

**NUMERICAL MODELING OF THERMAL PROCESSES OF ELECTRONIC MODULES ON THE BASIS OF MODELS CREATED IN ALTIUM DESIGNER AND SOLIDWORKS****Alexeev V.***PhD, Associate Professor of Information Systems Design Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk***Konstantinov A.***Graduate student Department of Information Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ НА БАЗЕ МОДЕЛЕЙ, СОЗДАНЫХ В ALTIUM DESIGNER И SOLIDWORKS****Алексеев В.Ф.***Кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г.Минск***Константинов А.А.***Аспирант кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г.Минск***Abstrac**

A method for modeling thermal processes occurring in the construction of electronic modules based on the models created in CAD by Altium Designer and SolidWorks has been developed. Engineering analysis was carried out in the module SolidWorks Simulation. The rationale for using the finite element method as a method for solving mathematical models describing thermal processes occurring in the construction of electronic systems is presented. A step-by-step algorithm for the engineering analysis of thermal processes that can be used for any CAE systems based on the finite element method is considered.

**Аннотация**

Разработана методика моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных модулей на основе моделей, созданных в САПР *Altium Designer* и *SolidWorks*. Инженерный анализ проводился в модуле *SolidWorks Simulation*. Представлено обоснование использования метода конечных элементов, в качестве метода решения математических моделей, описывающих тепловые процессы, протекающие в конструкциях электронных систем. Рассмотрен пошаговый алгоритм проведения инженерного анализа тепловых процессов, который может быть использован для любых CAE систем, основанных на методе конечных элементов.

**Keywords:** radio-electronic means, electrical circuit design, computer-aided design systems, electronic module, printed circuit board, finite-element method, component seat, contact pad, modeling of thermal processes, mathematical model, thermal analysis.

**Ключевые слова:** радиоэлектронные средства, проектирование электрической схемы, системы автоматизированного проектирования, электронный модуль, печатная плата, метод конечных элементов, посадочное место компонента, контактная площадка, моделирование тепловых процессов, математическая модель, термический анализ.

**Постановка проблемы.** Одной из важнейших задач при создании конструкций радиоэлектронных средств (РЭС) является анализ и обеспечение тепловых режимов. Появление мощных систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяет все шире использовать методы оценки и расчета тепловых режимов на основе численного моделирования. Основной задачей в этом случае является получение достоверной информации о поведении проектируемого или реального объекта исследования при воздействии на него дестабилизирующих факторов. Основная роль отводится дискретным моделям, ориентированным на использование численных методов, например, метода конечных элементов [1–16].

Численное (математическое) моделирование

позволяет проводить исследование на ранних этапах, когда объект проектирования представлен технической документацией [17]. В этом случае появляется возможность проведения проектных исследований без использования макетов, опытных образцов, и получить информацию для прогнозирования поведения объекта в процессе эксплуатации.

В связи с постоянным повышением требований к качеству и надежности радиоэлектронных изделий, непрерывным увеличением степени интеграции, уменьшением размеров элементов, вопросы отвода тепла, моделирования и оптимизации тепловых процессов при разработке этих изделий приобретают особую актуальность.

В настоящее время, общая тенденция миниатюризации микроэлектронных изделий решается не только за счет минимизации одного размера, но

и более полного использования объема. Здесь можно выделить два направления: системы на кристалле и модульные конструкции (системы в корпусе).

Системы на кристалле являются предметом исследований и разработок последнего десятилетия. Они должны решить задачу дальнейшего повышения степени интеграции не только отдельной микросхемы (микропроцессор, память, преобразователь и т. д.), но и функционального блока, включая, так называемые, блоки с интеллектуальными свойствами.

Все эти тенденции требуют применения средств математического моделирования на всех этапах проектирования микроэлектронных изделий.

По мере усложнения микроэлектронных изделий и появления новых изделий, вопросы отвода тепла, разработки математических моделей и методов расчета их тепловых режимов приобретают особую актуальность. В настоящее время подсистемы САПР микроэлектронных изделий, связанные с моделированием тепловых процессов, становятся неотъемлемой частью этих САПР.

В современных исследованиях, представленных в научно-технической литературе, большое внимание уделяется методу конечных элементов, как способу решения математических моделей тепловых процессов, прорабатываются вопросы повышения точности результатов и оптимизации машинного времени решения поставленных задач. В настоящее время существует достаточно большое количество работ, рассматривающих вопросы тепловых режимов электронных систем, моделирование этих процессов в различных САЕ (*Computer-aided engineering*) системах, а также содержащих результаты исследований методов и средств защиты электронных систем от негативных тепловых процессов (Алямовский А.А., Репнев Д.Н., Мельников А.А., Сулейманов С.П., Бесшейнов А.В., Басов К.С.). Заслуживают внимания работы Aziz A.K., Cook R.D. и BarthilR.L. и других зарубежных авторов.

