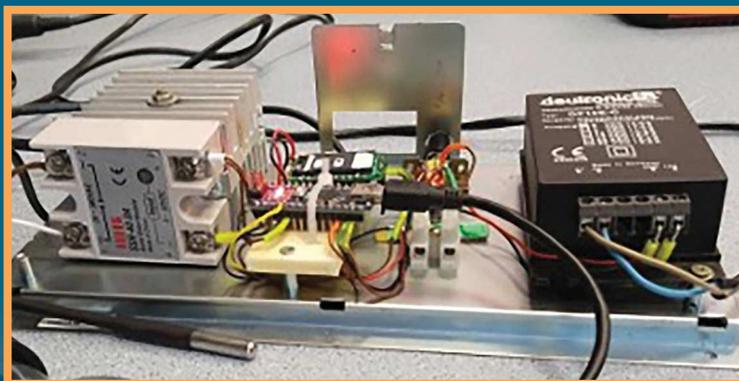


ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Материалы Всероссийской научно-технической конференции
(30—31 мая 2024 г., Петрозаводск)*



Содержание

- © Шарлаев А. С., Березина О. Я., Ларионов Д. Н., Праслов Н. А.
Катодные материалы литий-ионных аккумуляторов на основе оксидов ванадия 5
- © Тихомиров А. А., Изотов А. А., Величко А. А.
Применение нейронной сети Lognet для определения повреждений
в электрических сетях с изолированной нейтралью..... 10
- © Гасан И. С., Семенов А. В.
Детектирование объектов и ключевых точек объектов, движущихся на конвейере,
с помощью умной камеры Oak-d-рое 13
- © Мощевикин А. П., Соловьев А. В.
Макет ЧПУ-станка для обучения основам числового программного управления 16
- © Ершова Н. Ю.
Основы вычислительных систем для энергетиков..... 20
- © Венгеровская М. С., Борисов Н. И., Ершова Н. Ю.
Разработка автоматизированной мини-теплицы 24
- © Назаров А. И., Мошкина Е. В.
Использование онлайн-курса по физике для подготовки инженерных кадров..... 27
- © Акпаев Н. А., Валиуллин К. Р.
Анализ способов построения цифровых подстанций, их достоинств и недостатков..... 32
- © Манохин А. И.
Методика расчета величины коэффициента конвективной теплоотдачи с помощью
программы автоматизированного моделирования тепловых процессов РЭА 37
- © Манохин А. И., Полесский С. Н.
Аэродинамическое исследование камер тепла и холода..... 43
- © Щирый А. О.
Использование опыта разработки отечественной САПР РЛС при создании
многоагентной среды моделирования радиотехнических систем 50
- © Башарин А. В., Башарина Е. А.
Разработка блока дистанционного (с помощью SMS) и местного управления
нагрузкой (отопителем) с использованием Arduino Nano 54
- © Учаев В. С., Зирюкин В. И., Климов К. С., Митрохин П. М., Расторгуев М. И.
Диагностика систем возбуждения синхронных генераторов в замкнутом контуре
с использованием HARDWARE-IN-THE-LOOP систем..... 61

Методика расчета величины коэффициента конвективной теплоотдачи с помощью программы автоматизированного моделирования тепловых процессов РЭА

Аннотация. Предлагается простая методика расчета коэффициента конвективной теплоотдачи с помощью программы автоматизированного анализа теплового режима РЭА типа АСОНИКА-ТРИАНА для тестовой платы. Полученный коэффициент потом используется в расчете теплового режима тестовой платы в программе SOLIDWORKS Simulation. По результатам сравнения делаются выводы и даются рекомендации по использованию данной методики.

Ключевые слова: камера тепла и холода, САД-система, САЕ-система, SOLIDWORKS Flow Simulation, аэродинамика, тепловой режим.

Введение

Коэффициент конвективной теплоотдачи является важной величиной, необходимой для расчета теплового режима радиоэлектронной аппаратуры. Но его расчет непростая задача, и во многих САЕ-программах его расчет отдается на откуп разработчикам аппаратуры. Предлагается простая методика его расчета с помощью программ автоматизированного анализа теплового режима типа «Асоника». Полученный коэффициент конвективной теплоотдачи затем можно использовать, например, в SOLIDWORKS Simulation и других САЕ-программах, где он задается пользователем в явном виде.

