Укажите **Максимальный радиус** сектора.

4. В группе **Граничные условия** задайте следующие настройки:

- Если выбран тип **Прямоугольный**:
 - Выберите **Одинаковые на всех границах**, если необходимо применить одни и те же граничные условия равномерно ко всем шести граням расчетной области (X min, X max, Y min, Y max, Z min, Z max).
 - Выберите **Различные на каждой границе**, если требуется задать уникальное граничное условие для каждой из шести граней расчетной области.

В каждом режиме можно выбрать определенный тип граничного условия из раскрывающегося меню. Доступные типы:

- a. **Тангенциально**. Это общее граничное условие, представляющее открытую границу или поглощающее граничное условие. Обеспечивает движение электромагнитных волн с минимальным отражением, моделируя область, простирающуюся до бесконечности.
- b. **Симметрия (танг.)**. Это граничное условие используется, когда в модели присутствует плоскость симметрии, где электрическое поле тангенциально к границе. Делит расчетную область пополам, что сокращает требуемые вычислительные ресурсы.
- c. **Симметрия (нормаль)**. Это граничное условие также используется, когда в модели присутствует плоскость симметрии, но для случаев, когда электрическое поле нормально к границе. Аналогично условию Симметрия (танг.), оно позволяет уменьшить размер модели.

- Если выбран тип **Сектор**:

- Задайте **Начальный угол** сектора **Расчетной области**.
- **Количество секторов** задает общее количество секторов на 360 градусов, которые составляют всю модель.
- Укажите **Минимум по Z** и **Максимум по Z**, чтобы задать значение минимальной и максимальной координаты для сектора оси вращения.

5. Нажмите кнопку **ОК**.

Источники электрической энергии

Если решается задача, в которой рассматривается теплопроводность в твердых телах, то можно также учитывать Джоулев нагрев токопроводящих тел при прохождении через них электрического тока.

Электрический ток и соответствующее выделение Джоулева тепла зависят от заданных **Источников электрической энергии** и свойств выбранных материалов.

Источник электрической энергии может быть задан на поверхности токопроводящего тела или на границе двух токопроводящих тел.

Задание источника электрического тока

Задайте источник электрического тока, как показано:

1. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Источники электрической энергии > Сила тока**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите соответствующий тип:
 - **Поверхности**. В графической области выберите поверхности, на которых будет моделироваться источник тока.
 - **Сечение**. Позволяет задать сечение компонента.
3. В группе **Параметры** выберите следующие параметры:
 - Значение **Тока RMS** определяется отношением

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V_A}{\sqrt{2}}$$

где V_A – амплитуда.

Нажмите **Редактор зависимостей**, если нужно задать формульную зависимость.

- Значение **Фазы** (Φ).
- Значение **Частоты** (f) — только для информации.

Электрический ток определяется следующим образом:

$$V_A \cdot \sin \left(2\pi f t + \frac{\pi \Phi}{180} \right)$$

где t — время.

4. Включение/выключение опции **Многовитковая катушка**:

Если опция **Многовитковая катушка** выключена, катушка рассматривается как сплошная, с заполнением объема материалом 100%, а сопротивление катушки рассчитывается решателем с учетом удельного сопротивления материала.

При включенной опции **Многовитковая катушка** можно указать следующие значения:

- **Число витков** (N)
- **Сопротивление многовитковой катушки**:
 - Если выбрана опция **Примененный материал**, сопротивление многовитковой катушки рассчитывается решателем с учетом удельного сопротивления материала пропорционально числу витков с предположением, что коэффициент заполнения поперечного сечения катушки витками 100%.
 - Если выбрано **Значение**, можно задать значение для **Сопротивления** вручную.

5. В разделе **Дополнительные параметры** задайте следующие параметры:

- Укажите значение для параметра **Сопротивление**.

Как для сплошной, так и для многожильной обмотки добавочное сопротивление может представлять:

- сопротивление части обмотки, которая не моделируется, например лобовые части обмоток электрических машин;
 - выводы, соединяющие обмотку с источником;
 - сопротивление источника;
 - нагрузка для обмоток трансформаторов и генераторов;
 - бесконечно большое сопротивление для моделирования открытой цепи.
- Укажите значение для параметра **Индуктивность**.

Как для сплошной, так и для многожильной обмотки добавочная индуктивность может представлять:

- дополнительную индуктивность части обмотки, которая не моделируется, например лобовые части обмоток электрических машин.
- выводы, соединяющие обмотку с источником;
- индуктивность источника;
- нагрузка для обмоток трансформаторов и генераторов.



Примечание:

Как для сплошных, так и для многожильных обмоток индуктивность рассчитывается решателем.

6. В разделе **Цели** выберите цели, которые будут связаны с электрическим источником.

7. Нажмите кнопку **ОК**.

Задание источника напряжения

Задайте источник напряжения, как показано:

1. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Источники электрической энергии > Напряжение**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите соответствующий тип:

- **Поверхности.** В графической области выберите поверхности, на которых будет моделироваться источник напряжения.
- **Сечение.** Позволяет задать сечение компонента.

3. В группе **Параметры** выберите следующие параметры:

- **Напряжение RMS.** Нажмите **Редактор зависимостей**, если нужно задать формульную зависимость.
- **Фаза.**
- **Частота** — только для информации.

Электрический ток определяется следующим образом:

$$V_A \cdot \sin \left(2\pi f t + \frac{\pi \Phi}{180} \right)$$

где t — время.

4. Включение/выключение опции **Многовитковая катушка**:

Если опция **Многовитковая катушка** выключена, катушка рассматривается как сплошная, с заполнением объема материалом 100%, а сопротивление катушки рассчитывается решателем с учетом удельного сопротивления материала.

При включенной опции **Многовитковая катушка** можно указать следующие значения:

- **Число витков (N)**
- **Сопротивление многовитковой катушки:**
 - Если выбрана опция **Примененный материал**, сопротивление многовитковой катушки рассчитывается решателем с учетом удельного сопротивления материала пропорционально числу витков с предположением, что коэффициент заполнения поперечного сечения катушки витками 100%.
 - Если выбрано **Значение**, можно задать значение для **Сопротивления** вручную.

5. В разделе **Дополнительные параметры** задайте следующие параметры:

- Укажите значение для параметра **Сопротивление**.

Как для сплошной, так и для многожильной обмотки добавочное сопротивление может представлять:

- сопротивление части обмотки, которая не моделируется, например лобовые части обмоток электрических машин;
- выводы, соединяющие обмотку с источником;
- сопротивление источника;
- нагрузка для обмоток трансформаторов и генераторов;
- бесконечно большое сопротивление для моделирования открытой цепи.

- Укажите значение для параметра **Индуктивность**.

Как для сплошной, так и для многожильной обмотки добавочная индуктивность может представлять:

- дополнительную индуктивность части обмотки, которая не моделируется, например лобовые части обмоток электрических машин.
- выводы, соединяющие обмотку с источником;
- индуктивность источника;
- нагрузка для обмоток трансформаторов и генераторов.



Примечание:

Как для сплошных, так и для многожильных обмоток индуктивность рассчитывается решателем.

6. В разделе **Цели** выберите цели, которые будут связаны с электрическим источником.

7. Нажмите кнопку **ОК**.

Задание выходной клеммы переменного тока

Эта опция позволяет задать переменный электрический потенциал со значением 0 на поверхности.

1. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Источники электрической энергии > Выходная клемма переменного тока** .
2. В разделе **Выбор геометрии** укажите поверхность, на которой переменный электрический потенциал будет задан со значением 0.
3. Нажмите кнопку **ОК**.

Настройки электромагнитной сетки

Для расчета в Power SIM используется конечно-элементная сетка с преобладанием гексаэдров. Построение сетки происходит в автоматическом режиме. Элементы сетки являются элементами первого порядка. Система уравнений Максвелла решается прямым решателем.

Точность решения зависит от характера поля и размера элементов сетки. В областях, в которых направление или величина поля быстро изменяются, для высокой точности требуется подробная сетка.

Power SIM автоматически генерирует электромагнитную расчетную сетку в **Расчетной области** в соответствии с заданными настройками. Размер элементов можно изменить для всей модели или только в рассматриваемых областях.

Проект Power SIM включает следующие типы электромагнитной сетки:

- **Глобальная сетка** задает явным образом размер элементов для всей модели геометрии.
- **Локальная сетка** определяет уровень дробления ячеек на основе размера **Глобальной сетки**. Если необходимо обеспечить дробление глобальной электромагнитной сетки в одной или нескольких локальных областях, то для этих областей можно использовать этот тип электромагнитной сетки. Это позволит избежать чрезмерного дробления сетки в тех областях, которые имеют менее существенное значение для решения задачи.

Настройки глобальной сетки

Позволяет задать электромагнитную расчетную сетку в **Расчетной области** в соответствии с заданными настройками.

1. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Сетка > Глобальная сетка** .
2. В группе Настройки задайте следующие параметры:

- **Характерный размер в твердом теле.** Характерная длина стороны сеточного элемента для твердотельных ячеек.
- **Уровень закругления в текучей среде.** Уровень закругления электромагнитной сетки в текучей среде. Таким образом, если $N = 0...11$ — заданный уровень закругления, то характерная длина стороны сеточного элемента в воздухе будет в 2^N раза больше, чем в твердом теле.
- **Максимальный размер в текучей среде** (только для информации). Отображает максимальную длину стороны элемента в проточной области в соответствии с заданным **Уровнем закругления в текучей среде**.

3. Нажмите кнопку **ОК**.

Настройки локальной сетки

Диалоговое окно **Настройки локальной сетки** позволяет задать настройки дробления электромагнитной сетки в локальной **расчетной области**, чтобы улучшить разрешение конкретной геометрии модели и/или интересующих областей. Локальная область может быть определена компонентом, гранью, ребром или вершиной.

Настройки локальной сетки можно использовать для дробления ячеек, которые не были в достаточной степени разрешены с помощью глобальной электромагнитной сетки.

1. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Сетка > Локальная сетка**.
2. В разделе **Выбор геометрии** укажите компоненты, грани, ребра и вершины для задания локальной сетки.
3. В разделе **Дробление ячеек** задайте **Уровень** дробления всех твердотельных ячеек в локальной области.
4. Нажмите кнопку **ОК**.

Метод построения сетки

Power SIM автоматически генерирует расчетную сетку в разделе Расчетная область в соответствии с заданными настройками. Сетка, которая генерируется до расчета, называется “начальной”.

Для того чтобы задать параметры, которыми определяется автоматическая процедура построения начальной расчетной сетки, необходимо создать **Основную сетку**. Для создания **Основной сетки** сначала вся расчетная область разбивается на части плоскостями системы координат, т.е. образуются прямоугольные ячейки **Базовой сетки**. Затем ячейки **Базовой**

сетки разбиваются на более мелкие ячейки в соответствии с настройками, заданными для более подробного разрешения определенных областей.

Если необходимо обеспечить дробление начальной сетки в одной или нескольких локальных областях, то для этих областей можно задать **Локальные сетки**. Это позволит избежать чрезмерного дробления сетки в тех областях, которые не представляют интерес для решения задачи.

Глобальная сетка

Глобальная сетка полностью определяется сгенерированной **Базовой сеткой** и параметрами дробления.

Настройки глобальной сетки можно задать двумя способами:

- **Автоматический режим** позволяет управлять начальной сеткой с помощью параметра **Начальная сетка**, который определяет число ячеек в **Базовой сетке** и процедуру по умолчанию, используемую для дробления сетки в узких каналах модели.
- **Ручной режим** позволяет создать **Глобальную сетку** с использованием следующих этапов:
 - Построение **Базовой сетки** с заданным количеством ячеек, а также разрежение или сгущение базовой сетки в определенных областях с помощью использования **Контрольных плоскостей**, что позволяет добиться более подробного разрешения геометрии модели и параметров течения;
 - разбиение ячеек определенного типа в базовой сетке (дробление ячеек только в текучей среде, только в твердом теле и/или только ячеек, лежащих на границе раздела твердого тела и текучей среды);
 - дробление полученной сетки для более подробного разрешения узких каналов;
 - дробление ячеек базовой сетки для того, чтобы захватить относительно мелкие элементы твердого тела или разрешить кривизну поверхности (например, сферическую поверхность малого радиуса и т. д.), а также поверхности раздела сред (поверхности раздела текучая среда/твердое тело, текучая среда/пористая среда, пористая среда/твердое тело или границы между различными твердыми телами) – т. е. разрешение сеткой мелких особенностей модели, разрешение сеткой кривизны поверхности и разрешение сеткой выступов поверхности.

Задание настроек глобальной сетки

В диалоговом окне **Настройки глобальной сетки** можно изменить значения параметров, которыми определяются автоматические процедуры построения начальной расчетной сетки в Power SIM.

1. В ленточной панели выберите Тепловой анализ > Сетка > Общие.
2. В группе **Режим** выберите **Автоматический режим** или **Ручной режим** для глобальной сетки.

Настройки автоматического режима

1. В группе **Начальная сетка** задайте **Уровень**, который определяет число ячеек **Глобальной сетки** и процедуру дробления сетки в узких каналах модели по умолчанию. Чем выше уровень, тем более подробной будет сетка, однако для построения сетки потребуется больше процессорного времени и памяти компьютера.
2. Нажмите кнопку ОК.

Настройки ручного режима

1. В группе **Базовая сетка** задайте число (или размеры) ячеек базовой сетки в направлениях X, Y и Z глобальной системы координат.
2. В группе **Уровень дробления ячеек** задайте настройки дробления ячеек сетки определенного типа. Можно задать дробление для комбинации ячеек в текучей среде и/или в твердом теле и/или ячеек, лежащих на границе раздела твердого тела и текучей среды.
3. Включите опцию **Адаптация сетки к маленьким деталям**, если требуется разрешить сеткой мелкие геометрические детали на границе между средами (поверхности раздела текучей среды и твердого тела или на границе между различными твердыми телами) за счет более плотной сетки путем задания **Уровня дробления ячеек**.
4. **Адаптация по допуску** позволяет управлять точностью, с которой реальная поверхность раздела разрешается многоугольниками сетки. Опция Адаптация по допуску может затрагивать те же ячейки, на дробление которых оказывают влияние настройки адаптации сетки к маленьким деталям и настройки разрешения сеткой кривизны поверхности. Также эта опция, в отличие от опции Адаптация сетки к маленьким деталям, различает мелкие и крупные детали одинаковой кривизны, что позволяет избегать дробления сетки в тех областях, где оно не нужно.

- С помощью ползунка **Уровень** можно установить минимальный размер ячеек, для которых удовлетворяется критерий **Адаптация по допуску**, указав **Уровень дробления ячеек**.
 - **Минимальный размер элемента**
5. В разделе **Разрешение каналов** можно задать дополнительное дробление сетки в проточных сечениях модели для получения более точного решения.
- Сущность **Количество ячеек в канале** определяет число ячеек начальной сетки, которое Power SIM попытается задать поперек проточных сечений модели в направлении по нормали к поверхности раздела твердого тела с текучей средой. Число ячеек поперек узкого канала должно быть близко или равно заданному характерному числу. Если это условие не выполняется, то ячейки, лежащие в этом направлении, будут дробиться до тех пор, пока не станут удовлетворять данному условию.
 - С помощью ползунка **Уровень** можно ограничить наименьший размер ячеек в узких каналах, задав **Уровень дробления ячеек**.
6. Нажмите кнопку ОК.

Локальная сетка

Диалоговое окно **Локальная сетка** позволяет задать начальную сетку в локальной расчетной области, чтобы улучшить разрешение конкретной геометрии модели и/или течения (и/или теплообмена в твердых телах) в отдельных частях этой области, для которых не удастся найти хорошее решение с глобальными параметрами начальной сетки (заданными в диалоговом окне **Глобальная сетка** в группах **Дробление каналов** и **Уровень дробления ячеек**).

Локальная область может быть представлена компонентом, поверхностью, ребром или вершиной. Локальная сетка задается так же, как и глобальная сетка (устанавливаются настройки разрешения мелких особенностей модели, кривизны поверхности раздела сред, дробления сетки в узких каналах). Исключением является то, что в локальной области не задается **Глобальная сетка** (она наследуется из глобальной сетки). Кроме того, есть возможность задать дополнительное дробление сетки в локальной области, ограниченной поверхностями, *“равноудаленными”* от выбранных поверхностей.

**Примечание:**

Настройки локальной сетки имеют более высокий приоритет, чем глобальные настройки. Таким образом, настройки глобальной сетки не будут учитываться в той области, к которой применяются локальные настройки. Поэтому можно использовать настройки локальной сетки для того, чтобы разбить те ячейки, для дробления которых было недостаточно настроек глобальной сетки. Задание настроек локальной сетки также позволяет не допустить дробления ячеек за счет глобальных настроек в тех областях, где этого не требуется.

В случае, если ячейка пересекается с другими областями, в которых заданы настройки локальной сетки, настройки дробления в этой ячейке будут применяться таким образом, чтобы было достигнуто максимальное дробление.

Задание локальной сетки

Чтобы задать Локальную Сетку текущей среды, выполните следующие шаги:

1. В ленточной панели выберите Тепловой анализ > Сетка > Локальная.
2. В группе Выбор геометрии выберите соответствующий режим:
 - **Выбрать объект.** В этом режиме можно выбрать компоненты, представляющие локальную область для задания настроек начальной сетки. Выберите нужные компоненты в графической области. Выбранные компоненты появятся в списке **Компоненты**.
 - **Область.** Позволяет определить локальную область в качестве одной из простых геометрических фигур:
 - **Точка.** Чтобы задать точку, определяющую локальную область, укажите расстояния от начала глобальной системы координат до этой точки.
 - **Параллелепипед.** Чтобы задать трехмерную область, ограничивающую локальную область, укажите расстояния от начала глобальной системы координат до сторон области.

- **Цилиндр.** Чтобы задать цилиндр, ограничивающий локальную область, укажите его радиус и координаты центров оснований цилиндра в глобальной системе координат.
- **Сфера.** Чтобы задать сферу, ограничивающую локальную область, укажите ее радиус и координаты центра в глобальной системе координат.

Также можно вручную сместить границы области в графической области. Выберите стрелки, расположенные на гранях каркаса, обозначающего локальную область, и потяните их в нужное положение. Когда Вы закончите перетаскивание, появится выноска, с помощью которой можно установить определенный размер или положение границы локальной области. Для этого в ней необходимо ввести или отредактировать размер или координату.



Совет:

Чтобы установить положение обеих границ **Параллелепипеда** вдоль одной оси одновременно и симметрично, при перетаскивании стрелки удерживайте клавишу **Shift**.

3. В группе **Уровень дробления ячеек** можно задать настройки дробления ячеек сетки определенного типа.
 - В проточной области (включена опция **Течение жидкости/газа**): все ячейки будут раздроблены до выбранного уровня.
 - В твердых телах (включена опция **Теплопроводность**): все ячейки твердого тела будут раздроблены до выбранного уровня.
 - Уровень на поверхности раздела твердых тел с текучей средой: До заданного уровня будут дробиться все ячейки, лежащие на границе раздела твердого тела с текучей средой (одна часть которых лежит в области текучей среды, а другая часть – в твердом теле).
4. Включите опцию **Равноудаленное дробление**, если требуется задать параметры дробления ячеек в области, ограниченной равноудаленными поверхностями от выбранных объектов. В диалоговом окне **Равноудаленное дробление** задайте следующие параметры:
 - Слои оболочки: определяет число оболочек, внутри каждой из которых ячейки начальной сетки будут дробиться до одного и того же **Уровня дробления ячеек**. Подсчет оболочек ведется от выбранных поверхностей, их количество не должно превышать 3.

- Уровень: ограничивает наименьший размер ячеек внутри оболочки, ближайшей по отношению к выбранным поверхностям с помощью задания параметра **Уровень дробления ячеек**. Для следующей оболочки уровень дробления будет установлен на 1 ниже значения, заданного для предыдущей оболочки.
- Отступ: определяет толщину оболочки. Для каждой оболочки задаются собственные расстояния (**Отступ 1**, **Отступ 2** и **Отступ 3**). Заданное значение всегда отсчитывается от выбранной поверхности.

Ячейки начальной сетки внутри каждой оболочки будут дробиться до тех пор, пока в каждой оболочке не будет достигнут нужный **Уровень дробления ячеек**.

5. Включите опцию **Адаптация сетки к маленьким деталям**, если требуется разрешить сеткой мелкие геометрические детали на границе между средами (поверхности раздела текучей среды и твердого тела или на границе между различными твердыми телами) за счет более плотной сетки путем задания **Уровня дробления ячеек**.

Мелкие детали модели распознаются программой Power SIM автоматически. Разрешение сеткой мелких особенностей модели применяется к тем ячейкам, для которых характерна следующая особенность – угол между нормальными к треугольникам, образующим поверхность, строго больше 120° .

При установке уровня разрешения с помощью сетки применяется следующее общее правило: Уровень двух соседних ячеек должен быть одинаковым или отличаться на единицу.

6. Опция **Адаптация сетки по кривой** обеспечивает разрешение сеткой кривизны поверхности.