В исследованиях, представленных в научно-технической литературе, приведены результаты, подтверждающие негативное воздействие тепловых процессов на изделия электроники. Однако вопросам моделирования этих процессов не уделяется должного внимания. В этой связи исследования по данной тематике, направленные на разработку методики моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях электронных систем являются актуальными.

**Тенденции развития современной микроэлектроники и проблемы обеспечения тепловых режимов электронных систем.** Основной тенденцией развития микроэлектроники является повышение степени интеграции микросхем [18, 19]. Существует ряд конструкторско-технологических проблем, которые приходится решать при проектировании и производстве микроэлектронных изделий.

Одной из важнейших проблем, вызываемой

микроминиатюризацией ИС, является проблема теплоотвода. Повышение степени интеграции обычно связано с уменьшением как размеров самих элементов, так и расстояний между ними, что ведет к увеличению удельной мощности рассеивания. При нормальных условиях эксплуатации допустимая мощность рассеивания современных микросхем не превышает  $0,05 \text{ Вт/мм}^2$ , что ограничивает плотность размещения элементов на подложке.

Следует отметить, что тенденции развития микроэлектроники во многом изменили и концепцию проектирования радиоэлектронных средств [20, 21]. Одним из факторов, повлиявших на концепцию проектирования РЭС, стало развитие приборов программируемой логики, яркими представителями которых являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) [22, 23], применяемые для построения разнообразных интерфейсных узлов, устройств управления и контроля и т.д. Современные образцы ПЛИС, выполненные по 0,22-микронной технологии, способны работать на частотах до 300 МГц и реализуют до 3 млн. эквивалентных логических вентилях. Это позволило разработчикам сконцентрировать в едином модуле такое количество «логики», которое раньше можно было разместить лишь на нескольких функциональных ячейках, заполненных интегральными схемами. Таким образом, радиоэлектронные системы с регулярной структурой и небольшими рассеиваемыми мощностями на элементах были вытеснены более компактными и быстродействующими системами с локализованными источниками тепла.

Этот переход заставил инженеров пересмотреть методы построения тепловых моделей РЭС и расчета показателей теплового режима.

Рассмотрим три наиболее широко применяемых ранее метода теплового моделирования РЭС.

Метод однородного анизотропного тела [24, 25] состоит в представлении реальной конструкции или её части однородным анизотропным телом в виде прямоугольного параллелепипеда или иной простой геометрической фигуры, для которого находят эквивалентные коэффициенты теплопроводности по направлениям осей координат  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ . При известных коэффициентах теплопроводности и геометрических размерах тела  $l_x, l_y, l_z$  можно определить тепловое сопротивление между центром тела и его поверхностью.

Метод изотермических поверхностей [23, 24] предполагает выделение в конструкции поверхностей с одинаковыми или условно одинаковыми температурами в каждой точке поверхности. Считается, что теплообмен осуществляется между этими поверхностями. В зависимости от конкретной задачи исследования к изотермическим поверхностям конструкций относят поверхность корпуса со среднеповерхностной температурой  $t_k$ , поверхность нагретой зоны с температурой  $t_3$ , поверхность отдельной функциональной ячейки с температурой  $t_{3i}$ , поверхность отдельного элемента с температурой  $t_{3i}$  и т.д.

Анализируя особенности методов можно прийти к выводу, что они актуальны лишь для тех конструкций, которые или их части можно представить однородным анизотропным телом, либо изотермической поверхностью, иными словами пригодны для анализа теплового режима конструкций с регулярной структурой. Применение этих методов для анализа теплового режима конструкций с нерегулярной структурой делает их чрезвычайно трудоемкими и повышает погрешность получаемых результатов.

По этой причине, развитие элементной базы заставило искать новые методы, пригодные для анализа теплового режима конструкций с локализованными источниками тепла. Пригодными для этих целей оказались методы, основанные на решениях системы дифференциальных уравнений.

Метод конечных разностей [25, 26] предполагает дискретизацию независимой переменной  $x$ , т.е. строится множество или сетка  $1 + 1$  дискретных равноотстоящих точек  $x_i (i = 0, 1, 2, \dots, L)$  на отрезке  $0 \leq x \leq L_x$  с  $x_0 = 0, x_1 = L_x, x_{i+1} - x_i = \Delta x$ .

Следующий шаг состоит в замене в дифференциальном уравнении членов, содержащих дифференцирование, членами, в которых используются только алгебраические операции. Этот процесс включает в себя аппроксимацию и выполняется путем использования конечно-разностных аппроксимаций для производных функции. Метод конечных разностей с одинаковым успехом может быть применен для решения линейных и нелинейных краевых задач и для решения задач теплопроводности. Однако, продемонстрированный методом возможности дискретизации, для решения обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений с частными производными, при увеличении размерности задачи становятся крайне затруднительными.