Программный комплекс моделирования теплового режима РЭА «Асоника»

Программный комплекс (подсистема) «Асоника-Т» использует для моделирования теплового режима метод электротепловой аналогии (ЭТА), в котором электрические параметры — источник напряжения, источник тока или сопротивления, соответственно моделируют источник температуры, источник мощности (тепловыделения) и тепловое сопротивление. В соответствии с протекающим тепловым процессом строится модель теплового процесса (МТП), которая потом автоматически преобразовывается в электрическую схему, которая рассчитывается методами анализа электрических цепей, и выдается результат в виде решения тепловой задачи. МТП представляет собой схему в виде графа, где узлы — это сущности-элементы конструкции, воздушные объемы и среды, а ветви — тепловые сопротивления, описывающие теплопередачи, теплоотдачи и прочие процессы между узлами МТП.

Подсистема позволяет рассчитывать как стационарный, так и нестационарный режим. В первом случае решение сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений, во втором — к системе дифференциальных уравнений. Причем вся эта математика зашита в программу и скрыта от пользователя, что позволяет решать задачи широкому кругу пользователей после несложной подготовки.

В силу исторических и территориальных причин, эти принципы используются в целом классе программ, выросших из одного корня: «Асоника-Т» — «Асоника-П» — «Триана 2.0» (рис. 1) и имеющих похожий интерфейс. Следовательно, рассмотрим все на примере использования программы «Триана 2.0» или просто «ТРИАНА».



Рис. 1. Программы анализа теплового режима по построенной МТП с использованием электротепловой аналогии

Немного теории по коэффициенту конвективной теплоотдачи

Коэффициент конвективной теплоотдачи α численно характеризует тепловую мощность, которую рассеивает путем конвекции в окружающую среду (или воспринимает от нее) единица поверхности твердого тела при разности температур между ними в 1 градус. Он представляет собой сложную функцию большого числа параметров и для вычисления его используют теорию подобия и критериальные уравнения. Например, критерий Нуссельта, который в явном виде содержит коэффициент α :

$$Nu = \frac{\alpha \times L}{\lambda}, \quad (1)$$

где Nu — критерий Нуссельта, α — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·град.), L — определяющий (характерный) размер, м, λ — коэффициент теплопроводности жидкости (воздуха) при средней температуре, Вт/(м·град.).

Коэффициенты конвективной теплоотдачи α можно разделить на два класса — для естественной (ЕК) и вынужденной (ВК) конвекции.

В общем виде для естественной и вынужденной конвекции

$$Nu = f(Re, Gr, Pr), \quad (2)$$

где Re — критерий Рейнольдса, Gr — критерий Грасгофа, Pr — критерий Прандтля.

Для естественной конвекции формулу (2) можно упростить — формула М. А. Михеева:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (3)$$

где C и n — эмпирические коэффициенты, а индекс m указывает, что значения физических параметров λ , α , ν , β газа или жидкости следует выбирать для средней температуры t_m . При этом необходимо помнить, что все эти теплофизические параметры, входящие в критерии, зависят от температуры, т. е. решение в принципе будет нелинейное.

При вынужденной конвекции, например, для ламинарного движения:

$$Nu = 0,57 \times \sqrt{Re}. \quad (4)$$

Из критерия Nu (1) легко получить α — коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu \times \lambda}{L}. \quad (5)$$

В терминах электротепловой аналогии теплоотдачу с нагретой поверхности в окружающую среду можно рассматривать как некоторое тепловое сопротивление R тепловой энергии с поверхности в среду:

$$R = \frac{1}{\alpha \times S}, \quad (6)$$

где R — тепловое сопротивление, К/Вт; S — площадь теплоотдающей поверхности, m^2 .

Решая формулу (6) относительно α , получаем основную формулу ее вычисления:

$$\alpha = \frac{1}{R \times S}. \quad (7)$$

Так как площадь S определяется геометрическими размерами и для конкретного объекта расчета легко вычисляется, то для вычисления α необходимо получить тепловое сопротивление R ветви МТП, моделирующей конвекцию между поверхностью и средой.

Электрическое сопротивление рассчитывается как падение напряжения ΔU , деленное на ток I через резистор:

$$R = \frac{\Delta U}{I} \quad (8)$$

В терминах электротепловой аналогии (ЭТА) тепловое сопротивление рассчитывается как падение температуры, деленное на мощность, через ветвь, моделирующую конвекцию.

$$R = \frac{\Delta T}{P}. \quad (9)$$

Вывод: для вычисления коэффициента конвективной теплоотдачи α необходимо вычислить тепловое сопротивление конвективной ветви МТП (9) и по формуле (7) вычислить коэффициент α .