Любую поверхность можно рассматривать как множество треугольников. Внутри каждой ячейки сетки на границе между средами программа Power SIM определяет максимальный угол между нормальными к треугольникам, которые образуют поверхность твердого тела. Разрешение сеткой кривизны поверхности применяется к тем ячейкам, в которых максимальный угол между нормальными к треугольникам, образующим поверхность, больше значения, заданного для **Адаптация сетки по кривой** в радианах.

- С помощью ползунка **Уровень** можно установить минимальный размер ячеек, для которых удовлетворяется критерий **Дробление по кривизне**, указав **Уровень дробления ячеек**.
- **Критический угол** обозначает предельный угол, таким образом, предельный угол в каждой ячейке сравнивается с максимальным углом (α) между нормальными

(n_1 , n_2 , n_3) к треугольникам, которые образуют поверхность в ячейке. Если α превышает предельный угол, то ячейка разбивается согласно настройкам диалогового окна **Дробление по кривизне**. Чем меньше этот критерий, тем меньше предельный угол, и, соответственно, разрешение кривизны поверхности является более высоким.

7. **Адаптация по допуску** позволяет управлять точностью, с которой реальная поверхность раздела разрешается многоугольниками сетки. Опция Адаптация по допуску может затрагивать те же ячейки, на дробление которых оказывают влияние настройки адаптации сетки к маленьким деталям и настройки разрешения сеткой кривизны поверхности. Также эта опция, в отличие от опции Адаптация сетки к маленьким деталям, различает мелкие и крупные детали одинаковой кривизны, что позволяет избегать дробления сетки в тех областях, где оно не нужно.
- С помощью ползунка **Уровень** можно установить минимальный размер ячеек, для которых удовлетворяется критерий **Адаптация по допуску**, указав **Уровень дробления ячеек**.
 - **Минимальный размер элемента**
8. В разделе **Разрешение каналов** можно задать дополнительное дробление сетки в проточных сечениях модели для получения более точного решения.
- Сущность **Количество ячеек в канале** определяет число ячеек начальной сетки, которое Power SIM попытается задать поперек проточных сечений модели в направлении по нормали к поверхности раздела твердого тела с текучей средой. Число ячеек поперек узкого канала должно быть близко или равно заданному характерному числу. Если это условие не выполняется, то ячейки, лежащие в этом направлении, будут дробиться до тех пор, пока не станут удовлетворять данному условию.
 - С помощью ползунка **Уровень** можно ограничить наименьший размер ячеек в узких каналах, задав **Уровень дробления ячеек**.
9. Можно просмотреть, как будет выглядеть сетка в зависимости от заданных настроек дробления, включив **Предпросмотр сгущения сетки**.
- **Плоскости**. Эти опции позволяют визуализировать сетку в плоскостях симметрии **Расчетной области**.
 - **Компоненты**. Эта опция позволяет отобразить сетку на выбранных компонентах модели.
 - **Уровень дробления**. Позволяет указать **Уровень дробления ячеек** для отображения.

Задание сетки печатной платы

Чтобы задать сетку печатной платы, выполните следующие шаги:

1. В ленточной панели выберите Тепловой анализ > Сетка > PCB.
2. В группе **Настройки**:
 - Выберите **Метод** расчета многослойных печатных плат:
 - **Точное**: прямое моделирование с подробной структурой дорожек и точными свойствами упругости элемента слоя с помощью призматической сетки с контактами типа Склейка между слоями.
 - **Эффективное**: моделирование на основе усреднения свойств выбранного элемента слоя с использованием конформной гексаэдральной сетки без склейки слоев (данный метод экономит вычислительные ресурсы).
 - **Число ячеек по самой длинной стороне** позволяет задать размер наибольшей ячейки сетки, указав число ячеек по самой длинной стороне печатной платы.
 - **Минимальный размер элемента** позволяет задать ограничение для минимального размера ячейки.
3. Нажмите кнопку **ОК**.

Запуск расчета

Для того, чтобы начать расчет, следуйте инструкциям.

1. В нижней левой части окна перейдите в раздел **Запуск расчета**.
2. Выберите следующие параметры для расчета:
 - **Монитор расчета**. При выборе этой подсказки откроется Менеджер структуры, где можно просмотреть ход выполнения расчета.
 - **Сетка**. Включите эту подсказку, чтобы создать новую расчетную сетку для проекта, в котором она уже была построена ранее или расчет которого уже проводился. Если для проекта ранее не создавалась сетка и не выполнялся расчет, флажок **Сетка** устанавливается автоматически.
 - **Расчет**. Включите эту опцию, чтобы рассчитать проект. Для проекта, для которого уже был выполнен расчет, также можно выбрать одну из следующих опций:
 - **Новый**. Выберите этот вариант для повторного расчета рассчитанного ранее проекта с самого начала, используя начальные условия, заданные в диалоговых окнах **Мастер проекта** или **Общие настройки**. Для проекта,

для которого никогда не выполнялся расчет до выбора этой опции по умолчанию при выборе опции **Расчет**.

- **Продолжить.** Выберите эту опцию, чтобы продолжить расчет с того места, где расчет был остановлен автоматически или вручную. Эта опция доступна только в том случае, если для проекта уже выполнен расчет. Выбор этой опции приводит к отключению опции **Сетка**.
- В группе Компьютер и ядра, задайте следующие настройки:
 - **Этот компьютер.** В этом случае расчет будет запущен на этом компьютере как отдельный процесс (т.е. как отдельное приложение).
 - **Удаленный компьютер.** Позволяет выбрать сетевой компьютер. После того, как компьютер будет добавлен, Вы сможете выбрать его для расчета проекта. Эта опция позволяет использовать процессор и ресурсы памяти другого компьютера. Однако следует иметь в виду, что при расчете для передачи данных по сети будет затрачиваться дополнительное время.
 - **Ядра.** Если стационарный или сетевой компьютер является многопроцессорным, то можно выбрать количество процессорных ядер для расчета. Следует иметь в виду, что количество доступных процессоров или процессорных ядер зависит от операционной системы и может отличаться от количества фактически установленных на компьютере.

3. Нажмите **Запустить расчет**.

Расчет начнется.

Результаты

После завершения расчета можно проанализировать полученные результаты. Для этого в Power SIM доступно множество различных элементов и инструментов обработки результатов.

По завершении расчета можно загрузить его результаты. В ленточной панели выберите **Результаты > Загрузить**.

Визуализация ПП

Сущность **Визуализация ПП** обеспечивает способ визуализации результатов анализа целостности питания непосредственно на плоскости печатной платы.

Позволяет показать расчетную сетку, а также скалярные (например, напряжение) и векторные (например, плотность электрического тока) параметры по слоям печатной платы. Для каждой печатной платы, определенной в вашем проекте, доступна одна визуализация. Максимальное число доступных визуализаций равно числу печатных плат в проекте.

Отображается сетка для плоскости печатной платы. Для наглядности узлы сетки, расположенные на контактных площадках и переходных отверстиях компонентов, исключены из визуализации.

Используйте эту визуализацию для анализа производительности PDN, определения областей с высокой плотностью тока и проверки распределения напряжения по плате.

Задание настроек визуализации ПП

1. В ленточной панели выберите **Результаты > Визуализация ПП**.
2. В разделе **Выбор слоя** укажите слои для отображения в области **Визуализация ПП**.
3. В группе **Выбор цепи** можно выбрать цепи, для которых будут отображаться результаты падения напряжения PI или импеданса PI PDN.
 - Выберите **Показать**, чтобы отобразить выбранные цепи.
 - Выберите **Скрыть**, чтобы скрыть выбранные цепи.
4. В поле **Тип** выберите способ отображения результатов:
 - **Заливка**. Отображает распределение параметра в виде заливки.
 - В группе **Заливка** выберите параметр, для которого необходимо отобразить заливку.
 - **Векторы**. Отображает распределение векторного параметра в виде векторов.
 - В группе **Вектора** выберите параметр, распределение которого необходимо визуализировать вместе с векторами.
 - **Размер**. Позволяет задать длину векторов в пикселях.
 - **Сетка**. Визуализация расчетной сетки.
5. В разделе **Опции** задайте общие свойства визуализации:

- **Интерполировать значения.** Когда опция **Интерполировать значения** выключена, то значения параметра в центрах ячеек будут отображаться без интерполяции между ячейками. Когда эта опция включена, значения, определенные в центрах ячеек, интерполируются между ячейками расчетной сетки.

6. Нажмите кнопку **ОК**.

Расчетные данные ПП

Расчетные данные ПП позволяет отобразить таблицу результатов анализа целостности питания с использованием граничных условий. Значения выводятся на панели в нижней части экрана. Данные также могут быть экспортированы в электронную таблицу Excel.

Таблица включает три вкладки VRM, Потребитель и Дискретные компоненты.

Задание расчетных данных ПП

1. В ленточной панели выберите **Результаты > Расчетные данные ПП**.
2. **Расчетные данные ПП** выводятся на панели в нижней части экрана. Чтобы просмотреть результаты, перемещайтесь между вкладками VRM, Потребитель и Дискретные компоненты.

Кривая импеданса

Эта функциональность позволяет отобразить кривую импеданса по результатам расчета. Результаты могут быть представлены в виде графика или таблицы. С помощью элемента Кривая импеданса можно отобразить:

- Собственный импеданс. Для построения графика будут использоваться диагональные элементы матрицы импеданса, определенные для одного компонента.
- Взаимный импеданс. Для построения графика будут использоваться внедиагональные элементы матрицы импеданса, определенные между компонентами.

Задание кривой импеданса

1. В ленточной панели выберите **Результаты > Кривая импеданса**.
2. В разделе **Показать** задайте следующие параметры:
 - Выберите типы импеданса **Собственный** или **Взаимный** или оставьте оба типа для визуализации.
 - В группе **Фильтр по** доступны для выбора следующие варианты:
 - Кнопка **Компонент**: фильтр компонентов по имени. В группе **Компонент** выберите имя компонента, чтобы отобразить для него кривую импеданса.
 - Кнопка **Пара цепей**: фильтр компонентов по именам пар цепей. В группе **Пара цепей** выберите пары цепей, чтобы отобразить для них кривую импеданса.
3. В группе **Кривая импеданса** выберите компонент, для которого необходимо отобразить кривую импеданса.
4. Нажмите кнопку **ОК**.

Картина сечения

Сущность Картина сечения позволяет визуализировать распределение параметра на выбранных гранях или поверхностях модели. Позволяют показать (или скрыть) выноски, в которых отображаются минимальные (максимальные) значения параметров картины в сечении и их расположение.

Задание картины в сечении

1. В ленточной панели выберите **Результаты > Картина сечения**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите соответствующий тип:
 - **Выбор**. Выберите грани модели или поверхности, на которых необходимо визуализировать распределение параметра.
 - **Плоскости**. Создает плоскость параллельно одной из заданных по умолчанию плоскостей XY, XZ или YZ.

Настройка положения плоскости Чтобы переместить плоскость картины, переместите ползунок или введите значение в поле **Смещение**.

3. В поле **Тип** выберите способ отображения результатов:

- **Заливка.** Отображает распределение параметра в виде заливки
 - В группе **Заливка** выберите параметр, для которого необходимо отобразить заливку.
- **Векторы.** Отображает распределение векторного параметра в виде векторов.
 - В группе **Вектора** выберите параметр, распределение которого необходимо визуализировать вместе с векторами.
 - Задайте способ визуализации векторов:
 - **Статический.** В этом случае распределение векторного параметра визуализируется в виде статического изображения, т.е. размеры векторов и их плотность задаются в абсолютных величинах.
 - **Динамический.** В этом случае распределение векторного параметра обновляется в режиме реального времени, когда Вы выполняете какие-либо действия с моделью, например, увеличиваете изображение в локальных областях.
 - Выберите тип масштабирования векторов:
 - **Нормированный масштаб.** Размер вектора соответствует минимальному значению параметра.
 - **Линейный.** Размер вектора соответствует максимальному значению параметра.
 - **Логарифмический.** Размер стрелки вектора масштабируется логарифмически.
 - **Размер.** Позволяет задать длину векторов в пикселях.
 - **Раскрасить по.** Позволяет выбрать метод закраски векторов.
 - **Разрешение больших градиентов.** Позволяет выбрать метод распределения векторов:
 - Опция **Разрешение больших градиентов** выключена. Расстояние между всеми векторами постоянно.
 - Опция **Разрешение больших градиентов** включена. Расстояние между векторами зависит от градиента визуализируемого векторного параметра. Количество векторов больше в областях более высоких градиентов. То есть, чем быстрее векторный параметр меняется в заданном диапазоне, тем меньше расстояние между векторами.
- **Линии тока.** Отображает распределение векторных параметров в виде линий поля.

- В группе **Линии тока** выберите параметр, распределение которого необходимо отобразить с помощью линий тока.
 - **Ширина.** Задаёт ширину отображаемых линий.
 - **Шаг.** Управляет расстоянием между начальными точками линий в диапазоне от 6 до 128 пикселей.
 - Задайте параметр для закраски стрелок.
 - Включите **Отобразить поле векторов**, чтобы показать стрелки на поверхности.
 - **Сетка.** Визуализация расчетной сетки.
 - **Отобразить на.** Выберите необходимые типы ячеек:
 - **Текущая среда.** В этом случае на картине в сечении отображаются только ячейки текущей среды.
 - **Твердое тело.** В этом случае на картине в сечении отображаются только ячейки твердого тела.
4. В разделе **Опции** задайте общие свойства визуализации:
- **Отобразить на.** По умолчанию в Power SIM результаты отображаются на исходной модели.
 - **Геометрия.** Для отображения результатов будет использоваться начальная геометрия.
 - **Сетка.** Для визуализации будет использоваться геометрия, распознаваемая программой Power SIM.
 - **Интерполировать значения.** Когда опция **Интерполировать значения** выключена, то значения параметра в центрах ячеек будут отображаться без интерполяции между ячейками. Когда эта опция включена, значения, определенные в центрах ячеек, интерполируются между ячейками расчетной сетки.
5. Нажмите кнопку **ОК**.

Картина на поверхности

Картина на поверхности позволяет визуализировать распределение параметра на выбранных гранях или поверхностях модели. Эти действия позволяют отобразить или скрыть выноски, показывающие минимальные (максимальные) значения параметра картины и их положения.

Задание картины на поверхности

1. В ленточной панели выберите **Результаты > Картины на поверхности**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите соответствующий тип:
 - **Выбор**. Выберите грани модели для визуализации распределения параметра.
 - **Использовать все поверхности**. Если требуется отобразить параметры на всех гранях на границе твердого тела с текучей средой, нажмите кнопку **Использовать все поверхности**.
3. В поле **Тип** выберите способ отображения результатов:
 - **Заливка**. Отображает распределение параметра в виде заливки.
 - В группе **Заливка** выберите параметр, для которого необходимо отобразить заливку.
 - **Векторы**. Отображает распределение векторного параметра в виде векторов.
 - В группе **Вектора** выберите параметр, распределение которого необходимо визуализировать вместе с векторами.
 - Задайте способ визуализации векторов:
 - **Статический**. В этом случае распределение векторного параметра визуализируется в виде статического изображения, т.е. размеры векторов и их плотность задаются в абсолютных величинах.
 - **Динамический**. В этом случае распределение векторного параметра обновляется в режиме реального времени, когда Вы выполняете какие-либо действия с моделью, например, увеличиваете изображение в локальных областях.
 - Выберите тип масштабирования векторов:
 - **Нормированный масштаб**. Размер вектора соответствует минимальному значению параметра.
 - **Линейный**. Размер вектора соответствует максимальному значению параметра.
 - **Логарифмический**. Размер стрелки вектора масштабируется логарифмически.
 - **Размер**. Позволяет задать длину векторов в пикселях.
 - **Раскрасить по**. Позволяет выбрать метод закраски векторов.
 - **Разрешение больших градиентов**. Позволяет выбрать метод распределения векторов:
 - Опция **Разрешение больших градиентов** выключена. Расстояние между всеми векторами постоянно.
 - Опция **Разрешение больших градиентов** включена. Расстояние между векторами зависит от градиента визуализируемого

векторного параметра. Количество векторов больше в областях более высоких градиентов. То есть, чем быстрее векторный параметр меняется в заданном диапазоне, тем меньше расстояние между векторами.

- **Линии тока.** Отображает распределение векторных параметров в виде линий поля.
 - В группе **Линии тока** выберите параметр, распределение которого необходимо отобразить с помощью линий тока.
 - **Ширина.** Задаёт ширину отображаемых линий.
 - **Шаг.** Управляет расстоянием между начальными точками линий в диапазоне от 6 до 128 пикселей.
 - Задайте параметр для закраски стрелок.
 - Включите **Отобразить поле векторов**, чтобы показать стрелки на поверхности.
- **Сетка.** Визуализация расчетной сетки.
 - **Отобразить на.** Выберите необходимые типы ячеек:
 - **Текущая среда.** В этом случае на картине в сечении отображаются только ячейки текущей среды.
 - **Твердое тело.** В этом случае на картине в сечении отображаются только ячейки твердого тела.

4. В разделе **Опции** задайте общие свойства визуализации:

- **Отобразить на.** По умолчанию в Power SIM результаты отображаются на исходной модели.
 - **Геометрия.** Для отображения результатов будет использоваться начальная геометрия.
 - **Сетка.** Для визуализации будет использоваться геометрия, распознаваемая программой Power SIM.
- **Интерполировать значения.** Когда опция **Интерполировать значения** выключена, то значения параметра в центрах ячеек будут отображаться без интерполяции между ячейками. Когда эта опция включена, значения, определенные в центрах ячеек, интерполируются между ячейками расчетной сетки.

5. Нажмите кнопку **ОК**.

Измерение в точке

Сущность Измерение в точке — инструмент, позволяющий увидеть значения параметра в графическом окне. Чтобы включить эту опцию, перейдите к **Результаты > Измерение в точке** и переместите курсор мыши в точку на геометрии, где хотите увидеть значение параметра.

Поверхностные параметры

Элемент **Поверхностные параметры** позволяет вывести значения параметра (минимальное, максимальное, среднее и интегральное), рассчитанные на заданной поверхности или плоскости. Если поверхность или плоскость геометрии содержит несколько замкнутых контуров или циклов, параметры могут отображаться отдельно для каждого контура.

Значения выводятся на панели в нижней части экрана. Данные также могут быть экспортированы в электронную таблицу Excel.

Задание поверхностных параметров

1. В ленточной панели выберите **Результаты > Поверхностные параметры**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите соответствующий тип:
 - **Выбор**. Выберите грани модели для визуализации распределения параметра.
 - **Использовать все поверхности**. Если требуется отобразить параметры на всех гранях на границе твердого тела с текучей средой, нажмите кнопку **Использовать все поверхности**.
3. В группе **Параметры** выберите параметры, значения которых необходимо отобразить.
4. В разделе **Опции** можно задать смещение от выбранной геометрии.
5. Нажмите **Создать**.

Объемные параметры

Диалоговое окно **Объемные параметры** Позволяет отобразить значения параметра (минимальное, максимальное, среднее, среднемассовое и интегральное), рассчитанные в выбранных объемах в **Расчетной области**.

Параметры рассчитываются в текучей среде или в твердом теле в зависимости от состояния компонента. Значения выводятся на панели в нижней части экрана. Возможен экспорт данных в Excel.

Задание объемных параметров



Примечание:

Если результаты не загружены, в разделе **Объемные параметры** появляется предупреждение.

1. В ленточной панели выберите **Результаты > Объемные параметры**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите соответствующий тип:
 - **Выбор**. Выберите грани модели для визуализации распределения параметра.
 - **Использовать все поверхности**. Если требуется отобразить параметры на всех гранях на границе твердого тела с текучей средой, нажмите кнопку **Использовать все поверхности**.
3. В группе **Параметры** выберите параметры, значения которых необходимо отобразить.
4. Нажмите **Создать**.

Точечные параметры

Элемент **Точечные параметры** позволяет вывести значения параметра в заданных точках внутри **Расчетной области**. Нужные точки могут быть заданы разными способами. Можно задать определенные координаты точки или привязать ее к базовому геометрическому элементу (вершине, точке, грани и ребру). Также можно выбрать точки в графической области или задать их равномерно распределенными по плоскости, грани, эскизу, ребру, кривой или поверхности.

Значения выводятся на панели в нижней части экрана. Данные также могут быть экспортированы в электронную таблицу Excel.

Задание точечных параметров

1. В ленточной панели выберите **Результаты > Поверхностные параметры**.
2. В группе **Выбор геометрии** выберите соответствующий тип:
 - **Выбор**. В этом случае можно выбрать точки на плоскости или плоской поверхности в графической области.
 - **Равномерно**. Точки распределяются равномерно по выбранной геометрии. Можно выбрать один или несколько элементов.

- Если выбрана плоскость, можно задать **Значение** смещения точек плоскости от выбранной опорной плоскости.
 - Задайте **Количество точек** или **Шаги**, чтобы задать расстояние между точками.
 - **Координаты.** В этом случае Вы можете задать множество стартовых точек, создав таблицу с их координатами. Чтобы добавить точку в таблицу, нажмите **Добавить координаты**. Координаты точки можно изменять прямо в таблице.
3. В группе **Параметры** выберите параметры, значения которых необходимо отобразить.
4. В разделе **Опции** задайте общие свойства визуализации:
- **Отобразить на.** По умолчанию в Power SIM результаты отображаются на исходной модели.
 - **Геометрия.** Для отображения результатов будет использоваться начальная геометрия.
 - **Сетка.** Для визуализации будет использоваться геометрия, распознаваемая программой Power SIM.
 - **Интерполировать значения.** Когда опция **Интерполировать значения** выключена, то значения параметра в центрах ячеек будут отображаться без интерполяции между ячейками. Когда эта опция включена, значения, определенные в центрах ячеек, интерполируются между ячейками расчетной сетки.
5. Нажмите **Создать**.

График цели

График цели позволяет исследовать изменения целей в процессе расчета. В Power SIM для вывода данных целей используется Microsoft Excel. Каждая цель отображается на отдельном листе. На листе **Сводный отчет** выводятся значения цели, соответствующие моменту завершения расчета (или загруженному моменту времени, если задача нестационарная).

Кроме экспорта данных в книгу Microsoft Excel, график можно отобразить в качестве виджета в графической области, а также в качестве графика или сводного отчёта в панели в нижней части экрана.

Задание графика цели

1. В ленточной панели выберите **Результаты > График цели** .
2. В группе **Цели** выберите цель, чтобы отобразить ее.
3. В группе **Опции** включите **Отобразить параметры отдельно**, если необходимо отобразить каждую цель на отдельном графике.
4. Нажмите **Создать**.

Глава 2. Теоретическое руководство

В настоящем руководстве представлены физические модели, реализованные в программном продукте Power SIM.

Введение

Power SIM позволяет инженерам проектировать изделия на основе точных расчетов реальных характеристик в процессе мультифизического моделирования. Настоящий продукт разработан для решения ряда инженерных задач в таких областях как:

- Теплообмен
- Анализ целостности питания
- Моделирование процессов низкочастотного электромагнетизма
- Оптика

Пользовательский интерфейс Power SIM включает в себя следующие элементы:

- Препроцессор — подготовка к моделированию.
- Менеджер расчетов позволяет пользователю управлять расчетами.
- Постпроцессор представляет ряд инструментов для постпроцессинга результатов.

Power SIM платформа включает в себя модуль PCB SIM для моделирования целостности питания в печатных платах.

Условные обозначения

В настоящем документе используются следующие символы, единицы измерения, шрифты, терминология и другие условные обозначения:

Условные обозначения

Математические символы

- Переменные: обозначаются строчными буквами курсивом, например v , i , p .
- Константы: обозначаются заглавными буквами курсивом, например R — сопротивление или C — емкость.

- Скаляры: стандартный курсив.
- Функции: используется стандартный текст для названий функций f , g и h , поэтому примеры функций могут быть представлены как $f(x)$, $h(x)$ и $g(z)$.
- Операторы: используются стандартные математические операторы, такие как $+$, $-$, $\times$, $\div$, $\int$, ∂ .

Единицы измерения и размеры

- Система единиц измерения: Если не указано иное, программа Power SIM использует Международную систему единиц (СИ).
- Представление: Единицы измерения указываются в скобках сразу после числового значения: 5 м/с.
- Обозначения размеров: Физическим величинам присвоены соответствующие стандартные размерности и единицы СИ. L — длина, M — масса, T — время.

Переменные и константы

В Таблице 1.1 представлен список выражений с переменными и соответствующие им символы.

Таблица 1.1: Общие переменные и символы

Сим-вол	Количество
c	удельная теплоемкость, Дж/кг•К
C	теплоемкость, F
c _p	удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг•К
c _v	удельная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/кг•К
f	частота, - Гц
Fo	Число Фурье
Fr	Число Фруда
g	гравитационное ускорение, м/с ²
h	коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м ² •К
h _{rad}	коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/м ² •К
I	электрический ток, А; интенсивность излучения, Вт/м ² ; индуктивность, Н
i	плотность электрического тока, А/м ²
k	теплопроводность, Вт/м; постоянная Больцмана
Le	Число Льюиса
m	масса, кг
ṁ	массовый расход, [кг/с]
P	Мощность, Вт
Pr	Число Прандтля
p	давление, [Н/м ²]
R	сопротивление, Ом
Q	передача энергии, Дж
q	тепловой поток, [Вт]
T	температура, К
t	время, [с]
u, v, w	среднемассовая скорость жидкости, м/с
	3

Правила форматирования

Для обеспечения единообразия и лучшего понимания ко всей документации применяются следующие правила.

Определения

- **Определения:** Все ключевые термины поясняются при первом использовании и выделены жирным шрифтом.

Пример: **Граничное условие** — ограничение, применяемое на границе расчетной области.

Код и команды

- **Фрагменты кода:** Текст набран моноширинным шрифтом.

Пример: Для запуска симуляции выполните команду `simulate.exe`.

Выражения

- **Математические уравнения:** Размещаются в центре страницы с числом для удобства ссылки.

Пример:

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

Выделение важной информации

- **Примечания:** Примечания заключены в специальную рамку.



Примечание:

Убедитесь, что все входные параметры в рамках указанных диапазонов.

Диаграммы и рисунки

Диаграммы и рисунки демонстрируют наиболее продвинутые теории. Все диаграммы и рисунки соответствуют следующим правилам:

- **Нумерация:** Все рисунки нумеруются в порядке их появления, например, рисунок 3.1.
- **Подписи:** Подписи располагаются под рисунками.

Пример:

Рисунок 3.1: Схематическое представление проточной области.

- **Ссылки:** Ссылки на рисунки указаны в порядке их нумерации.

Пример: Течение жидкости происходит от входа к выходу, как показано на Рисунке 3.1.

Основные уравнения

Power SIM позволяет моделировать различные междисциплинарные задачи, включая анализ течения текучей среды, теплообмена, излучения и целостности питания. В этом разделе представлены основы теории и математические формулировки базовых уравнений, используемые в Power SIM.

Анализ течения

Анализ течения включает изучение поведения жидкостей и газов при определенных условиях в соответствии с законами сохранения массы, импульса и энергии.

Основные уравнения включают:

- Уравнение неразрывности: Представляет собой закон сохранения массы в текучей среде.
- Уравнения Навье-Стокса: Описывают движение вязких текучих сред.
- Теория пограничного слоя: Исследует течение текучей среды вблизи поверхности твердых тел.

Теплообмен

Power SIM позволяет моделировать перенос тепловой энергии внутри и между различными средами.

Основные уравнения включают:

- Теплопроводность: Перенос тепла через материалы в силу градиентов температуры, описываемый законом Фурье.
- Конвекция: Теплообмен между твердой поверхностью и текучей средой, описываемый законом Ньютона-Рихмана.
- Тепловое излучение: Испускание энергии посредством электромагнитных волн, описываемое законом Стефана-Больцмана.
- Уравнение энергии: Учитывает эффекты теплопроводности, конвекции и излучения в контексте течения текучей среды.

Анализ излучения

Анализ излучения фокусируется на переносе энергии посредством электромагнитных волн.

Основные уравнения включают:

- Радиационный теплообмен: Измеряет обмен энергией за счет теплового излучения между поверхностями и внутри участвующих сред.
- Радиационные свойства: Включает свойства материалов, такие как коэффициент излучения, коэффициент поглощения, коэффициент отражения и коэффициент пропускания.
- Угловые коэффициенты: Определяют долю излучения, которой обмениваются поверхности.
- Уравнение радиационного теплообмена (RTE): Описывает перенос излучения в различных средах.

Анализ целостности питания

Анализ целостности питания обеспечивает надежность работы систем распределения питания при минимизации шума и колебаний напряжения.

Основные уравнения включают:

- Анализ падения напряжения: Оценка падения напряжения в цепях распределения питания, обусловленного собственным сопротивлением и индуктивностью цепей.
- Анализ целостности сигнала: Изучает качество электрического сигнала, включая перекрестные помехи, отражения сигнала и неоднородности импеданса.

- Анализ электромагнитной совместимости (ЭМС): Гарантирует, что электронные системы будут функционировать без взаимных помех.
- Анализ паразитных эффектов: Учет непреднамеренно возникающих в системе дополнительных индуктивностей, емкостей и сопротивлений, которые ухудшают ее рабочие характеристики.

Анализ течения

В этом разделе представлен всесторонний обзор фундаментальных концепций и моделей, используемых в Power SIM для анализа течения. В ней описаны различные модели численного моделирования, их основные концепции и методы анализа течения.

Система уравнений Навье-Стокса

Процессы движения жидкости и теплообмена подчиняются фундаментальным законам сохранения, которые можно представить в виде системы нелинейных уравнений в частных производных (УЧП). Эти уравнения описывают, как свойства текучей среды, такие как скорость, давление, температура и концентрация компонентов смеси, изменяются в пространстве и времени. К основным законам сохранения относятся:

- Закон сохранения массы (уравнение неразрывности)
- Закон сохранения импульса (уравнения Навье-Стокса)
- Закон сохранения энергии (уравнение для энергии)
- Сохранение компонентов смеси (уравнение переноса компонентов)

Для описания параметров движущейся текучей среды используется система уравнений Навье-Стокса. Уравнения Навье-Стокса являются расширением уравнений Эйлера и учитывают влияние вязкости на течение. Система уравнений состоит из:

- нестационарного уравнения неразрывности для сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_M^p$$

- нестационарных уравнений сохранения импульса:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i + S_{Ii}^p, i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$$

- нестационарного уравнения сохранения энергии:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i] + \frac{\partial p}{\partial t} + S_i u_i + S_H^p + Q_H$$

$$H = h(P, T, y) + \frac{u^2}{2} + k$$

где u — скорость текучей среды; ρ плотность текучей среды; S_i — распределенная по массе внешняя сила на единицу массы, обусловленная сопротивлением пористой среды, силой тяжести и вращением системы координат; H — полная энтальпия в локальной системе координат; $h(P, T, y)$ — тепловая энтальпия при заданном давлении (P), температуре (T) и составе смеси y , $y = (y_1, \dots, y_n)$ — вектор концентраций компонентов; k — турбулентная

кинетическая энергия, S_M^p, S_{Ii}^p, S_H^p — дополнительные члены межфазного обмена, обусловленные взаимодействием частиц по методу Эйлера–Лагранжа; Q_H — объемная мощность источника или стока тепла; τ_{ij} — тензор вязких напряжений; q_i — диффузионный тепловой поток.

Вязкое сдвиговое напряжение определяется как:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$$

Тензор напряжений Рейнольдса определяется как:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

где δ_{ij} — дельта-функция Кронекера (равна единице при $i = j$, и равна нулю в противном случае), μ — динамическая вязкость, μ_t турбулентная (вихревая) вязкость, k — турбулентная кинетическая энергия (для ламинарного течения $\mu_t = 0$ and $k = 0$).

Диффузионный тепловой поток q_i для числа Льюиса $Le = 1$ определяется как:

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3$$

где Pr — число Прандтля, постоянная $\sigma_c = 0.9$, а h — тепловая энтальпия.

В Power SIM используется модель k - ε , которая описывает турбулентную кинетическую энергию k и скорость ее диссипации ε следующим образом:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon$$

В рамках модели k - ε коэффициент турбулентной вязкости μ_t определяется как:

$$\mu_t = f_\mu \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$$

где f_μ — фактор турбулентной вязкости:

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.0165 R_y)]^2 \cdot \left(1 + \frac{20.5}{R_T} \right)$$

$$R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}, \quad R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}$$

а y — расстояние от стенки с учетом ламинарно-турбулентного перехода.

Где источниковые члены S_k и S_ε определяются как:

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon_2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$$

Здесь P_B представляет генерацию турбулентности за счет сил плавучести и может быть записано как:

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

где g_i — компонента ускорения свободного падения в направлении x_i , константа $\sigma_B = 0.9$. Константа C_B равна 1, когда $P_B > 0$, и 0, когда $P_B \leq 0$.

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu} \right)^3, f_2 = 1 - \exp(-R_T^2)$$

Константы $c_\mu, c_{\varepsilon_1}, c_{\varepsilon_2}, \sigma_\varepsilon, \sigma_k$ определяются эмпирически и для k - ε равны:

$$c_\mu = 0.09, c_{\varepsilon_1} = 1.44, c_{\varepsilon_2} = 1.92, \sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_k = 1$$

Модель ламинарного и турбулентного пограничного слоя

Модель ламинарного и турбулентного пограничного слоя используется для описания течения в пристеночной области, где эффекты вязкости значительно влияют на поведение течения. Эта модель основывается на так называемой *Модификации метода пристеночных функций* (Modified Wall Functions) и используется для расчетов характеристик течений с высокой точностью.

Ключевые характеристики:

1. *Модификации метода пристеночных функций*: Метод используется для описания ламинарных и турбулентных течений около стенок, а также для описания переходов от ламинарного к турбулентному течению и обратно.
2. *Профиль Ван-Дриста*: Данная модель основана на профиле Ван-Дриста, в котором учитывается влияние турбулентности на распределение скорости в пограничном слое. Этот профиль повышает точность расчета, особенно в потоках с большим числом Рейнольдса, так как он лучше описывает распределение скорости по сравнению со стандартным логарифмическим профилем.
3. *Моделирование ламинарно-турбулентного перехода*: Модель описывает переход от ламинарного течения к турбулентному, а также смещение этой структуры под влиянием локальных условий течения, таких как число Рейнольдса и уровень возмущений. Это особенно важно в случаях, когда условия течения меняются, например, при отрыве или повторном присоединении пограничного слоя.
4. *Интегральный метод расчета пограничного слоя*: Интегральный метод расчета пограничного слоя используется в случаях, когда размер ячейки сетки у стенки превышает толщину пограничного слоя. В этом методе рассчитываются профили скорости и температуры путем интегрирования уравнений Навье-Стокса в пределах пограничного слоя. Таким образом избегают избыточного дробления сетки, достигая баланса между точностью расчета и вычислительной эффективностью.
5. *Граничные условия*: Модель предоставляет необходимые граничные условия для уравнений сохранения, включая уравнения сохранения импульса, массы и энергии.

Теплообмен

В этом разделе объясняются основы теории анализа процессов теплообмена и представлены модели, реализованные в Power SIM.

Основы теплообмена

Теплообмен между твердыми телами

Теплообмен в конструкционных материалах регулируется принципами сохранения энергии и свойствами материала. Power SIM позволяет моделировать процессы теплообмена в твердых средах как изолированно, так и в сочетании с процессами течения.

Сохранение энергии в твердых телах

Уравнение сохранения энергии для теплообмена в твердых телах имеет вид:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H$$

где:

- e — удельная внутренняя энергия,
- T — температура,
- λ_i — тензор теплопроводности,
- Q_H представляет собой источники тепла или потребители тока на единицу объема.

В Power SIM используется линейная зависимость удельной внутренней энергии e от температуры по формуле $e = C \cdot T$, где C удельная теплоемкость материала. Это соотношение выражает способность материалов накапливать тепловую энергию.

Анизотропная и изотропная теплопроводность

Теплопроводность в твердых средах может быть как изотропной, так и анизотропной. В изотропных материалах теплопроводность одинакова во всех направлениях, что упрощает тепловой анализ:

$$\lambda_{11} = \lambda_{22} = \lambda_{33} = \lambda$$

Однако многие инженерные материалы обладают анизотропной теплопроводностью, при которой перенос тепла зависит от направления. Такая анизотропия характеризуется

различными собственными значениями λ_i тензора теплопроводности:

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} \end{pmatrix}$$

Power SIM позволяет моделировать как изотропные, так и анизотропные материалы, обеспечивая точный расчет теплообмена в средах с анизотропией тепловых свойств.

Источники тепла в твердых телах

На теплообмен внутри твердых тел влияет не только теплопроводность, но и внутреннее тепловыделение или поглощение.

Общие источники тепла: Q_H

Общий источник тепла Q_H — это удельное тепловыделение (или поглощение) на единицу объема. Оно включает различные типы внутренних источников тепла, включая химические реакции, фазовые переходы или механическую работу.

Джоулев нагрев: Q_J

Прохождение электрического тока через объект сопровождается выделением тепла (джоулев нагрев). Для изотропных материалов джоулев нагрев определяется по формуле:

$$Q_J = r \cdot j^2$$

где:

- r — удельное электрическое сопротивление,
- j — плотность электрического тока.

Power SIM позволяет учитывать электрические токи как дополнительный источник тепла в среде, что приводит к соответствующему повышению температуры материала.

Контактное термическое сопротивление

На практике твердотельные объекты часто состоят из нескольких контактирующих друг с другом материалов. Границы раздела между этими материалами создают дополнительное сопротивление теплопередаче. Это явление называется термическим контактным сопротивлением.

Термическая контактная проводимость

В расчетах Power SIM термическое контактное сопротивление выражается через контактную проводимость. Power SIM учитывает все контактные сопротивления на контактных поверхностях.

Моделирование тонких промежуточных слоев

В случаях, когда между контактирующими твердыми телами (или между твердым телом и текучей средой) имеется тонкий промежуточный слой из другого материала. Power SIM позволяет учесть его влияние, задав свойства и толщину материала. Значение теплопроводности для промежуточного слоя извлекается из **Инженерной базы данных**, что обеспечивает точное моделирование теплопроводности на границе раздела.

Электрическое контактное сопротивление

Подобно термическому контактному сопротивлению, электрическое контактное сопротивление может влиять на теплообмен. При наличии электрического контактного сопротивления на границе раздела материалов выделяется дополнительное джоулево тепло,

которое Power SIM учитывает это явление как соответствующий источник тепла Q_J .

Поверхностные тепловые источники и потребители тока: Эффект Пельтье

Эффект Пельтье возникает, когда два различных проводящих материала соединены в электрическую цепь. Power SIM позволяет моделировать этот поверхностный источник

(или сток) тепла, задав коэффициент Пельтье, который является свойством материала. Программное обеспечение автоматически корректирует тепловые граничные условия для учета теплообмена, обусловленного эффектом Пельтье.

Тепловой поток на границах раздела

Power SIM рассчитывает обмен энергией между твердым телом и текучей средой. В данном расчете учитываются температура твердой поверхности и характеристики пограничного слоя текучей среды, что обеспечивает тепловую связь между ними.

Пограничные слои текучей среды

Свойства пограничного слоя текучей среды, такие как градиенты температуры и динамика потока, определяют интенсивность теплообмена. Power SIM позволяет моделировать детальные профили пограничного слоя для повышения точности расчетов, включающих взаимодействия «текучая среда-твердое тело».

Термодинамические свойства

Следующие уравнения и функции используются для описания термодинамических свойств текучей среды.

Уравнение состояния текучей среды можно записать следующим образом:

$$\rho = \rho(p, T, y),$$

$$h = h(p, T, y).$$

где ρ — плотность текучей среды, кг/м^3 , p — давление, Па, T — температура, К, y — вектор концентрации компонентов смеси, h — энтальпия.

Можно записать следующее термодинамическое соотношение:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_{T,y} = \frac{1 - \beta}{\rho},$$

где безразмерный коэффициент теплового расширения равен:

$$\beta = - \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right)_{p,y} .$$

Для идеального газа уравнение состояния имеет вид:

$$\rho = \frac{p}{R_{\mu} \cdot T} ,$$

где R_{μ} — молярная газовая постоянная, равная универсальной газовой постоянной R_{univ} , деленной на молярную массу текучей среды M (для однокомпонентного газа). Для смеси газов R_{μ} можно записать в виде:

$$\rho_{\mu} = R \sum_i \frac{y_i}{M_i} .$$

Теплофизические свойства приведены в Таблице 1:

Табл. 2. Теплофизические свойства текучих сред

Имя	Текучая среда	Смесь
Плотность	$\rho = f(T)$	$\rho = \left(\sum_i \frac{y_i}{\rho_i} \right)^{-1}$
Удельная теплоемкость при постоянном давлении	$c_p = f(T)$	$c_p = \sum_i y_i \cdot c_{pi}$
Удельная теплоемкость при постоянном объеме	$c_v = f(T)$	$c_v = \sum_i y_i \cdot c_{vi}$
Динамическая вязкость	$v = \frac{\mu}{\rho}$	$v = \sum_i \frac{y_i \cdot \mu_i}{\rho_i}$
Коэффициент теплопроводности	$k = f(T)$	$k = \left(\sum_i y_i \cdot k_i^{-2} \right)^{-1/2}$

Анализ излучения

Наряду с теплопроводностью и конвекцией, при анализе теплообмена необходимо учитывать также процессы излучения. Для точного анализа и проектирования таких систем, как печи, солнечные коллекторы, системы охлаждения электронных устройств и управления энергопотреблением зданий, необходимо уметь точно моделировать процессы радиационного теплообмена. В данной статье рассматриваются теоретические основы радиационного теплообмена, используемые в Power SIM. Особое внимание уделяется таким

ключевым понятиям, как модели излучения, граничные условия и взаимодействие с другими типами теплообмена.