Моделирование теплового режима тестового печатного узла в Асоника (Триана)

Теперь перейдем к построению МТП для расчета теплового режима и коэффициента конвективной теплоотдачи α в программе ТРИАНА. Очевидно, чем проще будет МТП, тем легче вычисления, например, не должно быть параллельных ветвей МТП. Таким образом, хотя в теплоотдаче с поверхности в окружающую среду участвует конвекция и излучение, будем учитывать только конвекцию. Можно назвать такие МТП каноническими из-за их целесообразной простоты. Общие принципы построения МТП приведены в [2].

Дано: Вертикально расположенный печатный узел (рис. 2, 1) размером $100 \times 100 \times 2$ мм, с мощностью тепловыделения 2 Вт. Окружающая среда — $20^\circ C$, естественная конвекция. Печатный узел в данном примере — пластина, по которой равномерно распределена — «размазана» мощность тепловыделения.

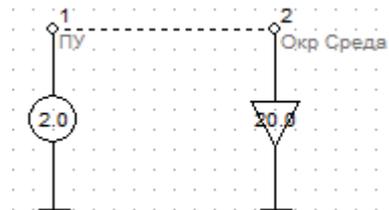
Найти: Коэффициент конвективной теплоотдачи для естественной конвекции α .

Решение. Допущения для узлов МТП: узел 1 — печатная плата (ПУ), узел 2 — окружающая среда (ОС).

В узел 1 (ПУ) включен источник тепловыделения 2 Вт; в узел 2 включен источник постоянной температуры $20^\circ C$, моделирующий окружающую среду.



1. Печатный узел $100 \times 100 \times 2$ мм



2. МТП печатного узла

Рис. 2. Печатный узел 1 и его МТП 2

Описание МТП. Ветвь 1—2 — моделирует естественную конвекцию (теплоотдача) между печатным узлом и окружающей средой. Как уже отмечалось ранее, в методических целях здесь не будем учитывать излучение.

Полученная МТП печатного узла представлена на рисунке 2, 2. Интерфейс ввода параметров МТП ветви естественной конвекции на рисунке 3.

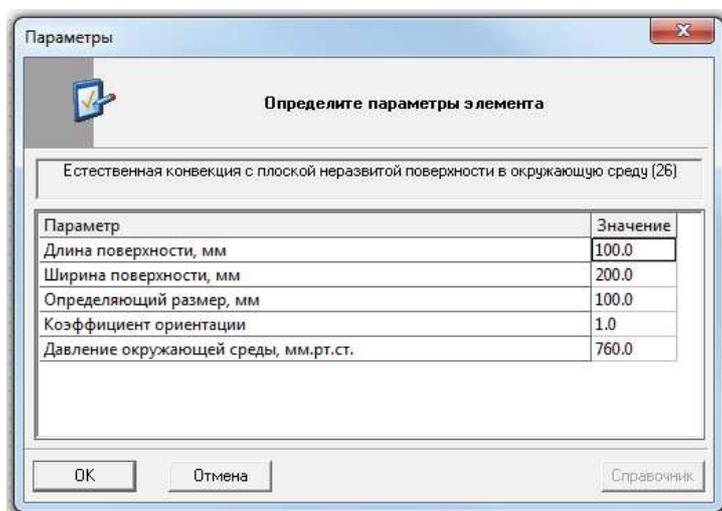


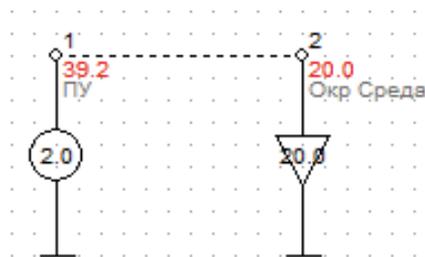
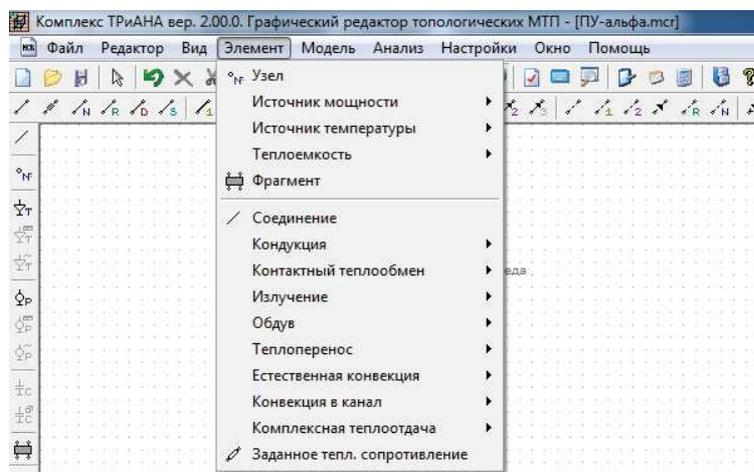
Рис. 3. Окно ввода параметров ветви 1—2 естественной конвекции (ЕК) вертикального печатного узла

Первые две строчки — это размеры, произведение которых дает площадь печатного узла — 100×200 мм или $20\,000$ мм² (0.02 м²). Одна сторона ПУ 100×100 , обратная сторона тоже 100×100 , т. е. в сумме будет 100×200 мм. Площадь торцов пластины из-за их мизерности не учитываем.

Определяющий размер [1] для вертикальной пластины равен ее размеру по вертикали, т. е. 100 мм. Коэффициент ориентации [1] для вертикальной пластины равен 1.0. Давление окружающей среды равно нормальному — 760 мм рт. ст. Цифра 26 (тип ветви) в заголовке окна естественной конвекции, внутренний номер, по которому из библиотеки элементарных видов теплообмена программы вызываются соответствующие формуле (3) уравнения, невидимые пользователю.

Продолжение ввода исходных данных для моделирования и его результаты в виде графа МТП и расчетной температур узлов ее модели представлены на рисунке 4.

Расчетная температура ПУ (узел 2) составляет 39.2 °С. Узел 1 — окружающая среда равна 20.0 °С по определению.



1. Меню ввода видов теплообмена для ветвей МТП

2. Результаты моделирования

Рис. 4. Интерфейс программы ТРИАНА и результаты моделирования теплового режима

Рассчитаем тепловое сопротивление R конвективной ветви 1—2 по формуле (9):

$$R = \frac{\Delta T}{P} = \frac{(39.2 - 20)}{2} = \frac{19.2}{2} = 9.6 \text{ К/Вт.} \quad (10)$$

И наконец, рассчитаем коэффициент конвективной теплоотдачи для естественной конвекции α по формуле (7):

$$\alpha = \frac{1}{R \times S} = \frac{1}{9.6 \times 0.02} = 5.2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{град.).} \quad (11)$$

Моделирование теплового режима тестового печатного узла в SOLIDWORKS Simulation

Теперь повторим моделирование теплового режима данного печатного узла в программе SOLIDWORKS Simulation в тех параметрах, как и в программе ТРИАНА. Но немного разнится язык описания моделирования теплового режима. «Тепловая мощность» — по 1 Вт на каждой из двух сторон ПУ, т. е. в сумме 2 Вт. Конвекция задается как коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha = 5.2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{град.)}$, при массовой температуре окружающей среды — $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Полученные результаты моделирования представлены на рисунке 5. При этом следует обратить внимание, что в «Термических нагрузках» (рис. 5, 2) написано «Тепловой поток» при том, что по размерности видно, что задавалась тепловая мощность — 1 Вт, т. к. размерность теплового потока — Вт/м^2 . Это известный много лет сбой программы SOLIDWORKS Simulation.