Радиационный теплообмен в твердых телах

Радиационный теплообмен включает в себя испускание, распространение и поглощение электромагнитной энергии между поверхностями. В отличие от теплопроводности и конвекции, для передачи излучения не требуется среда — оно может передаваться в вакууме или через прозрачные среды. В Power SIM расчет радиационного теплообмена используется совместно с расчетом теплопроводности и конвекции. Это позволяет получить более полное представление о тепловой системе.

Фундаментальные принципы

Радиационный теплообмен между твердыми телами описывается законом Стефана–Больцмана и принципами обмена излучением между поверхностями. Интенсивность радиационного теплообмена зависит от коэффициента излучения поверхностей, их температур и геометрической конфигурации системы.

Метод дискретного переноса

В Power SIM реализован метод дискретного переноса (DTM). Этот метод моделирует излучение от элемента поверхности в виде единственного луча, испускаемого в определенном направлении телесного угла. Ключевые аспекты:

- **Трассировка лучей:** Излучение моделируется как набор дискретных лучей, испускаемых с поверхности излучения. Эти лучи распространяются через текучую среду и прозрачную твердую среду, пока не пересекут другую излучающую поверхность.
- **Факторы обмена:** Когда лучи пересекают другие поверхности, рассчитывается ряд дополнительных факторов, называемых факторами обмена. Эти факторы определяют общее количество энергии излучения, которое одна поверхность может испускать в сторону другой. Они аналогичны классическим угловым коэффициентам в теории излучения, с тем отличием, что они имеют дискретные значения.
- **Формирование матрицы:** На первом этапе моделирования рассчитываются факторы обмена между элементами вычислительной сетки для радиационной поверхности. На этом шаге создается матрица коэффициентов, которая станет частью системы

уравнений, решаемых итерационно. Эти уравнения описывают радиационные взаимодействия между всеми интересующими поверхностями в системе.

- **Преимущества:** Метод DTM хорошо работает со сложными геометриями, для которых системы трассировки лучей могут корректно отслеживать распространение излучения между границами. Он хорошо подходит для систем с четко заданными излучающими поверхностями и может учитывать многократные отражения и эффекты затенения.
- **Ограничения:** Точность метода DTM зависит от дискретизации элементов поверхности и плотности трассировки лучей. Для поддержания высокой точности необходимо использовать более мелкую дискретизацию, что увеличивает вычислительные затраты. Кроме того, в модели DTM принято допущение о прозрачности текущих сред для излучения. Это не позволяет использовать модель для задач, в которых участие среды в процессе излучения существенно.

Граничные условия и внешнее излучение

Power SIM предусматривает возможность задавать границы дальнего поля и входы/выходы модели в качестве внешних источников излучения. Для этих внешних элементов можно задать различные модели теплового и солнечного излучения.

Тепловое излучение от границ

Внешние границы способны испускать или поглощать тепловое излучение в зависимости от заданных коэффициентов излучения и температур. Эта функциональность позволяет моделировать среды, где происходит значительный теплообмен с соседними структурами или окружающей средой.

Солнечное излучение

Источник солнечной энергии можно учесть в модели, задав его параметры — географическое положение (широта и долгота) и время. Также солнечное излучение можно задать в виде вектора с постоянным или переменным направлением и с интенсивностью, скорректированной с учетом времени года. Данная функция играет ключевую роль в анализе систем, использующих солнечную энергию, таких как фотоэлектрические панели и гелиотермальные установки.

Допущения и упрощения

Power SIM позволяет экономить время и вычислительные ресурсы за счет использования ряда допущений в моделях радиационного теплообмена. Эти допущения упрощают моделирование и снижают вычислительные затраты.

- Прозрачные текучие среды: В пределах расчетной области предполагается, что текучие среды не излучают и не поглощают тепловое излучение. Это допущение справедливо для случаев, когда текучая среда оптически прозрачна для интересующих длин волн или когда ее участие в излучении минимально.
- Стационарный и нестационарный анализ: Хотя излучение по своей природе является динамическим процессом, его учет в нестационарных задачах сопряжен с дополнительными сложностями, так как требует отслеживания изменений температуры и радиационных свойств поверхностей во времени.

Сопряженный теплообмен с учетом излучения

Power SIM эффективно интегрирует модели радиационного теплообмена с расчетом теплопроводности и конвекции для проведения комплексного теплового анализа.

- Баланс энергии: Уравнение для энергии каждого твердого тела включает члены, отвечающие за теплопроводность и излучение. Аналогично поток через границы раздела «текучая среда-твердое тело» также включает конвекцию и излучение.
- Итерационное решение: Сочетание лучистого теплообмена с другими видами теплообмена обычно требует итерационных схем решения. В Power SIM это реализуется путем решения систем уравнений для обеспечения согласованности и сходимости.

Окружающая среда и солнечное излучение

Для моделирования тепловых процессов в инженерных и архитектурных приложениях необходимо точно смоделировать излучение окружающей среды и солнечное излучение. Задачи повышения энергоэффективности зданий, оптимизации солнечных коллекторов и управления микроклиматом в помещениях требуют глубокого понимания и точного моделирования взаимодействия излучения с материалами и конструкциями. Power SIM предлагает эффективный инструментарий для моделирования излучения окружающей среды и солнечного излучения, позволяющий проводить комплексный тепловой анализ. В данной

статье рассматриваются теоретические аспекты излучения окружающей среды и солнечного излучения, применяемые в Power SIM, а именно: их определения, методы моделирования и математический аппарат для численного моделирования вызываемых ими эффектов.

Излучение окружающей среды и солнечное излучение

Излучение — один из механизмов теплообмена, который включает в себя две составляющие: излучение окружающей среды и солнечное излучение. В Power SIM реализована возможность раздельного учета этих двух типов излучения, поскольку они обладают рядом характерных отличий.

Излучение окружающей среды

Излучение окружающей среды представляет собой ненаправленный поток энергии, источником которого является внешняя среда по отношению к анализируемой системе. В качестве аналогии можно представить стены бесконечно большой комнаты, окружающей рассматриваемое тело или конструкцию. Характеристики излучения окружающей среды в Power SIM:

- **Ненаправленный поток:** В отличие от солнечного излучения, излучение окружающей среды не имеет определенного направления, соответственно, оно испускается во всех направлениях одинаково, равномерно распределяясь по телу.
- **Предопределенные параметры:** Интенсивность и распределение энергии излучения определяются двумя факторами: коэффициентом излучения и температурой. Именно эти параметры определяют излучение окружающей среды.

Для некоторых систем теплообмен с внешней средой является определяющим фактором, поэтому в таких случаях необходимо учитывать, в том числе, излучение окружающей среды. В частности, излучение окружающей среды играет важную роль при моделировании зданий, где необходимо учитывать теплообмен через стены и окна с внешней средой.

Солнечное излучение

В отличие от излучения окружающей среды, солнечное излучение — это направленный поток энергии, исходящий от Солнца. Этот вид излучения характеризуется своей интенсивностью, которая меняется в зависимости от времени суток, географического положения и атмосферных условий. Важные характеристики моделирования солнечного излучения в Power SIM:

- **Направленный поток:** Солнечное излучение характеризуется направленностью, то есть оно определяется положением Солнца относительно поверхности Земли.
- **Энергетический поток (интенсивность):** Количество энергии, которое может быть получено от объекта под прямыми солнечными лучами, зависящее от интенсивности солнечного излучения.
- **Вектор направления:** Путь солнечного излучения относительно поверхности Земли характеризуется вектором направления, который определяется зенитным и азимутальным углами Солнца.

Помимо учета солнечного излучения на границах расчетной области, в Power SIM предусмотрена возможность задавать внутренние источники направленного излучения. Это обеспечивает гибкость при моделировании различных сценариев солнечного облучения.

Математическое моделирование солнечного излучения

Для корректного моделирования солнечного излучения требуется высокая точность расчета вектора направления, уровня интенсивности и превалирующих условий. Для решения этой задачи в Power SIM реализован ряд математических алгоритмов.

Вектор направления солнечного излучения

Вектор направления солнечного излучения задает углы, под которыми солнечная энергия падает на различные поверхности. Эту энергию можно оценить количественно, используя зенитный и азимутальный углы, описывающие положение Солнца относительно Земли.

- **Направление зенита $\bar{Z}$** : Представляет собой вертикальное направление, перпендикулярное поверхности Земли.
- **Направление на север $\bar{N}$** : Указывает на истинный север.
- **Направление на восток $\bar{E}$** : Указывает на восток и определяется как:

$$\bar{E} = \bar{N} \times \bar{Z}$$

Вектор направления солнечного излучения $\bar{S}$ рассчитывается следующим образом:

$$\bar{S} = [\bar{E} \cdot \sin \Phi_S + \bar{N} \cdot \cos \Phi_S] \cdot \cos \theta_S + \bar{Z} \cdot \sin \theta_S$$

где:

- θ — это угловая высота Солнца, то есть угол между вектором солнечного излучения и горизонтальной плоскостью.
- Φ — это азимутальный угол Солнца, измеряемый по часовой стрелке от направления на север до проекции вектора солнечного излучения на горизонтальную плоскость.

Угловая высота Солнца θ

Угловая высота Солнца меняется в течение дня и в зависимости от времени года. Ее можно аппроксимировать с помощью формулы:

$$\sin \theta_s = \cos h \cos \delta \cos \Phi + \sin \delta \sin \Phi$$

где:

- Φ — это местная широта.
- δ — это угол склонения Солнца, зависящий от дня года.
- h — это часовой угол, представляющий время суток относительно солнечного полудня

$$h = \frac{t \cdot 2\pi}{86400} - \pi$$

и рассчитываемый по формуле

Азимутальный угол Солнца Φ

Азимутальный угол Солнца рассчитывается, исходя из положения Солнца на небе и может быть рассчитан по формуле:

$$\sin \Phi_s = - \frac{\sin h \cos \delta}{\cos \theta_s}$$

$$\cos \Phi_s = \frac{\sin \delta \cos \Phi - \cos h \cos \delta \sin \Phi}{\cos \theta_s}$$

Данная формула учитывает время суток до и после полудня, основываясь на положении Солнца относительно истинного севера.

Склонение Солнца δ

Склонение Солнца можно определить, если учесть наклон оси вращения Земли и ее положение на эллиптической орбите вокруг Солнца. Для этого используется формула:

$$\delta = -23.44^\circ \times \cos \left[\frac{360^\circ}{365} (N + 10) \right]$$

где:

- N — это день года, начиная с $N = 0$ в полночь 1 января по всемирному координированному времени (UTC).
- Константа 10 учитывает примерное число дней от зимнего солнцестояния до 1 января.
- 23.44 — это наклон оси Земли.

Интенсивность солнечного излучения

На интенсивность Q_s солнечного излучения, получаемого в определенном месте на поверхности Земли, влияют такие факторы, как атмосферные условия, облачность и положение Солнца. Интенсивность рассчитывается по формуле:

$$q_s(\theta_s) = \frac{Q_{s0}^*}{1 + C_m m_1} \cdot (1 - n)$$

где:

- $C_m = 0.092$ — это эмпирическая постоянная.
- $m_1 = \frac{1.029}{\sin \theta_s + 0.029}$ учитывает изменение интенсивности в зависимости от высоты Солнца.

- n — это фактор облачности, варьирующийся от 0 (ясное небо) до 1 (полностью пасмурно).

- $Q_{s0}^* = 1360 \text{ W/m}^2$ — это солнечная постоянная, представляющая поток солнечной энергии на верхней границе атмосферы Земли.

Учет местоположения, времени и атмосферных эффектов

На интенсивность и направление солнечного излучения дополнительно влияют атмосферные условия Земли, а также местоположение и время наблюдателя.

Солнечная облученность и влияющие на нее факторы

Солнечная облученность, т.е. мощность излучения, приходящаяся на единицу площади, зависит от орбитального положения Земли, а также от времени и местоположения наблюдателя. Модель LTT использует эти параметры для оценки перпендикулярной лучу облученности B_n , обеспечивая более точные результаты для различных местоположений.

Облученность, перпендикулярная лучу, B_n

B_n — это плотность потока солнечной энергии, перпендикулярного солнечному лучу. Единица измерения — ватты на квадратный метр. Эта величина учитывает фактор мутности Линке, который характеризует ослабление солнечного излучения взвешенными в атмосфере частицами и определяет ее общую прозрачность.

$$B_n = Q_{s0} \epsilon_j \exp [-0.8662 \cdot T_{LK} \cdot m \cdot \delta_r(m)]$$

Где:

- $Q_{s0} = 1367 \text{ Вт/м}^2$: Солнечная постоянная: средняя плотность потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы.
- ϵ_j : Поправочный коэффициент для среднего солнечного расстояния на основе номера юлианского дня J .
- m Относительная оптическая воздушная масса, скорректированная на атмосферное давление станции.
- T_{LK} : Фактор мутности Линке при воздушной массе $m = 2$, указывающий на прозрачность атмосферы.
- $\delta_r(m)$: Рэлеевская оптическая толщина для чистого неба в воздушной массе m .

Поправка на расстояние от Земли до Солнца, ϵ_j

В течение года расстояние от Земли до Солнца изменяется из-за эллиптической формы земной орбиты, что, в свою очередь, приводит к колебаниям получаемой солнечной облученности. Для учета этого эффекта применяется поправочный коэффициент ϵ_j .

$$\epsilon_j = 1.0 + 0.03344 \cos(J' - 2.80)$$

Где:

- J' : Дневной угол в градусах, рассчитываемый по формуле:

$$J' = J \cdot \left(\frac{360}{365} \right) \cdot \left(\frac{\pi}{180} \right)$$

- J : Номер юлианского дня: порядковый номер дня в году (например, 1 января = 1, 1 февраля = 32, 1 марта = 60 в невисокосном году).

Данная поправка обеспечивает соответствие результатов моделирования колебаниям солнечной облученности, обусловленным эксцентриситетом земной орбиты.

Оптическая воздушная масса m и атмосферная поправка

Оптическая воздушная масса определяется как отношение длины пути, проходимого солнечным излучением в атмосфере, к длине пути излучения, падающего по зениту. Данная величина является функцией угловой высоты Солнца и имеет ключевое значение при определении ослабления солнечной облученности.

Относительная оптическая воздушная масса на уровне моря, m_{SL}

Относительную оптическую воздушную массу на уровне моря можно рассчитать по формуле:

$$m_{SL} = \frac{1}{\sin(\theta)} \cdot (1 + 0.15 \cdot (93.885 - \theta)^{-1.253})$$

Где:

- θ_s : Угловая высота Солнца: угол между вектором солнечного излучения и горизонтальной плоскостью.

Поправка на местное атмосферное давление

Атмосферное давление зависит от высоты. Воздушную массу также необходимо скорректировать с учетом отличия местного атмосферного давления P и давления на уровне моря P_0 .

$$m = m_{SL} \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

Где:

- P : Местное атмосферное давление.
- P_0 : Стандартное атмосферное давление на уровне моря (1013.25 гПа).

Поправка к давлению для приведения к уровню моря

Корректировка давления на уровне моря может быть рассчитана как

$$P/P_0 = [1 - 0.00002256 \cdot h]^{5.256}$$

Где:

- h : Высота над уровнем моря в метрах.

Оптическая толщина Рэлея δ_r

На интенсивность солнечного излучения влияет рэлеевское рассеяние на молекулах и мельчайших частицах пыли, находящихся в воздухе. Эффект рассеяния измеряется через оптическую толщину Рэлея, которая является функцией воздушной массы.

$$1/\delta_r(m) = 6.6296 + 1.7513m - 0.1202m^2 + 0.0065m^3 - 0.00013m^4$$

Где:

- m : Оптическая воздушная масса, скорректированная на высоту.

Для больших воздушных масс ($m > 20$) поправка на оптическую толщину Рэлея задается выражением:

$$\frac{1}{\delta(m)} = 10.4 + 0.718 \cdot m$$

Фактор облачности n

Облачный покров ослабляет солнечное облучение. Фактор облачности n характеризует состояние неба в диапазоне от 0 (абсолютно ясно) до 1 (сплошная облачность). Влияние фактора N на облученность описывается следующим соотношением:

$$I_{\text{solar}} = I_{\text{solar, clear}} \cdot (1 - n)$$

Где:

- I_{solar} : Скорректированная интенсивность солнечного излучения.
- $I_{\text{solar, clear}}$: Интенсивность солнечного излучения при ясном небе.
- n Фактор облачности.

Модель дискретного переноса

Численное моделирование имеет важное значение для прогнозирования и анализа явлений теплового излучения в различных инженерных и научных областях. Среди всех доступных методологий модель дискретного переноса (DT) ценится за свою гибкость и точность. Основываясь на моделях потоков, модель DT объединяет элементы зонального метода Хоттеля с методами Монте-Карло и в сочетании с другими разработанными техниками представляет собой эффективный инструмент для прогнозного моделирования радиационного теплообмена в сложных системах. В этой части будут рассмотрены основные аспекты модели дискретного переноса, используемые допущения, а также применение модели в продукте Power SIM.

Обзор модели дискретного переноса

Модель дискретного переноса — это численный метод, применяемый для моделирования радиационного теплообмена путем разделения поля излучения на конечное число элементов или лучей. В отличие от непрерывных моделей, модель DT использует концепцию дискретных лучей и отслеживает их движение через поверхности и материалы в областях моделирования. Этот подход сочетает точность с вычислительной эффективностью, что позволяет применять его для решения широкого спектра задач: от энергетического моделирования зданий до анализа промышленных процессов.

Истоки и развитие модели

Модель DT берет свое начало от модели потока. Для упрощения моделирования процесса радиационного переноса в модели потоков используется усреднение потоков энергии. Модель DT улучшает этот подход, используя отслеживание дискретных лучей аналогично использованию случайной выборки Монте-Карло при решении уравнений переноса излучения. Кроме того, модель DT заимствует некоторые черты зонального метода Хоттеля, который заключается в разделении пространства моделирования на зоны для повышения точности вычислений. Благодаря удачному сочетанию этих атрибутов модель DT лучше справляется со сложными геометриями и свойствами материалов, чем другие модели.

Основные допущения модели дискретного переноса

Для упрощения расчетов и повышения эффективности в основу модели DT заложен ряд ключевых допущений.

Диффузное излучение с твердых поверхностей

Одно из ключевых допущений модели DT состоит в том, что тепловое излучение рассматривается как поверхностное явление, причем как собственное, так и отраженное излучение считается диффузным. Это означает, что энергия излучается с твердой поверхности одинаково во всех направлениях. Это явление известно как закон Ламберта. Согласно закону Ламберта, интенсивность теплового излучения, испускаемого элементом источника на единицу площади в расчете на единицу телесного угла, остается постоянной во всех направлениях излучения. Это допущение в целом справедливо для незеркальных поверхностей, неровности которых обеспечивают равномерное рассеяние излучаемой энергии.

Излучательные свойства: Допущение об идеально сером теле

Модель DT предполагает, что излучающие твердые поверхности, не являющиеся ни абсолютно черными, ни абсолютно белыми, являются идеально серыми телами. Серое тело — это модель, описывающая излучательную способность реальных тел, однако ее применение имеет ряд ограничений. Идеальное серое тело обладает спектром излучательной способности, подобным непрерывному спектру абсолютно черного тела, но его монохроматический коэффициент излучения не зависит от длины волны. Это означает, что можно сделать допущение о постоянстве коэффициента излучения для разных длин волн. Следовательно, это возможно для . Кроме того, для некоторых материалов и состояний поверхности коэффициент излучения серого тела может зависеть от температуры поверхности. Это добавляет дополнительную сложность в задачу, которую при необходимости можно легко учесть в модели.

Независимость взаимодействия солнечного и теплового излучения

В модели DT солнечное тепло и тепло от других источников рассматриваются независимо. Данный принцип разделения подразумевает, что взаимодействие поверхности с солнечным излучением затрагивает только процессы его поглощения и отражения, но не оказывает существенного влияния на обмен тепловым излучением с другими объектами в системе. Такое разделение позволяет анализировать различные источники излучения независимо, что повышает гибкость и масштабируемость модели.

Прозрачность твердых тел для излучения

Модель учитывает прозрачность твердых тел для излучения, позволяя задавать их как прозрачные для определенных типов излучения:

- Прозрачность для солнечного излучения: Можно настроить модель твердых тел таким образом, чтобы они пропускали солнечное излучение без какого-либо поглощения.
- Прозрачность для теплового излучения: В модели можно указать, что твердые тела прозрачны для теплового излучения от всех источников, кроме солнечного.
- Прозрачность для обоих типов излучения: Твердые тела можно задать как прозрачные одновременно для солнечного и теплового излучения, что позволяет моделировать, например, некоторые виды стекла или пластика.

Благодаря таким гибким настройкам можно точно смоделировать материалы с селективной прозрачностью. Данное свойство имеет ключевое значение в таких задачах, как расчет остекления зданий или анализ специализированных промышленных материалов.

Уравнения модели Дискретного переноса

В данном разделе рассматриваются используемые в Power SIM принципы взаимодействия излучения с поверхностью, включая излучение, поглощение и отражение как солнечной, так и тепловой энергии на поверхности.