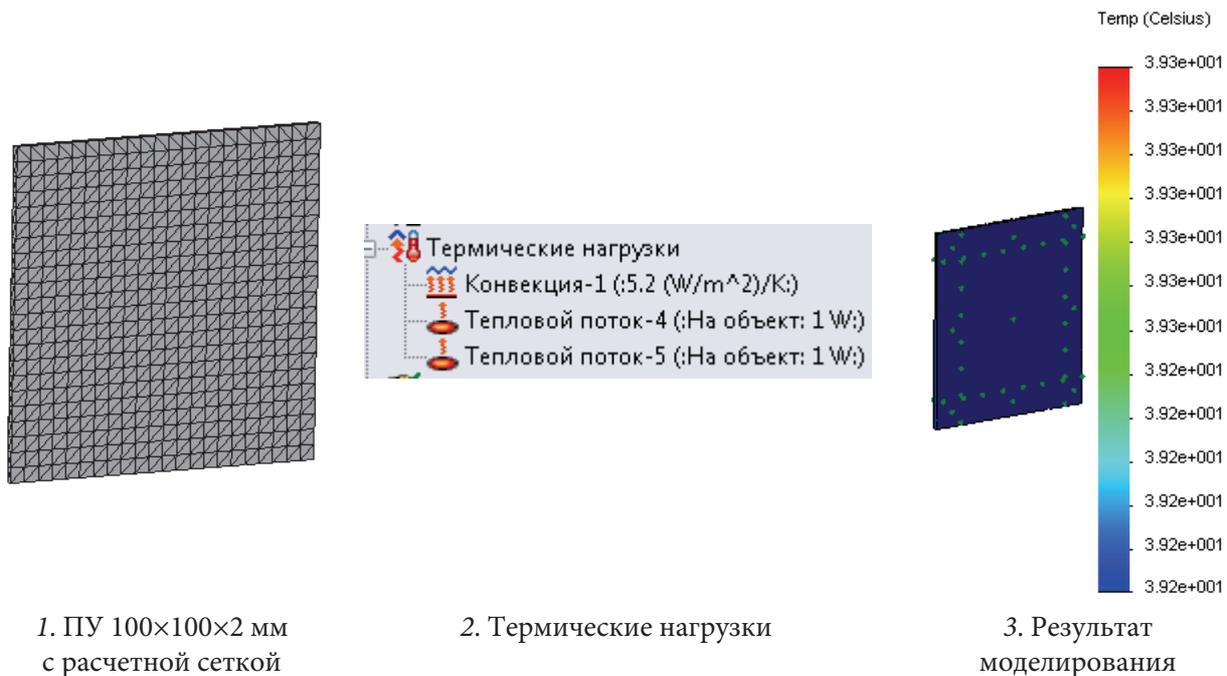


Рис. 5. Исходные данные и результаты моделирование теплового режима печатного узла в программе SOLIDWORKS Simulation

Как видим, полученная расчетная температура ПУ в SW Simulation = $39.2 \text{ }^\circ\text{C}$, такая же, как и в программе ТРИАНА, что и требовалось ожидать. При этом в ТРИАНА размерность модели МТП всего 2 узла, а в SOLIDWORKS Simulation расчетная сетка содержит более 6 тысяч конечных элементов. То есть полученные расчетные температуры печатного узла одинаковы в обеих программах при несравнимых затратах вычислительных ресурсов.

Выводы

Можно отметить, что в программе SOLIDWORKS Simulation при моделировании теплового режима коэффициент конвективной теплоотдачи α задается пользователем самостоятельно.

В программе ТРИАНА пользователь задает для МТП геометрические и теплофизические параметры, и по ним она сама вычисляет по критериальным уравнениям значения коэффициента α для моделирования конвекции. Здесь показано как можно «вытащить» этот коэффициент α из программы ТРИАНА в явном виде.

Дополнительные возможности для ТРИАНА: если проводить серии расчетов в ТРИАНА, то можно строить графики зависимости теплового режима, коэффициента α , например, от определяющего размера, не вникая в сложные критериальные уравнения. А если заменить ветвь естественной конвекции (ЕК) на вынужденную конвекцию (ВК), то можно построить такие зависимости и для разных скоростей обдува.

Дополнительные возможности для SOLIDWORKS Simulation от АСОНИКА-ТРИАНА: полученный коэффициент α можно использовать в расчетах в программе SOLIDWORKS Simulation. Главное, чтобы геометрия и теплофизика объекта расчета в ТРИАНА и SW совпали, т. к. значения коэффициента α зависят как от определяющего размера, так и от коэффициента ориентации [1] и даже от температуры, см. формулу (3). В SW Simulation эти тонкости в явном виде не описываются, но через коэффициент α , полученный из ТРИАНА мы их автоматически учтем и в SW.

Список литературы

1. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры» / Г. Н. Дульнев. — Москва : Высшая школа, 1984. — 247 с.

2. Кофанов Ю. Н. Моделирование тепловых процессов при проектировании, испытаниях и контроле качества радиоэлектронных средств / Ю. Н. Кофанов, А. И. Манохин, С. У. Увайсов. — Москва : МГИЭМ, 1998.