Поверхности радиационного теплообмена в задачах теплопередачи

В теории теплообмена поверхностями радиационного теплообмена называют такие поверхности, которые активно участвуют в процессах излучения, поглощения и отражения тепла. Эти процессы обычно связаны с двумя основными типами излучения:

1. Тепловое излучение: Излучение, испускаемое поверхностью тела в зависимости от его температуры в соответствии с законом Стефана-Больцмана.
2. Солнечное излучение: Излучение Солнца, которое может поглощаться или отражаться различными поверхностями.

Для моделирования реалистичных тепловых условий крайне важно точно описывать эти виды взаимодействия.

Эмиссия теплового излучения с поверхностями радиационного теплообмена

Эти два компонента, тепловое и солнечное излучение, составляют основу взаимодействия с поверхностями радиационного теплообмена. Вместе они определяют тепловую эмиссию поверхностей радиационного теплообмена, которые испускают тепловое излучение в зависимости от своей температуры и излучательных характеристик.

Эмиссия теплового излучения

Закон Стефана-Больцмана математически описывает принцип, который определяет тепловое излучение, испускаемое поверхностью с определенной температурой и характеристиками абсолютно черного тела.

$$Q_T^{out} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot + (1 - \varepsilon) \cdot Q_T^{in}$$

- Q_T^{out} : Тепловой поток, излучаемый поверхностью (Вт)
- ε : Коэффициент излучения поверхности (безразмерный)

$$5.670 \times 10^{-8}, \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

- σ : Постоянная Стефана-Больцмана
- T : Абсолютная температура поверхности (K)
- A : Площадь поверхности радиационного теплообмена (m^2)

Пояснение:

- Коэффициент излучения ϵ : Представляет эффективность, с которой поверхность испускает тепловое излучение, по сравнению с абсолютно черным телом. Значение $\epsilon = 1$ соответствует абсолютно черному телу, тогда как $\epsilon < 1$ указывает на менее эффективное излучение.
- Зависимость от температуры: Величина теплового излучения, испускаемого телами, меняется в зависимости от абсолютной температуры и пропорциональна её четвертой степени. Это демонстрирует связь между изменением температуры и радиационным теплообменом.

Эмиссия солнечного излучения

Поверхность не испускает солнечное излучение, но взаимодействует с падающим на нее солнечным излучением. Однако для полноты картины и для учета любых активных источников солнечного излучения, например, солнечных панелей, мы определяем исходящее солнечное излучение следующим образом:

$$Q_S^{out} = (1 - \epsilon) \cdot (Q_S^{in} + Q_S^{source})$$

- Q_S^{in} : Падающее на поверхность солнечное излучение, отраженное от других поверхностей (Вт)
- Q_S^{source} : Излучение от солнечных источников, достигающее этой поверхности (Вт)

Пояснение:

- Падающее солнечное излучение Q_S^{in} : Обозначает солнечную энергию, которую получает поверхность.
- Испускаемое солнечное излучение Q_S^{out} : Любое солнечное излучение, отраженное или рассеянное поверхностью.

Результирующий радиационный баланс

Результирующее излучение Q^{net} : на поверхности радиационного теплообмена — это разность между всей излученной энергией — тепловой и солнечной — и всей поглощенной энергией от внутренних тепловых и внешних солнечных источников.

$$Q^{\text{net}} = Q^{\text{out}} - Q^{\text{in}} = (Q_T^{\text{out}} + Q_S^{\text{out}}) - (Q_T^{\text{in}} + Q_S^{\text{in}})$$

Где:

- Q^{net} : Результирующий радиационный тепловой поток на поверхности (Вт)
- Q^{out} : Полное исходящее излучение от поверхности
- Q^{in} : Полное падающее излучение на поверхность

Кластеризация и трассировка лучей

Power SIM применяет для моделирования радиационного теплообмена методы кластеризации и трассировки лучей, основанные на методе Монте-Карло с дискретными лучами. В данном разделе излагаются теоретические и практические основы методов, реализованных в Power SIM. Также анализируется зависимость точности расчета теплового потока от выделяемого объема памяти и вычислительных ресурсов.

Обзор методов кластеризации и трассировки лучей

Детальное моделирование излучения и переноса энергии в расчетной области требует трассировки лучей в обширных радиационных областях. Эта задача зачастую становится избыточно ресурсоемкой из-за огромного количества учитываемых взаимодействий. Для решения подобной проблемы в Power SIM реализован метод Монте-Карло с использованием дискретных лучей. Метод направлен на сокращение требуемого объема памяти и времени вычислений при одновременном повышении точности результатов численного моделирования.

Кластеризация ячеек расчетной сетки

Кластеризация заключается в объединении смежных ячеек расчетной сетки, аппроксимирующих поверхности радиационного теплообмена, в кластеры. Это достигается с помощью специального подхода, который учитывает площадь грани ячейки, а также угол между нормалью к грани и опорным направлением в частичной ячейке. В целом,

кластеризация преследует две основные цели: сократить количество лучей, необходимых для точного моделирования, и уменьшить время, затрачиваемое на вычисления.

Ключевые аспекты кластеризации:

- Площадь и ориентация граней: Как площадь, так и направление отдельных граней внутри кластера являются важными факторами для обеспечения необходимого уровня точности, с которой события кластера отражают свойства отдельных ячеек.
- Граничные условия для коэффициента излучения: Ячейки, находящиеся на стыке поверхностей с различными коэффициентами излучения, алгоритмически относятся к одной из них. Для сохранения уникальных тепловых характеристик каждой поверхности эти ячейки исключаются из кластеризации.

Кластеризация выполняется после первоначального создания расчетной сетки и повторяется после каждого шага адаптации сетки, чтобы гарантировать соблюдение всех ограничений кластеризации в ходе численного моделирования.

Трассировка лучей внутри кластеров

Трассировка лучей используется для моделирования распространения излучения в рассматриваемой области. Предполагается, что внутри каждого кластера лучи испускаются изотропно из всей области, ограниченной нормалью к поверхности кластера. Этот процесс также включает разделение полусферы на множество конусов одинаковой формы. Их ориентация задается зенитным углом θ и азимутальным углом Φ .

Процесс эмиссии лучей:

1. Разбиение телесного угла: Полусфера делится на телесные углы, каждый из которых задается своим зенитным и азимутальным углом. Полученные секции могут быть реконструированы с использованием как минимум трех зенитных углов в диапазоне от 0° до 90° относительно нормали и двенадцати азимутальных углов в диапазоне от 0° до 360° .
2. Направление луча: В пределах каждого телесного угла луч излучения испускается в случайно заданном направлении.
3. Трассировка лучей: Каждый луч трассируется через текучую среду и прозрачные твердые тела до тех пор, пока не достигнет границы расчетной области или не встретит кластер, принадлежащий другой поверхности радиационного теплообмена, который и будет являться целевым.

Интенсивность излучения тепловой энергии определяется результирующей площадью поперечного сечения, из которого испускаются лучи, и не зависит от характеристик самой поверхности-источника. Точность расчетов радиационного теплообмена будет определяться конфигурацией и числом задаваемых параметров.

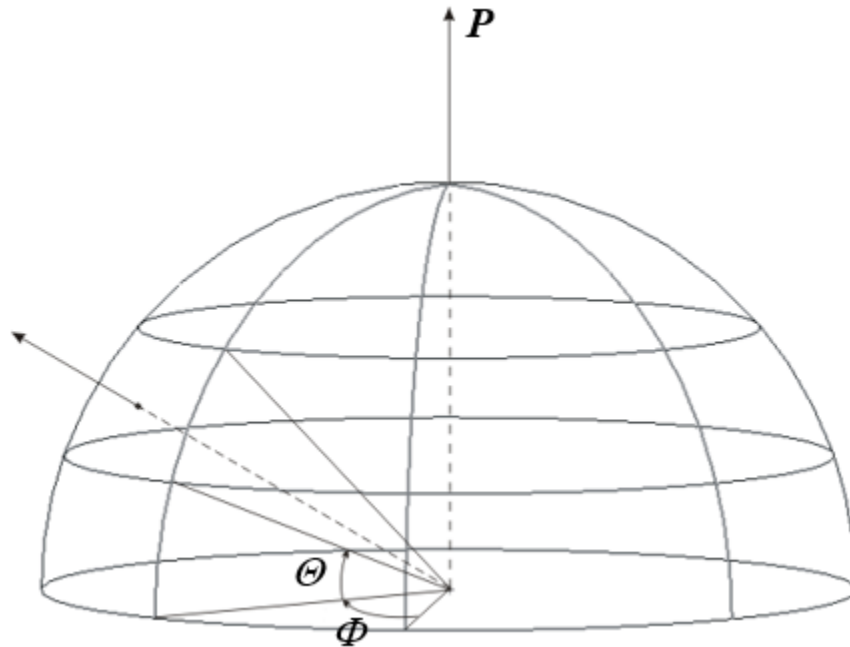


Рисунок 1. Определение лучей, испускаемых кластером: P — радиус вектор, Θ — зенитный (по широте) угол, Φ — азимутальный (по долготе) угол.

Математические основы

Для оценки распределения и количества лучей в Power SIM используются следующие уравнения:

Общее число лучей, испускаемых из кластера

Общее число лучей N , испускаемых из кластера, определяется количеством различных значений широты m и долготы n :

$$N = (m - 1) \cdot n + 1$$

Где:

- m — количество разных зенитных углов (широт), включая полярный луч.
- n — количество разных азимутальных углов (долгот), где $n = 2$ для 2D-моделирования.

Зависимость между m и n :

$$n = m \cdot 4$$

Пояснение:

- На значение m влияет уровень разрешения для расчета угловых коэффициентов, который устанавливается и определяется пользователем.
- Точное определение значения m позволяет повысить точность расчетов радиационного теплообмена. Однако это может значительно увеличить требуемое время вычислений.

Уровень разрешения угловых коэффициентов

Количество лучей, испускаемых из каждого кластера, контролируется уровнем разрешения для расчета угловых коэффициентов и направлено на достижение баланса между точностью и эффективностью использования вычислительных ресурсов:

- Более высокий уровень разрешения:
 - Плюсы: Повышенная точность расчетов радиационного теплообмена.
 - Минусы: Дольше время вычислений, выше объем используемой памяти.
- Более низкий уровень разрешения:
 - Плюсы: Потребляется меньше ресурсов при расчетах, увеличивается скорость моделирования.
 - Минусы: Риск получить менее точные результаты.

Для достижения корректного результата Power SIM предусматривает автоматическое изменение количества испускаемых лучей в зависимости от температуры поверхности и коэффициента излучения материала, обеспечивая равномерное распределение лучистого тепла по каждому телесному углу.

Взаимодействие лучей и распределение теплового потока

Когда луч попадает на область кластера другой поверхности радиационного теплообмена, переносимая им энергия равномерно распределяется по площади поверхности этого

кластера. В случае, если несколько лучей попадают в один и тот же целевой кластер, тепловые вклады от разных лучей суммируются. Для решения проблем неоднородности, возникающей в результате неравномерного распределения падающего излучения, в Power SIM используются следующие методы:

1. Распределение тепла: Этот метод изменяет неоднородное распределение излучаемого тепла, усредняя его по площади поверхности целевого кластера.
2. Сглаживание: Частичная передача теплового излучения соседним кластерам для смягчения проблем локальной концентрации.
3. Интеграция с теплопроводностью: Метод моделирует теплопроводность в твердотельных областях для уменьшения незначительных перепадов температуры, вызванных неравномерным распределением теплового излучения.

Этот набор методов гарантирует, что модель корректно отображает процесс радиационного теплообмена, который происходит непрерывно по всей области моделирования.

Расчет угловых коэффициентов

Одним из наиболее важных шагов в моделировании радиационного теплообмена является расчет угловых коэффициентов. Они задают долю излучения, испущенного одной поверхностью и непосредственно достигающего другой. Power SIM использует современные методы расчета угловых коэффициентов, направленные на повышение точности моделирования, а также на сокращение времени вычислений. В данном разделе обсуждаются теоретические и практические принципы расчета угловых коэффициентов, используемые в Power SIM. Особое внимание уделяется межкластерным угловым коэффициентам, моделированию теплового и солнечного излучения, а также методам, используемым для трассировки солнечных лучей.

Обзор методов расчета угловых коэффициентов

При моделировании радиационного теплообмена фактор обмена F_{ij} задает долю энергии, испускаемой кластером j , которая поглощается кластером i . Получение точного значения F_{ij} играет решающую роль для понимания характера радиационного теплообмена между поверхностями внутри расчетного объема. Для определения этих факторов обмена в Power SIM используется метод Монте-Карло с трассировкой лучей, который позволяет быстро выполнить нужные расчеты.

Кластеры и их роль

В Power SIM кластеры определяются как группы ячеек вычислительной сетки, представляющие собой одно из разбиений расчетной области; при этом излучающие поверхности разделены на подрегионы, называемые кластерами. Каждый кластер характеризуется центральной точкой j , из которой в нескольких направлениях испускаются лучи. Система регистрирует воздействие лучей на другие кластеры i .

Математические основы

Угловой коэффициент F_{ij} определяется путем трассировки лучей от каждого кластера j к кластерам i , которые могут быть выбраны в качестве целей. При этом для каждого кластера учитывается не только полученное тепловое излучение, но и полученное солнечное излучение.

Фактор обмена F_{ij}

F_{ij} — это коэффициент, который учитывает радиационный обмен между двумя кластерами i и j , и вносит вклад в энергетический баланс системы.

Падающее тепловое излучение в точке i , обозначенное как $Q_{T,i}^{in}$, рассчитывается путем суммирования вкладов от всех лучей, достигающих точки i :

$$Q_{T,i}^{in} = \sum_j F_{ij} \cdot Q_{T,j}^{out}$$

Солнечное излучение, падающее на поверхность кластера i и обозначенное как $Q_{S,i}^{in}$, аналогичным образом рассчитывается путем агрегирования вкладов от всех солнечных лучей:

$$Q_{S,i}^{in} = \sum_j F_{ij} \cdot Q_{S,j}^{out}$$

Излучение, испускаемое кластером

Излучение, испускаемое кластером i , обозначаемое Q_i^{out} , состоит из отраженной части падающего на кластер i излучения Q_i^{in} и теплового излучения, испускаемого самим кластером.

Для теплового излучения:

$$Q_{T,i}^{out} = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 \cdot A_i + (1 - \varepsilon_i) \cdot Q_{T,i}^{in}$$

Где:

- ε_i — коэффициент излучения кластера.
- σ — постоянная Стефана-Больцмана.
- T_i — температура кластера.
- A_i — площадь кластера.

Для солнечного излучения:

$$Q_{S,i}^{out} = (1 - \varepsilon_{s,i}) \cdot (Q_{S,i}^{in} + Q_{S,i}^{source})$$

Это явление относится к кластерам i , которые подвергаются воздействию солнечного излучения и рассеивают, отражают и поглощают это излучение.

Трассировка солнечного излучения Методы

В Power SIM предлагаются два метода трассировки солнечных лучей: метод обратной трассировки и метод прямой трассировки лучей. Выбор метода зависит от задачи моделирования, в частности, от учета явлений отражения и преломления на поверхностях.

Метод обратной трассировки лучей

В методе обратной трассировки лучи проецируются с излучающих поверхностей и трассируются в обратном направлении — к источникам падающего солнечного излучения.

Данный метод полезен для решения задач с несколькими источниками солнечного излучения или со сложными граничными условиями.

Тепловое излучение, поступающее в i -й кластер от солнечных источников, $Q_{S,i}^{source}$, рассчитывается как:

$$Q_{S,i}^{source} = \sum_k I_{s,k} \cdot F_{s,ki} \cdot \delta_{ki}$$

Где:

- I_{Sk} — интенсивность солнечного излучения от k -го солнечного источника.
- δ_{ki} — двоичное значение, равное 1, если кластер i виден k -му солнечному источнику, и 0 в противном случае.

Угловой коэффициент для солнечного источника k и кластера i рассчитываются по формуле:

$$F_{S,ki} = (\vec{n}_k, \vec{n}_i) \cdot A_i$$

Метод прямой трассировки солнечных лучей

В методе прямой трассировки моделируется испускание лучей от солнечных источников в расчетную область. При взаимодействии с поверхностями отслеживается изменение интенсивности лучей при их отражении и преломлении, которое зависит от угла падения. Этот метод особенно эффективен для моделирования систем с поверхностями, которые одновременно отражают и преломляют излучение.

Тепловое излучение, поступающее в i -й кластер от солнечных источников, $Q_{S,i}^{source}$, рассчитывается как:

$$Q_{S,i}^{source} = Q_S^{ray} \cdot N_i$$

Излучение, переносимое каждым лучом, Q_S^{ray} , можно оценить как:

$$Q_S^{ray} = \frac{\sum_k Q_{S,k}^{source}}{N_{rays}}$$

Где:

- N_{rays} — общее число лучей, трассируемых от источников излучения.
- N_i — число лучей, перехваченных кластером i .

Число лучей

Число лучей, трассируемых от каждого источника излучения, влияет на точность расчета угловых коэффициентов. Увеличение числа лучей повышает точность вычислений, но приводит к росту вычислительных затрат.

Учет изменений коэффициента излучения и отражения

Кластеры, находящиеся на стыке поверхностей с различными излучательными или отражательными свойствами, обрабатываются как комбинация слоев, что позволяет сохранить индивидуальные характеристики каждой поверхности. В Power SIM реализован именно такой подход, поскольку это единственный способ обеспечить корректность расчета угловых коэффициентов и избежать ошибок в распределении теплового потока.

Вычислительная эффективность

- Параллельная обработка: Благодаря использованию многоядерных процессоров можно существенно сократить время моделирования, особенно для сценариев с большим числом лучей.
- Адаптивное дробление: Применение методов адаптивного дробления сетки гарантирует, что области с интенсивным радиационным взаимодействием получат достаточное разрешение без чрезмерных вычислительных затрат.

Ограничения и рекомендации

Хотя используемые в Power SIM методы расчета угловых коэффициентов и надежны, следует помнить о принятых в них допущениях и ограничениях:

- Упрощенные уравнения: Уравнения, описывающие радиационный теплообмен между кластерами, упрощены: в них опущены члены более высокого порядка, а также не учитываются диффузные источники и излучение от внешних границ. Для достижения фундаментальной точности необходимо учитывать все дополнительные требования.
- Допущение о равномерном распределении излучения: Предполагается, что пока излучение находится в пределах телесного угла, оно распределено равномерно. Это допущение не позволяет учесть локальные зоны перегрева или пучки с сильно неравномерной расходимостью.
- Зависимость от вычислительных ресурсов: Трассировка большого числа лучей и расчет угловых коэффициентов с высоким разрешением могут быть вычислительно затратными, поэтому для масштабных моделей требуется соответствующее аппаратное обеспечение.

Анализ целостности питания

Система распределения питания (PDN) электрической системы состоит из развязывающих конденсаторов, дорожек, межслойных переходных отверстий, плоскостей питания и заземления, а также других элементов, подключенных к соответствующим шинам. Каждое переключение компонента в PDN генерирует падение напряжения и вносит шум, что сопровождается всплеском тока. Колебания напряжения, импульсы шума и тока являются следствием ненулевого импеданса PDN на высоких частотах. Основная цель — создать стабильный низкоимпедансный путь, который обеспечит компонент необходимым напряжением и током и предотвратит рост импеданса PDN сверх допустимых пределов.

Анализ целостности питания помогает инженерам проверять параметры напряжения и тока в системе распределения питания (PDN) печатной платы, чтобы убедиться, что их значения находятся в безопасных пределах. В следующем разделе приведена основная информация о моделях анализа целостности питания, реализованных в продукте Power SIM.

Основы целостности питания

Целостность питания (PI) — это фундаментальная концепция проектирования электронных систем, обеспечивающая стабильную и надежную подачу питания ко всем компонентам устройства. С быстрым развитием современной электроники сложность систем распределения питания (PDN) возрастает, что делает крайне важным понимание основных принципов PI. В данном разделе рассматриваются наиболее существенные аспекты обеспечения целостности питания: проектирование PDN, электромагнитные помехи (ЭМП), а также взаимосвязь между целостностью питания (PI) и целостностью сигнала (SI). Кроме того, в нем затрагиваются и другие фундаментальные темы, такие как рабочие характеристики силовых транзисторов, последовательность подачи питания, организация цепей заземления и влияние тепловых эффектов на целостность питания.

3.1. Проектирование системы распределения питания (PDN)

Систему распределения питания (PDN) лучше всего представить как аналог кровеносной системы человека, поскольку обе служат сетями доставки: PDN распределяет питание от стабилизаторов напряжения (VRM) к компонентам, таким как ЦП или модули памяти в электронике, подобно кровообращению в организмах. Для обеспечения стабильности сигнала, связанной с шумом и падением напряжения, необходима надежная архитектура PDN. Представлены некоторые ключевые особенности проектирования PDN.

3.1.1. Контроль импеданса

Обеспечение стабильности напряжения — одна из главных задач при контроле импеданса PDN. Задача состоит в том, чтобы сгладить кривую импеданса в рабочем диапазоне частот PDN во избежание колебаний напряжения, которые могут вызвать сбои в работе компонента.

- **Импеданс плоскостей:** Следует использовать контуры земли и питания с низким импедансом для обеспечения стабильного опорного уровня для разных уровней напряжения.
- **Импеданс дорожек:** Для снижения импеданса дорожек питания их можно проектировать с большей шириной и меньшей длиной.
- **Сглаживающие/фильтрующие конденсаторы:** Эти конденсаторы следует размещать в непосредственной близости к низкочастотному источнику питания для эффективного накопления заряда, используемого во время переходных процессов.

3.1.2. Стратегии развязки

Развязывающие конденсаторы используются для подавления нежелательного шума в PDN и для обеспечения компонентов необходимым током во время переходных процессов, что снижает нагрузку на систему питания.

- Локальная развязка: Развязывающие конденсаторы следует устанавливать у выводов питания чувствительных компонентов для фильтрации высокочастотного шума.
- Иерархическая развязка: Следует использовать многоуровневую развязку с конденсаторами разной емкости, подходящими для разных частотных диапазонов, чтобы отфильтровать различные диапазоны шума.
- Типы развязывающих конденсаторов: В иерархической развязке используется комбинация ниобиевых, керамических и электролитических конденсаторов.

3.1.3. Компоновка и распределение слоев

При решении задачи эффективного снижения индуктивности и сопротивления при проектировании PDN особое внимание уделяется компоновке печатной платы.

- Контуры земли и питания: Использование отдельных контуров земли и питания упрощает реализацию развязки, поскольку они создают пути для тока с низким импедансом и естественным образом предотвращают возникновение перекрестных помех.
- Управление межслойными переходными отверстиями: Межслойные переходные отверстия должны быть размещены на схеме таким образом, чтобы обеспечивать непрерывность цепей питания и минимизировать индуктивные контуры в системе.
- Разделение сигнальных цепей и цепей питания: Для обеспечения оптимальной производительности следует отделять дорожки питания от сигнальных линий, подверженных перекрестным помехам, и использовать электромагнитное экранирование.

3.1.4. Регулирование напряжения

Для корректной работы компоненты должны получать питание со стабильным напряжением заданного уровня. Регуляторы напряжения должны обеспечивать стабильность напряжения при изменениях входного напряжения и тока нагрузки.

- Регуляторы напряжения (VR): Выбор между линейными и импульсными регуляторами основывается на таких их характеристиках, как КПД, чувствительность к шуму и тепловые ограничения.
- Выбор топологии: Выбор между линейными и импульсными регуляторами следует осуществлять с учетом их КПД, чувствительности к шуму и тепловых ограничений.
- Размещение регуляторов: Также важно размещать регуляторы напряжения как можно ближе к потребителям питания, чтобы уменьшить падение напряжения и улучшить время отклика.

3.2. Электромагнитные помехи (ЭМП)

Управление ЭМП для электронных систем — исключительно сложная задача, поскольку эти помехи влияют на качество сигнала и могут вызывать сбои в работе чувствительных узлов. Возникновение электромагнитных помех в PDN обусловлено высокой скоростью изменения тока и напряжения, что порождает значительное количество электромагнитной энергии.

3.2.1. Источники ЭМП в PDN

- Шум переключения: На работу PDN негативно влияет шум, возникающий в результате быстрых переходов сигналов в цифровой части схемы
- Резонансные частоты: Сети PDN способны не только проводить электричество; на определенных частотах они могут резонировать, что еще больше усиливает электромагнитные помехи.
- Дребезг «земли»: Одновременные переключения в разных точках цепи заземления могут порождать различные виды шума.

3.2.2. Методы подавления ЭМП

- Экранирование: Для эффективного электромагнитного экранирования чувствительные компоненты на печатной плате следует помещать в проводящие экраны.
- Фильтрация: Применение в PDN ферритовых фильтров, индуктивностей и конденсаторов позволяет отфильтровать высокочастотный шум.
- Оптимизация компоновки печатных плат: Следует оптимизировать трассировку печатной платы таким образом, чтобы минимизировать взаимное влияние сигнальных цепей и источников шума, не допуская ухудшения производительности платы.

3.2.3. Тестирование на соответствие требованиям по ЭМС

Чтобы убедиться в том, что система функционирует в установленных рамках, следует проводить строгие испытания на ЭМС для подтверждения ее соответствия заданным стандартам, таким как FCC и CE.

- Предварительное тестирование на соответствие: Основное внимание в ходе предварительных испытаний уделяется выявлению потенциальных проблем с ЭМС на ранних этапах, до начала полномасштабных сертификационных испытаний.
- Полномасштабные сертификационные испытания: В ходе полномасштабных испытаний устройство проверяется на соответствие стандартам ЭМС в самых жестких условиях эксплуатации.

3.3. Взаимодействие с целостностью сигнала (SI)

Качество сигналов и целостность питания — это два разных, но взаимосвязанных аспекта. Колебания в системе питания электронной схемы влияют на качество сигнала. Аналогично, изменение сигнала также влияет на подаваемое питание.

3.3.1. Влияние шума источника питания на целостность сигнала

- Шум «земли»: Синфазный шум, который влияет на дифференциальные схемы передачи сигналов, возникает из-за изменений потенциала «земли».
- Шум на шинах питания: Колебания на шинах питания вызывают джиттер и битовые ошибки в сигналах цифровой связи.

3.3.2. Влияние переходных процессов в сигналах на целостность питания (PI)

- Шум одновременного переключения (SSN): Когда несколько цифровых сигналов переключаются одновременно, это неизбежно вызывает токи помех и ошибки из-за возникающих возмущений в системе распределения питания.
- Эффекты нагрузки: Резкие фронты мощных сигналов при переключении создают чрезмерную нагрузку на систему распределения питания, затрудняя поддержание стабильного уровня напряжения.

3.3.3. Стратегии совместного проектирования для PI и SI

Для уменьшения взаимозависимости между PI и SI требуются интегрированные методы проектирования.

- Совместное моделирование: Следует применять методы междисциплинарного моделирования для совместного анализа цепей питания и сигнальных цепей. Это позволит выявлять и решать проблемы, возникающие на стыке этих областей.
- Единые практики компоновки печатных плат: Следует разрабатывать такие компоновки печатных плат, которые обеспечат максимальную производительность за счет совместного учета маршрутизации цепей питания и сигналов для снижения взаимных помех.
- Комплексная развязка: Следует реализовывать такие стратегии развязки, которые одновременно удовлетворяют требованиям по подавлению шумов питания и по обеспечению целостности сигнала.

3.4. Переходный отклик

Переходный отклик — это способность PDN справляться с резкими изменениями в потреблении тока.

3.4.1. Характеристика и анализ переходных процессов

- Реакция на скачок тока: Следует проанализировать, насколько быстро разрабатываемая PDN сможет реагировать на резкие скачки и спады потребляемого тока.
- Просадки и выбросы напряжения: Следует оценить временные спады (просадки) или скачки (выбросы) напряжения во время переходных процессов, способные повлиять на работу компонентов.

3.4.2. Улучшение переходного отклика

- Сглаживающие конденсаторы: Следует увеличивать емкость сглаживающих конденсаторов для обеспечения большего запаса энергии на время переходных процессов.
- Локализация развязки: Высокочастотные развязывающие конденсаторы следует размещать как можно ближе к выводам питания для обеспечения их током во время переходных процессов.
- Использование нескольких регуляторов напряжения: Следует распределять регуляторы напряжения по плате, чтобы локализовать подачу питания и сократить пути протекания переходных токов.

3.5. Последовательность включения питания

Правильная последовательность включения питания гарантирует, что компоненты получат питание в определенном порядке. Это позволит предотвратить такие проблемы, как эффект тиристорной защелки или недопустимая инициализация.

3.5.1. Требования к последовательности

- Зависимости компонентов: Определите компоненты, которые требуют определенного порядка включения для правильной работы.
- Контролируемая скорость нарастания напряжения: Следует управлять скоростью нарастания напряжения на различных шинах питания для предотвращения одновременного переключения, способного перегрузить PDN.

3.5.2. Реализация последовательности

- Микросхемы-секвенсоры: Используйте интегральные схемы, предназначенные для управления последовательностью включения нескольких шин питания.
- Управление через микропрограмму: Реализуйте логику последовательности включения питания в микропрограмме системы для динамического управления состояниями питания.

3.6. Особенности использования контуров земли

Контур земли играет ключевую роль в обеспечении работы PI. Они обеспечивают низкоимпедансный путь возврата для токов и служат опорным уровнем для напряжения.

3.6.1. Проектирование контуров земли

- Непрерывность контуров земли: Следует убедиться, что контур земли непрерывный, без разрывов. Это необходимо для минимизации импеданса и исключения петель земли.
- Полигоны земли: Следует формировать полигоны земли вокруг высокоскоростных компонентов для их экранирования от шума и создания дополнительных дорожек для возвратного тока.

3.6.2. Техники заземления

- Одноточечное заземление: Следует подключать все цепи «земли» к единой опорной точке, чтобы предотвратить возникновение разности потенциалов.
- Заземление «звездой»: Следует организовывать соединения «земли» по топологии «звезда», чтобы минимизировать помехи между различными контурами заземления.

3.7. Влияние тепловых эффектов на целостность питания

Колебания температуры могут влиять на электрические характеристики PDN, тем самым затрагивая PI.

3.7.1. Изменения импеданса, вызванные температурой

- Резистивные компоненты: С повышением температуры сопротивление дорожек питания может расти, что может потенциально привести к большему падению напряжения.
- Емкостные и индуктивные элементы: Изменения температуры могут воздействовать на поведение конденсаторов и индукторов, влияя на профиль импеданса PDN.

3.7.2. Стратегии управления тепловым режимом

- Потребители тока и переходные отверстия: Следует применять решения по управлению тепловым режимом для эффективного отвода тепла и поддержания стабильности электрических характеристик компонентов.
- Выбор материалов: При производстве печатных плат следует использовать материалы со стабильными температурными коэффициентами, чтобы минимизировать изменения импеданса при колебаниях температуры.

3.8. Усовершенствованные топологии PDN

Современные электронные системы часто используют сложные топологии PDN для удовлетворения строгих требований к PI.

3.8.1. Сеточные PDN

- Структура: Следует использовать сеточную структуру дорожек питания и заземления для обеспечения нескольких путей протекания тока.
- Преимущества: Улучшение однородности импеданса и снижение влияния локализованных областей с высоким током.

3.8.2. Островки питания

- Концепция: Следует разделять печатную плату на отдельные островки питания, каждый из которых будет обслуживать определенный функциональный блок.
- Преимущества: Изоляция источников шума и упрощение стратегий развязки для различных секций системы.

3.8.3. Иерархические PDN

- Слои: Следует реализовывать многослойные PDN с выделенными слоями питания и заземления, соединенными межслойными переходными отверстиями.
- Масштабируемость: Упрощается масштабирование до более сложных систем за счет управления различными цепями питания на иерархических слоях.

Падение напряжение

Точное моделирование падения напряжения жизненно важно для проектирования надежных PDN для высокопроизводительных электронных систем. Точность такого моделирования напрямую влияет на надежность и производительность интегральных схем и других критически важных компонентов. В данной статье рассматривается математический аппарат для моделирования падения напряжения с использованием алгоритмов на базе библиотеки MFEM [источник 1]. Рассматриваются основные принципы, математические модели, методы оптимизации и их интеграция в процессы проектирования PDN.

Явление падения напряжения

Явление падения напряжения обусловлено наличием активных и пассивных элементов в составе PDN. Импеданс системы PDN определяет, насколько напряжение в точке нагрузки отличается от номинального, когда нагрузка потребляет мощность. Падение напряжения

ΔV можно выразить как:

$$\Delta V(\omega) = I(\omega) \cdot Z(\omega)$$

где:

- $I(\omega)$ — комплексный ток на угловой частоте ω ,
- $Z(\omega)$ — импеданс PDN на частоте ω ,
- $\Delta V(\omega)$ — результирующее падение напряжения.

Точное моделирование требует учета как резистивной R , так и индуктивной L составляющих PDN для определения $Z(\omega)$.

Эквивалентная схема PDN

Для моделирования падения напряжения PDN представляют в виде эквивалентной RLC-цепи. Простейшим представлением является модель с сосредоточенными элементами, состоящая из резисторов и индукторов, которые расположены в сети, которая отражает физическую компоновку.

$$Z(\omega) = R + j\omega L$$

где:

- R — общее сопротивление,
- L — общая индуктивность,
- j — мнимая единица.

Для более сложных PDN модель расширяется до нескольких узлов и ветвей, образуя матричное представление с использованием законов Кирхгофа.

Закон Кирхгофа для токов (KCL) и закон Кирхгофа для напряжений (KVL)

Моделирование основывается на использовании законов KCL и KVL для установления соотношений между токами и напряжениями внутри PDN.

Закон **KCL** гласит, что сумма токов, входящих в узел, равна сумме токов, выходящих из узла:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

Закон **KVL** гласит, что сумма падений напряжения в любом замкнутом контуре PDN равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n V_k = 0$$

Эти законы применяются для вывода системы уравнений, описывающих поведение PDN.

Частотный анализ

Моделирование падения напряжения часто проводится в частотной области для анализа поведения PDN в различных рабочих условиях.

- **Построение матрицы импеданса:** PDN представляется в виде матрицы $\mathbf{Z}(\omega)$, отражающей импеданс между каждой парой узлов.

- **Расчет падения напряжения:** При заданном векторе инъекции тока $\mathbf{I}(\omega)$ результирующее падение напряжения на узлах PDN составляет:

$$\mathbf{V}(\omega) = \mathbf{Z}(\omega) \cdot \mathbf{I}(\omega)$$

Моделирование во временной области и обратное преобразование Фурье

В дополнение к методам частотного анализа, возможно проведение моделирования и во временной области. Для этого применяется, в частности, обратное преобразование Фурье, позволяющее преобразовать результаты из частотной области во временную и проанализировать переходные отклики.

PDN импеданс

В данной статье рассматриваются математические основы моделирования импеданса PDN с использованием алгоритмов на базе библиотеки MFEM. Подробно описываются основные принципы, математические модели, стратегии оптимизации и их интеграция в практические процессы проектирования PDN.

Импеданс в системах распределения питания

Импеданс $Z(\omega)$ в системе распределения питания (PDN) является сложной функцией частоты и представляет собой активное сопротивление и реактивное сопротивление сети. Он играет ключевую роль в определении того, как PDN реагирует на изменяющиеся условия нагрузки, особенно во время переходных процессов. Цель состоит в том, чтобы достичь низкого и плоского профиля импеданса в широком диапазоне частот для обеспечения надежной подачи питания.

Модели на основе эквивалентных схем

PDN обычно моделируют в виде эквивалентных схем, включающих резисторы R, индукторы L и конденсаторы C, моделирующие физические свойства плоскостей питания и заземления, дорожек и развязывающих компонентов.

Модель с сосредоточенными элементами

Упрощенная модель, использующая сосредоточенные элементы, где:

$$Z(\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

где:

- R — сопротивление,
- L — индуктивность,
- C — емкость,
- j — мнимая единица,
- $\omega = 2\pi f$ — угловая частота.

Формирование матрицы импеданса — Z-матрицы

Для PDN с n узлами матрица импеданса $\mathbf{Z}(\omega)$ — это матрица $n \times n$, каждый элемент которой представляет собой импеданс между соответствующей парой узлов:

$$\mathbf{Z}(\omega) = \begin{bmatrix} Z_{11}(\omega) & Z_{12}(\omega) & \cdots & Z_{1n}(\omega) \\ Z_{21}(\omega) & Z_{22}(\omega) & \cdots & Z_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}(\omega) & Z_{n2}(\omega) & \cdots & Z_{nn}(\omega) \end{bmatrix}$$

Электромагнетизм

Для дискретизации уравнений в частных производных используется метод конечных элементов. В Power SIM реализована возможность проведения междисциплинарных сопряженных расчетов, например, совместный расчет электромагнетизма и гидрогазодинамики в связке с теплообменом (CFD), при котором каждый решатель работает на своей собственной сетке, периодически обмениваясь распределениями мощностей и температур. Электромагнитный решатель может применяться для моделирования работы различных устройств, при этом от пользователя не требуется глубокого понимания численных методов, лежащих в основе вычислительного ядра. Данный модуль позволяет решать с высокой точностью задачи по определению наведенных токов и распределений магнитных полей в частотной постановке в приближении низких частот, в квазистационарном приближении.

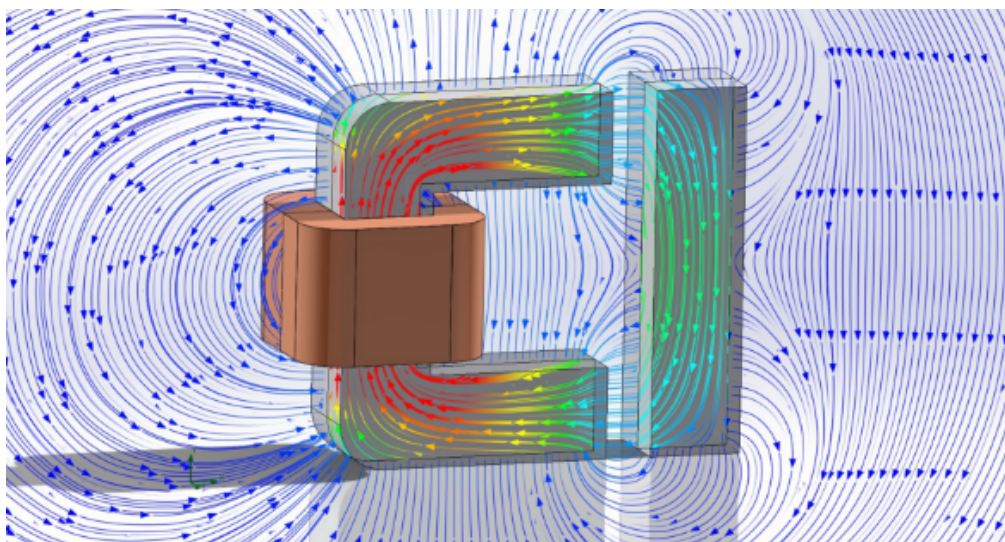
Основные понятия электромагнетизма

В этом разделе описываются основные понятия, способствующие эффективному использованию Power SIM.

Индукция магнитного поля

Для количественного описания магнитного поля используется вектор **индукции магнитного поля $\mathbf{B}$** . Классическим способом визуализации магнитного поля на плоскости является изображение линий потока магнитного поля. Направление линий совпадает с направлением вектора магнитной индукции в данной точке. Так на [Рисунке 1 \(на странице 122\)](#) изображены линии потока магнитного поля для простейшего электромагнита: намагничивающая катушка не прозрачна, магнитное поле С-образного стального сердечника слева притягивает стальную металлическую балку справа. Для большей наглядности красным цветом изображены линии, соответствующие большему значению магнитной индукции, а синим цветом изображены линии в менее интенсивных зонах.

Рисунок 1. Индукция магнитного поля.



Хотя понятие магнитного поля является достаточно абстрактным, воздействие индукции магнитного поля $\mathbf{B}$ вполне конкретное и измеримое. Сила, с которой сердечник притягивает балку, может быть выражена через $\mathbf{B}$. В упрощенном случае притягивающее давление (сила на единицу площади) выражается как $B^2/2\mu_0$, где $\mathbf{B}$ – амплитуда вектора магнитной индукции, измеряется в СИ в Теслах (Тл), а $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — фундаментальная постоянная, магнитная проницаемость вакуума, измеряется в Генри на метр (Гн/м).

Прямой физической интерпретацией вектора индукции магнитного поля $\mathbf{B}$ может служить выражение для силы Лоренца, действующей на частицу с зарядом q , движущуюся со скоростью $\mathbf{u}$:

$$\mathbf{f} = q [\mathbf{U} \times \mathbf{B}] \quad (1)$$

Если вместо отдельной заряженной частицы речь идет об электрическом токе, текущем в проводнике, то из [Уравнения 1 \(на странице 123\)](#) следует выражение для силы Ампера

$$\mathbf{f} = I \cdot [\mathbf{l} \times \mathbf{B}]$$

, где $\mathbf{l}$ – вектор, направление которого соответствует ориентации проводника, а модуль – его длине, I – величина силы тока. Если проводник движется в магнитном поле со скоростью $\mathbf{u}$, то вследствие наличия силы Лоренца возникает смещение

заряженных частиц и, как следствие, электродвижущая сила $\mathcal{E} = Blu$.

Напряженность магнитного поля

Магнитное поле возникает при протекании электрического тока в проводах и катушках, а также вследствие наличия у элементарных частиц собственного и, в составе атомов, орбитального момента импульса, что объясняет существование собственной намагниченности $\mathbf{M}$ магнитных материалов. Для того чтобы установить соответствие между силовой характеристикой поля $\mathbf{B}$ и токами, порождающими магнитное поле, необходимо ввести **напряженность магнитного поля $\mathbf{H}$** . Для вакуума связь между векторами $\mathbf{B}$ and

$\mathbf{H}$ выражается достаточно просто - $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$, а физический смысл напряженности следует из закона Ампера:

$$\oint (\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = \sum i \quad (2)$$

где $\sum i$ — сумма токов, протекающих через произвольную поверхность, натянутую на контур, по которому вычисляется циркуляция. Единица измерения напряженности в СИ - Амперы на метр (А/м). Это уравнение позволяет легко вычислить поле, порождаемое прямым проводником или витком с током, и широко используется для приближенных расчетов при проектировании электромагнитных устройств.

Магнитные материалы

При помещении внутрь катушки магнитного материала (например, стального сердечника), характеристики катушки значительно меняются. Если сердечник из магнитного материала является замкнутым, то существенно возрастает индуктивность катушки. В противном

случае (сердечник не замкнутый) катушка проявляет себя как магнит, внешнее магнитное поле которого значительно усиленно. Материал сердечника, обладая высокой магнитной проницаемостью, является очень хорошим проводником для магнитного поля катушки, тем самым усиливая ее действие.

Поведение магнитных материалов можно описывать, рассматривая выражение вида:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{M} + \mathbf{H}) \quad (3)$$

Оно связывает напряженность магнитного поля $\mathbf{H}$, определяемое [Уравнением 2 \(на странице 123\)](#), индукцию магнитного поля $\mathbf{B}$ и намагниченность $\mathbf{M}$. Если намагниченность является сугубо наведенной (то есть присутствует только при наличии

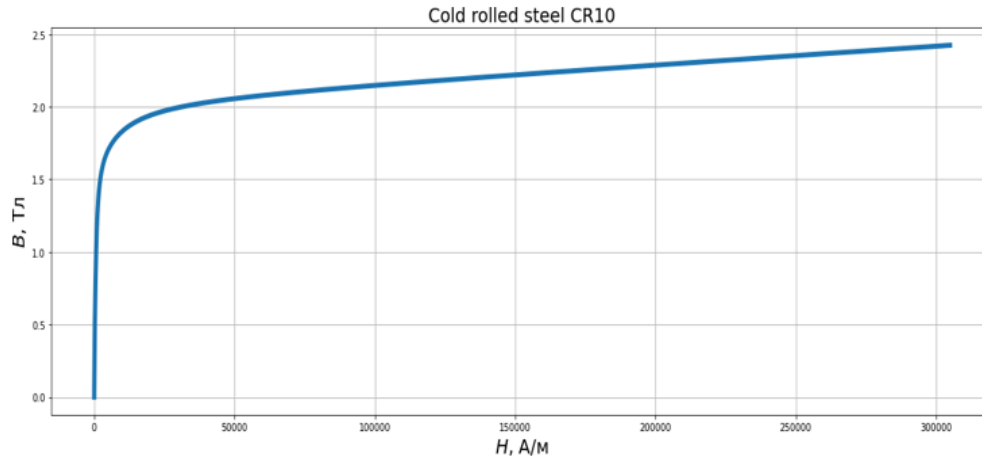
внешнего поля $\mathbf{H}$), то ее можно представить в виде $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$ где χ — магнитная восприимчивость магнетика. В этом случае получаем выражение:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\chi \mathbf{H} + \mathbf{H}) = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (4)$$

где: $\mu_r = 1 + \chi$ — безразмерная величина, относительная магнитная проницаемость, характеризующая отличие магнитных свойств материала относительно вакуума, а

$\mu = \mu_0 \mu_r$ — абсолютная магнитная проницаемость. По значению величины μ_r можно классифицировать материалы, различным образом взаимодействующие с магнитным полем. Если $\mu_r < 1$, то такой материал называют диамагнетиком, поскольку он ослабляет магнитное поле внутри себя. Если $\mu_r > 1$, то такой материал называют парамагнетиком, а если $\mu_r \gg 1$, то такой материал, многократно усиливающий магнитное поле, называется ферромагнетиком. В общем случае связь между напряженностью и индукцией магнитного поля может быть гораздо более сложной, чем зависимость описываемая [Уравнением 4 \(на странице 124\)](#). В частности, направление вектора магнитной индукции может не совпадать с направлением вектора напряженности магнитного поля или зависеть от значений напряженности магнитного поля в предыдущие моменты времени. Также зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля может иметь нелинейный характер (например, у ферромагнетиков). Тогда для описания свойств такого материала используют $\mathbf{B}$ – $\mathbf{H}$ кривую. Пример такой кривой для стали приведен на [Рисунке 2 \(на странице 124\)](#):

Рисунок 2. $\mathbf{B}$ – $\mathbf{H}$ кривая стали.



Можно заметить, что кривая проходит через начало координат. Это означает, что у материала отсутствует остаточная намагниченность. Такие ферромагнетики называют мягкими. У данной кривой есть 3 характерные зоны: крутая первая часть – область намагничивания магнетика, колено – переход к насыщению, и пологая часть, где увеличение индукции обусловлено лишь увеличением напряженности поля. Наклон последнего участка кривой равен магнитной проницаемости вакуума. Материалы, у которых проницаемость постоянна, называются линейными. В Power SIM **Инженерная база данных** содержит как линейные, так и нелинейные материалы с predetermined **B–H** кривыми. Также пользователь может сам определить новый материал и задать для него все необходимые свойства.

Математическая постановка и метод решения

Базовых понятий, описанных в предыдущем разделе, уже достаточно для использования программы Power SIM и решения практических задач. Тем не менее пользователю будет полезно ознакомиться с теоретическим материалом изложенным ниже.

Приближение низких частот

Система уравнений Максвелла в отсутствии свободных зарядов имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D} \\ \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \\ \operatorname{div} \mathbf{D} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{E}$ – напряженность электрического поля, $\mathbf{J}$ – плотность тока, а $\mathbf{D}$ – индукция электрического поля. Первые два уравнения в системе называются законом электромагнитной индукции Фарадея и законом Ампера о циркуляции в дифференциальной форме. Равенство нулю дивергенции индукции магнитного поля отражает факт отсутствия магнитных зарядов и, как следствие, замкнутости линий потока индукции магнитного поля. Последнее уравнение в [Системе уравнений 1 \(на странице 125\)](#) является следствием закона Кулона.

Электромагнитные процессы рассматриваются в рамках квазистационарного приближения (quasistatic approximation) или приближения низких частот (low frequency domain).

Обычно выделяют два критерия, позволяющие рассматривать электромагнитную задачу в квазистационарном приближении:

- Во-первых, необходимо чтобы характерный линейный размер области, в которой моделируются квазистационарные процессы, был значительно меньше длины волны электромагнитного поля. При выполнении этого условия можно пренебречь конечностью скорости электромагнитных взаимодействий и считать электромагнитное поле, возбужденное током генератора, имеющим одну и ту же фазу во всех точках рассматриваемой области. Для примера связь длины волны с частотой в вакууме приведена в [Таблице 1 \(на странице 127\)](#). Это позволяет существенно упростить анализ различных электродинамических явлений.
- Во-вторых, требуется соблюсти условие малости тока смещения, обусловленного поляризацией материала, по сравнению с током проводимости в проводящей среде.

Табл. 3. Связь длины волны электромагнитной волны в вакууме с частотой

Частота	Длина волны
3 Гц – 300 Гц	100 000 км – 1000 км
3 кГц – 300 кГц	100 км – 1 км
3 МГц – 300 МГц	100 м – 1 м

Выполнение этих условий позволяет исключить $\partial \mathbf{D} / \partial t$ из второго уравнения в Системе уравнений 1 (на странице 125) член, отвечающий за токи смещения, тем самым существенно упростив постановку, исключив из рассмотрения эффекты электромагнитного волнообразования. Подставляя второе уравнение Системе уравнений 1 (на странице 125)

в первое с учетом дифференциального закона Ома $\mathbf{E} = \mathbf{J} / \sigma$, где σ – проводимость материала, получаем следующее уравнение для напряженности магнитного поля:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \mathbf{H} + \mu \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H} = 0 \quad (2)$$

Гармоническое решение

Гармонический анализ – это решение системы уравнений Максвелла в случае если электромагнитное поле меняется во времени по гармоническому закону, на частоте заданной пользователем.

Тогда Уравнение 2 (на странице) преобразуется к виду:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \mathbf{H} + i\omega\mu\mathbf{H} = 0 \quad (1)$$

При наличии нелинейных материалов гармонический анализ уже не является полностью корректным, поскольку при наличии токов на одной частоте, из-за нелинейности уравнений, возникают колебания электромагнитного поля в целом спектре частот. Однако существуют различные методы, основанные на получении эффективных свойств нелинейного материала,

позволяющие получать корректное решение нелинейной задачи в гармоническом решателе. Один из таких методов реализован в Power SIM.

Т-Ω метод конечных элементов

В Power SIM используется Т-Ω метод [45] для расчета электромагнитных полей в квазистационарном приближении.

Название метода обусловлено выбором в качестве независимых переменных скалярного магнитного потенциала Ω , заданного во всей расчетной области, и векторного электрического потенциала $\mathbf{T}$, заданного в области занятой проводящим материалом.

Преимущество такой формулировки заключается в использовании скалярного потенциала там, где это возможно, что существенно упрощает задачу, и возможностью получить после дискретизации систему линейных алгебраических уравнений с симметричной разреженной матрицей, обладающей достаточно хорошей обусловленностью [46].

Граничные условия

Для замыкания системы уравнений необходимо указать, что происходит с полем в области вокруг изучаемого устройства.

В теории магнитное поле обращается в ноль только на бесконечном удалении от модели. В продукте Power SIM на границы расчетной области накладывается условие тангенциальности магнитного потока.



Примечание:

Это условие применяется по умолчанию, а не задается пользователем.

Оно как бы "запирает" магнитное поле внутри расчетной области, как будто вне этой области находится материал с нулевой магнитной проницаемостью.

Граничное условие по умолчанию ограничивает магнитное поле в пространстве решения. Поэтому эта граница должна быть отнесена на некоторое расстояние от источников, чтобы избежать сверхограниченности области при размещении границы близко к объектам модели. Несмотря на то, что трудно дать рекомендации с универсальной обоснованностью относительно размещения границ задач, хорошее эмпирическое правило утверждает, что если модель может быть представлена находящейся внутри сферы радиуса R , то границы могут быть размещены в 4-5 радиусах R от воображаемого центра модели.

Настройки сетки

Для расчета в Power SIM используется конечно-элементная сетка с преобладанием гексаэдров.

Построение сетки происходит в автоматическом режиме. Для задания базовой сетки требуется выбрать характерный линейный размер элемента в проводнике и уровень закругления сетки вне проводника. С каждым переходом между уровнями закругления сетки характерная длина стороны сеточного элемента по сравнению с предыдущим слоем увеличивается в два раза.

При необходимости получить большую точность на отдельных элементах геометрии пользователь может задать дополнительные уровни дробления сетки на ребрах, поверхностях и телах геометрии.

При увеличении частоты тока в проводниках плотность электрического тока из-за самоиндукции начинает вытесняться к поверхности (скин-эффект). Под толщиной скин-слоя подразумевается глубина, при удалении на которую от поверхности плотность тока уменьшается в e раз. В таком приповерхностном слое будет содержаться около 87% омических потерь проводника. Существует аналитическое решение для цилиндрического проводника в вакууме, для которого толщина Δ скин-слоя определяется из следующего выражения:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma(T) \mu(T) \omega}} \quad (1)$$

Здесь следует иметь в виду зависимость проводимости и магнитной проницаемости от температуры. Пример толщин скин-слоя в зависимости от температуры и частоты приведен в [Таблице 1 \(на странице 130\)](#):

Табл. 4. Толщина скин-слоя для различных металлов в зависимости от частоты и температуры

Материал	Температура, К	Глубина проникновения, см, при частоте, кГц					
		0.05	0.5	2.5	10	100	1000
Сталь 45	293	0.5	0.15	0.067	0.034	0.011	0.0034
Сталь 45	1073	7.0	2.2	1.0	5.0	0.16	0.05
Медь	293	1.0	0.3	0.13	0.07	0.022	0.07
Алюминий	293	1.2	0.38	0.17	0.08	0.025	-
Никель	1273	4.9	0.54	0.7	0.346	0.14	-

Хотя эта формула в случае реальных геометрий и может дать лишь оценку, ее обычно достаточно для оценки выбора необходимых размеров сеточных элементов.



Примечание:

При решении задач с наведенными токами на высоких частотах рекомендуется использовать приповерхностную сетку с таким размером элемента, чтобы в толщину скин-слоя укладывалось хотя бы две ячейки. Также в высокоградиентных зонах рекомендуется делать локальное дробление сетки.

Расчет сил и потерь

В результате решения [Уравнения 1 \(на странице 127\)](#) мы получаем амплитудно фазовую характеристику векторного поля **H** во всем пространстве. По нему мы можем определить распределение плотности тока **J** в проводниках, магнитную индукцию **B**, омические потери j^2/σ , объемную плотность магнитной энергии $(\mathbf{H}, \mathbf{B})/2$, электромагнитные силы и потери в стальных сердечниках и ферритах.

Вычисление сил

Вычисляются два типа сил – силы Лоренца и силы, действующие на магнитные материалы.

Силы Лоренца

Сила Лоренца, действующая на единицу объема, в котором протекает ток с равномерной плотностью, определяется как:

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

что является следствием [Выражения 1 \(на странице 122\)](#).

Полная сила, действующая на проводник, может быть получена из интегрирования объемной плотности силы:

$$\mathbf{F} = \int_{V_c} \mathbf{J} \times \mathbf{B} dv \quad (2)$$

Момент силы Лоренца определяется как:

$$\mathbf{T} = \int_{V_c} \mathbf{r} \times \mathbf{J} \times \mathbf{B} dv \quad (3)$$

где $\mathbf{r}$ – радиус-вектор от точки или оси, относительно которых рассчитывается момент, до элементарной единицы объема, по которому производится интегрирование. Интегрирование ведется по всему объему проводника V_c . Такие вычисления дают результат, согласующийся с экспериментом для проводящих материалов с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 1$ (например, медь).

Метод виртуальных узлов

Для определения сил, действующих на магнитные материалы, в решателе используется метод вычисления, базирующийся на понятии тензора напряжений Максвелла [2], который позволяет получить напряжение (силу на единицу площади) непосредственно через индукцию магнитного поля. Пусть $\mathbf{B}_t$ и $\mathbf{B}_n$ – тангенциальная и нормальная компоненты индукции по отношению к некоторой поверхности. Тогда выражения для соответствующих компонент тензора будут иметь вид:

$$\sigma_n = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_0}, \sigma_t = \frac{B_n B_t}{\mu_0} \quad (4)$$

Если построить вокруг тела замкнутую поверхность, проходящую целиком в воздухе, то можно получить полную силу, действующую на тело, и вращающий момент, проинтегрировав напряжение по этой поверхности. Данный метод является общим –

он может использоваться для вычисления сил, действующих на постоянные магниты, проводники с током, магнетики.

При этом данный метод вычисления сил, примененный непосредственным образом, является очень чувствительным к малейшим неточностям в численном решении и ошибкам, связанным с вычислениями чисел с плавающей запятой.

В Power SIM реализован модифицированный метод виртуальных узлов [51], позволяющий частично обойти трудности, возникающие с классическим подходом, и не требующий от пользователя дополнительных построений поверхности вокруг интересующего тела.

Данный метод позволяет получать достаточно точные значения сил и моментов. Метод требователен к наличию ячеек газа вокруг объекта, на котором определяется сила и момент. В случае отсутствия ячеек газа, например при касании объектом других тел, точность снижается. Поэтому рекомендуется всегда оставлять очень тонкий воздушный слой вокруг объектов, что можно связать с шероховатостью поверхностей в реальных устройствах.

Вычисление потерь в электротехнической стали и ферритах

Для вычисления потерь в электротехнической стали и ферритах общепринятым подходом является аппроксимация экспериментально полученных зависимостей мощности потерь от величины магнитного поля для данного материала (кривой Штейнмеца) [27].

По распределению амплитуды магнитного поля можно получить объемную плотность потерь. Используется аппроксимация следующего вида:

$$P_{ironloss} = K_h f^\alpha B^\beta + K_c (fB)^2 \quad (1)$$

где **K_h**, **α**, **β** и **K_c** – параметры аппроксимации.

В случае, если речь идет о ламинированном сердечнике трансформатора и известна толщина ламинации **d**, то коэффициент **K_c** не аппроксимирует зависимость, а вычисляется по формуле:

$$K_c = \frac{\sigma \pi^2 d^2}{6\rho} \quad (2)$$

В Power SIM доступны различные материалы с заданными кривыми и коэффициентами потерь. а также есть возможность вычислить коэффициенты потерь в стали из кривой удельных потерь, так и задать напрямую коэффициенты в модели Штейнмеца.

Граничные условия

Граничные условия — основные параметры, которые задают способ взаимодействия печатной платы с окружающей средой и способ взаимодействия внутренних слоев платы друг с другом. Они служат ограничениями или взаимодействиями на границах расчетной области, определяя поведение электромагнитных полей, токов и напряжений. В контексте моделирования печатных плат граничные условия влияют на такие критические аспекты, как целостность сигнала, распределение питания и электромагнитная совместимость (ЭМС).

Точное задание граничных условий необходимо по нескольким причинам:

1. Реалистичное моделирование: Граничные условия обеспечивают моделирование реальных сценариев, учитывая такие факторы, как заземление, подключение к источнику питания и взаимодействие со смежными компонентами или слоями.
2. Точность импеданса: Расчет импеданса — ключевой компонент в проектировании высокоскоростных печатных плат, в значительной степени зависит от граничных условий для точного моделирования передачи и отражения сигнала. Неверные заданные граничные условия могут привести к значительным расхождениям между расчетными и фактическими значениями импеданса, что потенциально может вызвать проблемы с целостностью сигнала.
3. Точность метода конечных элементов (МКЭ): Метод конечных элементов, в частности при моделировании многослойных печатных плат, разбивает сложную геометрию на более простые геометрические элементы. Задание граничных условий позволяют решателю FEM точно решать уравнения низкочастотного электромагнетизма, обеспечивая правильное взаимодействие между слоями печатной платы с учетом внешнего воздействия.
4. Оптимизация и валидация: Правильно заданные граничные условия позволяют конструкторам оптимизировать компоновку печатных плат для повышения производительности и надежности. Они также облегчают валидацию результатов моделирования на основе физических измерений, улучшая общий процесс проектирования.

В этом разделе подробно рассматривается сложная роль граничных условий при моделировании печатных плат, изучаются их типы, стратегии реализации и решающее влияние на расчет импеданса с использованием метода конечных элементов для многослойных печатных плат.

Граничные условия в задачах моделирования многослойных печатных плат

При проектировании высокоскоростных и высокочастотных электронных схем многослойные печатные платы стали незаменимыми благодаря своей способности поддерживать сложные межсоединения и снижать электромагнитные помехи (ЭМП). Метод конечных элементов (МКЭ) при проектировании многослойных печатных плат — мощный численный метод, широко используемый для расчета электромагнитных полей в сложных конструкциях. Реализация соответствующих граничных условий имеет решающее значение для точного моделирования с использованием метода конечных элементов, особенно в многослойных печатных платах, где каждый слой может иметь собственные электрические характеристики.

В этом разделе основное внимание уделяется реализации граничных условий с использованием МКЭ в многослойных печатных платах. Подробно рассмотрим варианты с различными контурами земли и питания, которые имеют решающее значение для обеспечения целостности сигнала и минимизации электромагнитных помех в конструкциях печатных плат.

Особенности задания слоев печатных плат

В многослойных печатных платах каждый слой может выполнять различные функции (маршрутизация сигналов, распределение питания, заземление или экранирование) и может состоять из различных материалов с разными электромагнитными свойствами. Понимание особенностей каждого слоя имеет важное значение при задании граничных условий в моделировании методом конечных элементов.

А. Свойства материалов и задание стеков слоев

Электромагнитные свойства материалов, используемых в каждом слое, такие как диэлектрическая проницаемость и проводимость, существенно влияют на распространение сигнала и распределение поля. Важно точно смоделировать эти свойства методом конечных элементов. Порядок стека слоев также влияет на связь между слоями.

- Диэлектрические слои. Диэлектрические слои разделяют проводящие слои и влияют на емкость между дорожками и плоскостями. Необходимо точно задать диэлектрическую проницаемость.
- Проводящие слои. Медные слои для передачи сигналов и питания должны учитывать проводимость и шероховатость поверхности, что может влиять на высокочастотные потери.

В. Граничные условия для слоев

Требуется задание условий непрерывности на границах раздела различных слоев.

- Непрерывность электрического поля. Тангенциальные составляющие электрического поля должны быть непрерывными на границах раздела при условии отсутствия поверхностных зарядов.
- Непрерывность магнитного поля. Нормальные составляющие вектора магнитной индукции должны быть непрерывными на границах раздела слоев при условии отсутствия поверхностных токов.

Реализация указанных условий в модели FEM требует внимательного и аккуратного построения сетки и задания свойств материалов на границах раздела слоев.

С. Моделирование слоев сигналов и дорожек

Слои сигналов содержат дорожки, по которым передаются электрические сигналы. Для этих слоев задаются следующие граничные условия:

- Геометрия дорожек. Для точных расчетов импеданса необходимо моделирование точной геометрии дорожек, включая ширину, толщину и расстояние между дорожками.
- Граничные условия поверхностного импеданса (SIBC). Существенную роль явление скин-эффекта играет на высоких частотах. SIBC можно использовать для упрощения моделирования проводящих дорожек с учетом глубины скин-слоя без создания сетки для внутренней части проводников.

D. Межслойные переходы

Межслойные отверстия соединяют дорожки между слоями и создают разрывы.

- Моделирование межслойных отверстий. При моделировании межслойных отверстий следует учитывать индуктивность и емкость. Граничные условия должны обеспечивать непрерывность тока и потенциала на границах сред.
- Туннельные переходы. При моделировании электромагнитного поведения переходных отверстий методом конечных элементов переходные отверстия могут быть представлены как проводящие цилиндры, а на их поверхностях необходимо задать соответствующие граничные условия.

Е. Источники возбуждения слоев

Разные слои могут иметь разные источники возбуждения.

- Источники сигнала. Применительно к слоям сигнала граничные условия должны точно представлять источники напряжения или тока.
- Возбуждения поля. В расчетах электромагнитных помех (ЭМП) внешние поля могут быть применены к определенным слоям, а поглощающие граничные условия могут использоваться для моделирования открытого пространства.

Г. Стратегии построения сетки

Точность моделирования МКЭ во многом зависит от качества сетки.

- **Адаптация сетки.** Разрешение сетки на границах, в переходных отверстиях и в местах разрывов дорожек улучшает качество сетки в высокоградиентных зонах.
- **Построение сетки для каждого слоя.** Для каждого слоя может потребоваться сетка разной плотности в зависимости от свойств материалов и геометрических деталей.

С учетом характерных для каждого слоя аспектов можно реализовать граничные условия, которые точно отражают физическое поведение многослойных печатных плат.

Контуры земли и питания

Контуры земли и питания являются неотъемлемыми составляющими многослойных печатных плат. Они выполняют функции обеспечения опорного напряжения и распределения питания по различным частям платы. Играют важную роль в обеспечении целостности сигнала и контроле электромагнитных помех. Корректное моделирование контуров земли и питания методом конечных элементов требует задания определенных граничных условий.

А. Теоретическая модель и практическая реализация слоев земли и питания

- **Идеальные слои.** В некоторых моделях контуры земли и питания являются идеальными проводниками с нулевым импедансом.
- **Реальные слои.** Реальные слои имеют конечную проводимость, шероховатость поверхности и могут иметь отверстия или вырезы, влияющие на их электромагнитные свойства.

В. Граничные условия для слоев земли

- **Граничное условие для скалярного потенциала электрического поля.** Задание потенциала электрического поля $V = 0$ для слоя земли делает этот слой характерным узлом в модели.
- **Моделирование несовершенного проводника.** Для учета конечной проводимости можно применить граничные условия поверхностного импеданса, особенно на высоких частотах.
- **Разрывы слоев земли.** Если слои земли сегментированы или имеют вырезы, граничные условия должны описывать данные разрывы, возможно вносящие паразитную индуктивность и емкость.

С. Моделирование слоя питания

- **Слои характерного напряжения.** Слои питания могут быть заданы на фиксированный потенциал напряжения, требующий граничных условий, которые обеспечивают

$$V = V_{\text{power}}$$

- **Влияние развязывающего конденсатора.** Конденсаторы, размещенные между слоями земли и питания, оказывают значительное влияние на импеданс между ними. Моделирование этих компонентов требует использования сосредоточенных элементов.

D. Резонансные эффекты и электромагнитные помехи

- **Резонансные моды.** Слои земли и питания могут поддерживать резонансные моды на высоких частотах, что приводит к электромагнитным помехам.
- **Поглощающие граничные условия.** Реализация поглощающих граничных условий на границах плоскостей позволяет моделировать потери излучения и уменьшить искусственные отражения при моделировании.
- **Граничные условия излучения.** Эти условия задают излучение за пределы расчетной области, что важно при расчете электромагнитных помех.

E. Определение возвратного пути

- **Возвратный путь сигнала.** Контуры земли обеспечивают возвратный путь тока. Разрывы в слое земли могут нарушить целостность возвратных токов, что приводит к к увеличению индуктивности и электромагнитных помех.
- **Граничные условия для возвратного пути.** Для точного моделирования возвратного пути необходимо задать условия непрерывности токов в слоях и переходных отверстиях.

F. Моделирование пары слоев

- **Пары слоев земля-питание.** Емкость между параллельными слоями, формирующими контуры земли и питания, влияет на импеданс сети распределения питания (PDN).
- **Граничные условия для пары слоев.** Моделирование схемы разводки питания требует граничных условий, учитывающих разницу в электрическом напряжении между различными слоями, а также свойства материала, который их разделяет (диэлектрика).

G. Построение сетки слоев

- **Конформная сетка.** Точное представление геометрии слоя, особенно при наличии отверстий или сложных форм, требует построения сетки в соответствии с границами слоя.
- **Плотность сетки.** Более густая сетка может потребоваться у границ и разрывов для захвата интерференции полей и изменений импеданса.

Эффективное управление контурами земли и питания при моделировании методом конечных элементов с помощью соответствующих граничных условий позволяет

прогнозировать и минимизировать потенциальные проблемы с целостностью сигнала и электромагнитными помехами в конструкциях многослойных печатных плат.

Построение сетки при моделировании печатных плат

В многослойных печатных платах со сложной геометрией и различными свойствами материалов построение сетки становится особенно сложной задачей. Традиционные методы построения сетки часто требуют создания конформных сеток, в которых сетки соседних слоев выровнены на границах раздела. Однако создание конформных сеток для многослойных печатных плат может потребовать больших вычислительных ресурсов и оказаться нецелесообразным, особенно если геометрия слоев или размерность элементов не совпадают.

В этом разделе представлен альтернативный метод построения сетки для печатных плат. В частности, рассматривается уравнение теплопроводности в многослойной печатной плате с использованием неконформных сеток. Этот метод упрощает расчеты за счет преобразования трехмерной постановки в задачи в двумерной постановке, эффективно связывая слои с помощью вычисляемых тепловых потоков. Такой метод позволяет строить независимую сетку для каждого слоя, учитывая неодинаковую размерность элементов и неконформность сетки на границе, при этом тепловые переходы между слоями описываются с необходимой точностью.

Основные трудности при построении сеток для многослойных печатных плат

Сложность многослойности

Многослойные печатные платы состоят из стека слоев, каждый из которых потенциально имеет различную геометрию, толщину и материалы. При моделировании теплопроводности в слоях необходимо учитывать:

- Границы раздела слоев печатной платы. Точное моделирование теплообмена между слоями имеет важное значение.
- Разная геометрия. Каждый слой может иметь уникальную геометрию, что усложняет выравнивание сетки.
- Свойства материала. Различные слои могут демонстрировать разную теплопроводность и емкость.

Конформные и неконформные сетки

- Конформные сетки. Сеточные области, выровненные на границах раздела слоев печатной платы, обеспечивают конформность сетки в этой зоне.
 - Преимущества: Упрощает выполнение условий непрерывности.
 - Недостатки: Создание сетки для сложной геометрии многослойной конструкции может привести к превышению вычислительных ресурсов.
- Неконформные сетки. Сетки, в которых узлы или элементы на стыках смежных слоев могут не совпадать.
 - Преимущества: Позволяет создавать независимую сетку для каждого слоя с поддержкой разной размерности элементов.
 - Недостатки: Требуются специальные методы для точного моделирования взаимодействий на границах раздела слоев.

Сложность расчетов

- Создание конформной трехмерной сетки для многослойной печатной платы может привести к появлению большого числа элементов, что увеличит вычислительные ресурсы и потребует больше памяти.
- Неконформные сетки, хотя и снижают сложность построения сетки, создают проблемы в обеспечении непрерывности и точного моделирования межслоевого теплообмена.

Предложенный метод генерации сетки.

Обзор

Предлагается метод построения сеток для многослойных печатных плат, который

- Позволяет преобразовать трехмерную постановку в двумерную. Каждый слой рассматривается как двумерная область с теплообменом между слоями.
- Использует неконформные сетки. Для каждого слоя строится независимая сетка с разной геометрией и размерностью элементов.
- Стратегически располагает неизвестные значения.
 - Внешние слои. Неизвестные значения температуры располагаются на внешних границах.
 - Средние слои. Неизвестные значения располагаются в средней части ребер элементов.

Преимущества

- Эффективность расчетов. Уменьшает размерность задачи, что приводит к меньшим системным матрицам и более быстрым расчетам.
- Гибкость при построении сетки. Позволяет строить независимую сетку для каждого слоя с использованием разных размеров элементов.
- Точное моделирование межслойного взаимодействия. Передача тепла между слоями печатной платы точно моделируется посредством расчетных потоков.

Математическая постановка

Теплопроводность в многослойных печатных платах

Рассмотрим уравнение теплопроводности для печатной платы, состоящей из m слоев.

Описывается случай, где $m = 4$.

Уравнение теплопроводности в трехмерной постановке имеет вид:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t},$$

Преобразование в 2D постановку

Каждый слой i представлен в двумерной проекции Ω_i на плоскости платы XY. Решение задачи сводится к виду:

$$\nabla_{xy} \cdot (\lambda_i \nabla_{xy} T_i) + q_i = \rho_i c_{p,i} \frac{\partial T_i}{\partial t} + f_{i-1,i} - f_{i,i+1},$$

для $i = 1, 2, 3, 4$, где ∇_{xy} обозначает градиент в плоскости XY, а $f_{i,j}$ представляет тепловой поток между слоями i и j .

Расчет плотности тепловых потоков между слоями

Плотность теплового потока $f_{ij}(x, y)$ между смежными слоями i и j в точке (x, y) определяется как:

$$f_{ij}(x, y) = \frac{\alpha_i \alpha_j}{\alpha_i + \alpha_j} (T_i(x, y) - T_j(x, y)),$$

где:

- $\alpha_i(x, y) = \lambda_i(x, y) d_i$,
- d_i — расстояние от центра слоя i до границы со слоем j (половина толщины слоя для промежуточных слоев; полная толщина для первого и последнего слоев),
- $T_i(x, y), T_j(x, y)$ — температурные характеристики слоя i и j .

Слабая форма уравнения

При использовании метода конечных элементов получаем слабую форму уравнений путем умножения основных уравнений на тестовые (весовые) функции и интегрирования по области.

Интегрирование по элементам

В терминах потока требуется интегрирование по перекрывающимся областям элементов соседних слоев. Интеграл теплового потока принимает вид:

$$\int_{S_{\text{intersection}}} \frac{\alpha_i \alpha_j}{\alpha_i + \alpha_j} (T c_i^k - T c_j^l) \phi_\gamma dS = \phi_\gamma(r_c) S_{\text{intersection}} \frac{\alpha_i \alpha_j}{\alpha_i + \alpha_j} (T c_i^k - T c_j^l),$$

где:

- $S_{\text{intersection}}$ — площадь пересечения элементов слоев i и j ,
- ϕ_γ — базисная функция, связанная с узлом γ ,
- r_c — центральная точка области пересечения,
- Tc_i^k, Tc_j^l — температуры в точке r_c — слои i и j соответственно.

Заключение

Предложенный метод построения сетки для моделирования многослойных печатных плат эффективно решает проблемы, связанные с построением неконформной сетки. Разбиение задачи теплопроводности в трехмерной постановке на связанные двумерные задачи упрощает генерацию сетки и вычислительные процессы без потери точности.

Основные преимущества этого метода: эффективность вычислительных ресурсов, гибкость стратегий построения сеток и возможность управления сложной несовпадающей геометрий на границе раздела слоев печатной платы. Благодаря тщательному расчету тепловых потоков между слоями и использованию настраиваемых свойств материалов, предложенный метод точно фиксирует основные тепловые взаимодействия внутри печатной платы.

Этот метод может быть распространен на другие типы численного моделирования с использованием неконформных сеток, предоставляя ценный инструмент для инженеров в области моделирования электронных устройств и теплового анализа.

Глава 3. Учебное пособие

Эта глава представляет собой пошаговое руководство по основным принципам работы с программой Power SIM.

Введение в учебное пособие

В этом разделе приводится учебный пример, который демонстрирует возможности Power SIM для решения низкочастотных электромагнитных задач.

Планарный трансформатор

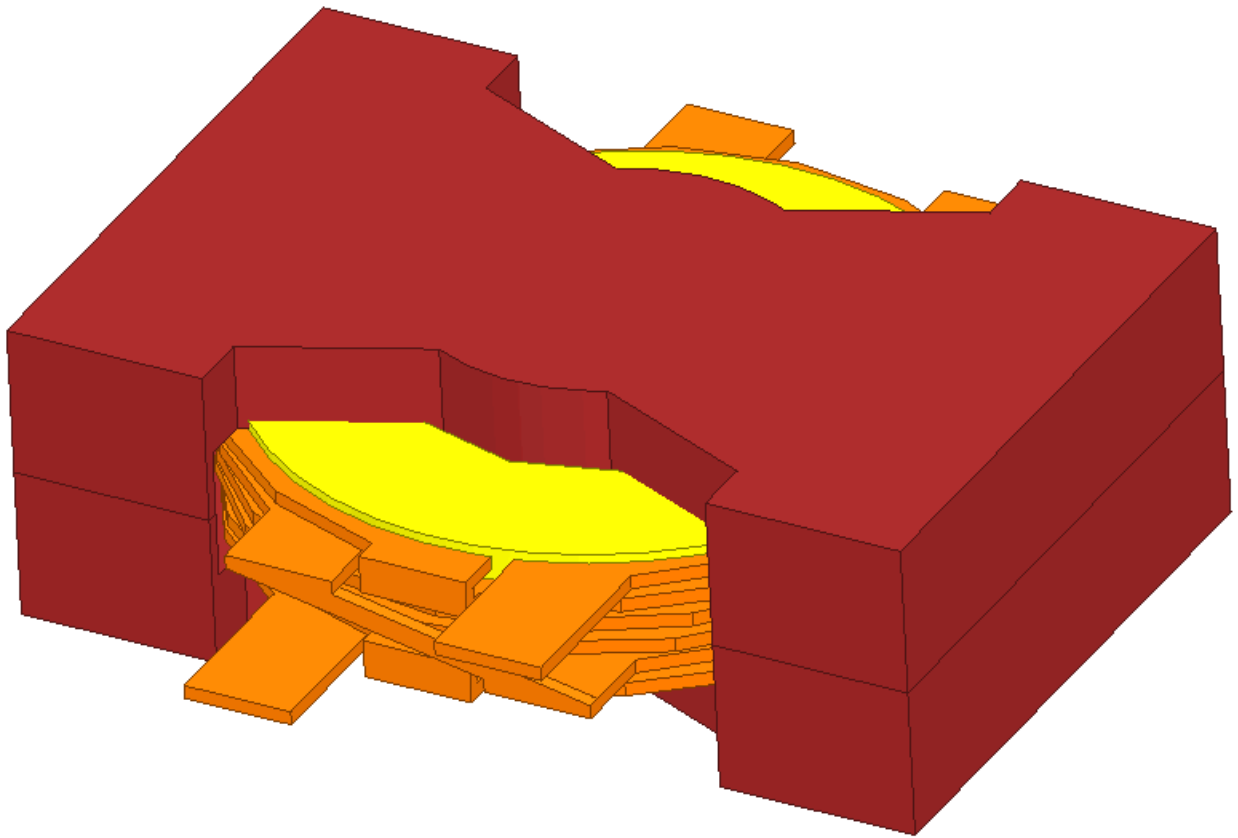
Планарные трансформаторы обычно состоят из ферритовых магнитопроводов и массивных обмоток, иногда в качестве обмоток используются полигоны печатных плат, а слои обмоток проложены специальными изоляторами.

При разработке таких изделий имеют место затруднения с определением теплового состояния устройств. Это связано со сложностями правильного определения потерь в обмотках и сердечнике с учетом трехмерного магнитного поля, частотно- и температурно-зависимых свойств материалов.

Из-за высоких частот работы планарных трансформаторов, правильный учет скин эффектов и эффектов близости в массивных полигонах обмоток, наряду с температурно-зависимой магнитной проницаемостью феррита, точные расчеты температуры играют важную роль в правильном процессе электромагнитного проектирования. Наиболее удобным решателем для такого класса задач является гармонический магнитный решатель, который может работать в связке с тепловым решателем, так как правильно определенная температура очень важна для получения целевых результатов.

Этот пример демонстрирует возможности Power SIM сопряженного магнитного и теплового анализа планарного трансформатора, реализованные в Power SIM.

Модель планарного трансформатора представлена на рисунке.



Трансформатор имеет следующие характеристики:

- Количество витков первичной обмотки – 4
- Количество витков вторичной обмотки – 2
- Коэффициент трансформации – 2
- Частота преобразования – 100 кГц
- Напряжение первичной обмотки – 10 В
- Нагрузка вторичной обмотки – 0.4 Ом

Компоненты трансформатора изготовлены из следующих материалов:

- Магнитопровод – Ferroxcube PQ 20*16 16мм с ферритом 3F3
- Изоляция – Полиамид
- Обмотки – Медь

Температура окружающей среды 20 °С.

Цели моделирования:

- распределение магнитной индукции и магнитной проницаемости в магнитопроводе трансформатора при установившейся температуре;
- установившаяся температура элементов модели трансформатора при естественной конвекции;
- распределение плотности тока по полигонам первичной и вторичной обмоток;
- токи в первичной и вторичной обмотках;
- собственные АС сопротивления обмоток;
- потери мощности в обмотках и феррите;
- входная мощность и мощность на нагрузке.

Открытие модели

Откройте модель следующим способом:

1. Чтобы создать новый проект, в ленточной панели выберите **Файл > Файл > Новый**. В открывшемся окне выберите путь к проекту и сохраните его в формате *.smtdoc. Отобразится рабочее пространство вашего проекта.
2. Чтобы вставить файл геометрии, в ленточной панели используйте меню **Файл > Файл > Добавить компоненты** и в открывшемся окне выберите файл геометрии.

Задание граничных условий

When the geometry is loaded, you can specify boundary conditions for your project.

1. Этот пример демонстрирует использование возможностей программного продукта для решения низкочастотных электромагнитных задач. Перейдите в правую верхнюю часть окна программы и выберите в списке функциональностей **Магнитный анализ**. По умолчанию выбрано **Целостность питания и тепловой анализ**.
2. В ленточной панели выберите вкладку **Электромагнетизм**.
3. Для удобства необходимо настроить систему единиц измерения. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Общие > Система единиц измерения**.
4. В открывшемся диалоговом окне **Система единиц измерения** перейдите на вкладку **Геометрия** и для параметра **Длина** выберите **мм**.
5. Нажмите кнопку **ОК**.
6. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Общие > Материалы**, чтобы указать материалы геометрии.

7. В открывшемся диалоговом окне в разделе **Выбор геометрии** из списка **Геометрия** выберите **Изоляция**.
8. В группе **Материал** выберите **Материалы > Электромагнитные материалы > Изоляционные материалы \ Полиимид (ПИ)**.
9. Нажмите кнопку **ОК**.
10. Аналогичным образом укажите **User Defined / 3F3** для геометрии **Core-1** и **Core-2**.
11. Теперь необходимо задать электромагнитную **расчетную область**. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Общие > Расчетная область**.
12. Задайте следующие параметры для ЭМ **расчетной области**.
 - Тип: Прямоугольный.
 - Размер.
 - X = - 30 mm ... 30 mm
 - Y = - 10 mm ... 10 mm
 - Z = - 25 mm ... 25 mm
 - Граничные условия Одинаковые на всех границах
 - Границы Тангенциально
13. Нажмите кнопку **ОК**.
14. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Источники электрической энергии > Напряжение**.
15. Задайте следующие параметры для **Напряжения**:
 - Выбор геометрии Поверхности
 - Выберите **Face-1** для тела **Primary**
 - Напряжение RMS = 10 Вт
 - Сопротивление = 0.4 Ом
 - Цели: Включить все.
16. Нажмите кнопку **ОК**.
17. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Источники электрической энергии > Выходная клемма переменного тока**.
18. В разделе Выбор геометрии выберите **Face-2** для тела **Primary**.
19. Нажмите кнопку **ОК**.
20. Для решения этой проблемы необходимо задать **Глобальную** и **Локальную** сетку.
21. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Сетка > Глобальная сетка**.
22. В диалоговом окне **Глобальная сетка** задайте следующие параметры:
 - Характерный размер в твердом теле = 0.85 мм
 - Уровень закругления в текучей среде = 3
23. Нажмите кнопку **ОК**.
24. В ленточной панели выберите **Электромагнетизм > Сетка > Локальная сетка**.

25. В диалоговом окне **Локальная сетка** задайте следующие параметры:
- В разделе **Выбор геометрии** выберите **Первичное** и **Вторичное** тела из списка **геометрии**.
 - В разделе **Дробление ячеек** задайте для параметра **Уровень** значение 3.
26. Нажмите кнопку **ОК**.
27. Аналогичным образом задайте 2й Уровень дробления ячеек для геометрии **Core-1** и **Core-2**.
28. Теперь, когда все граничные условия заданы, перейдите на вкладку **Выполнить расчет** и запустите расчет. Оставьте все настройки расчета по умолчанию.