Оптимизация алгоритмов аппроксимации и нахождения численного решения привела к альтернативному подходу в разбиении области (модели) на ряд неперекрывающихся областей или элементов с последующим построением аппроксимации кусочным образом. Используемые в процессе аппроксимации базисные функции также определяются кусочным образом с применением различных уравнений для различных подобластей. Данный метод получил название метода конечных элементов (МКЭ).

**Построение тепловых моделей методом конечных элементов.** В настоящее время область применения метода конечных элементов очень обширна и охватывает все физические задачи, которые могут быть описаны дифференциальными уравнениями. Наиболее важными преимуществами метода конечных элементов, благодаря которым он широко используется, являются следующие:

- свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми (это позволяет применять метод к телам, составленным из разных материалов);
- криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов

или описана точно с помощью криволинейных элементов (таким образом, метод может быть использован для областей с различными геометрическими формами границ);

- размеры элементов могут быть переменными (это позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы, если в этом есть необходимость);

- с помощью метода конечных элементов не представляет труда рассмотрение граничных условий с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанных граничных условий.

Указанные выше преимущества метода конечных элементов могут быть использованы при составлении достаточно общей программы для решения частных задач определенного класса. Например, с помощью программы для осесимметрической задачи о распространении тепла можно решать любую частную задачу этого типа.

Анализируя вышеперечисленные свойства метода конечных элементов можно сделать вывод, что он имеет более широкий круг решаемых задач, более высокую точность и универсальность по сравнению с рассмотренными выше методами однородного анизотропного тела и метода изотермических поверхностей. Несмотря на это, присутствует ряд факторов, сужающих круг задач, решаемых при помощи МКЭ.

Главный недостаток метода конечных элементов заключается в необходимости составления вычислительных сложных программ и применения вычислительной техники. Вычисления, которые требуются проводить при использовании метода конечных элементов, слишком громоздки для ручного счета даже в случае решения очень простых задач. Для решения сложных задач необходимо использовать быстродействующую электронно-вычислительную машину (ЭВМ), обладающую не только большим объемом оперативной памяти, но также и ядром процессора, предназначенным для решения задач с потоковым типом данных. В случае отсутствия подобной ЭВМ, решение сложных инженерных задач при помощи САПР, использующей метод конечных элементов, становится трудоемким процессом.

Нельзя сказать, что вышеперечисленные недостатки являются в основной части недостатками непосредственно МКЭ, напротив, сам метод потенциально пригоден для решения обширного круга задач разных направлений. Ограничивают круг задач, решаемых МКЭ, обобщенные алгоритмы расчётных модулей САПР, предназначенные для решения универсальных задач и не имеющие оптимизации для решения задач определённого типа, чем весьма затрудняют получение точных результатов в течение небольшого количества времени. Иными словами, временные затраты при решении задач теплового режима при помощи САПР весьма существенны, что, порой, затрудняет отработку того или иного варианта конструкции на ранних стадиях проектирования устройства.

Поскольку целью исследований является разработка методики моделирования тепловых процессов, протекающих в конструкциях ЭС с применением САПР, использующих в расчетах тепловых режимов алгоритмы, основанные на применении метода конечных элементов, при сохранении заданной точности решения, следует более подробно остановиться на тех свойствах метода конечных элементов, которые окажутся полезными в достижении поставленной цели:

- повышение точности расчета с увеличением числа конечных элементов. Данное свойство тесно перекликается с вопросами сходимости метода МКЭ и точностью аппроксимации имеющейся модели сеткой конечных элементов;

- возможность регулирования сетки конечных элементов по различным параметрам. К таким параметрам можно отнести размеры конечного элемента, его геометрическую форму, вид аппроксимации внутри конечного элемента, шаг дискретизации сетки.

Указанные выше свойства предоставляют возможность управлять точностью метода на различных участках модели, с целью снижения общего количества конечных элементов модели, а значит и снижению затрат машинного времени посредством повышения точности расчета в наиболее интересных участках модели. Под моделью следует понимать геометрическую трехмерную имитацию объекта, созданную при помощи САПР. Для оценки временных затрат при расчете тепловых режимов ЭС в САПР, рассмотрим основные факторы, определяющие размерность задачи расчета тепловых режимов ЭС в САПР.

**Создание трехмерной модели исследуемой электронной системы.** Рассмотрим методику создания трехмерной модели печатной платы на простейшем примере – автомобильном усилителе мощности звуковой частоты (УМЗЧ). Принципиальная схема УМЗЧ представлена на рис. 1.

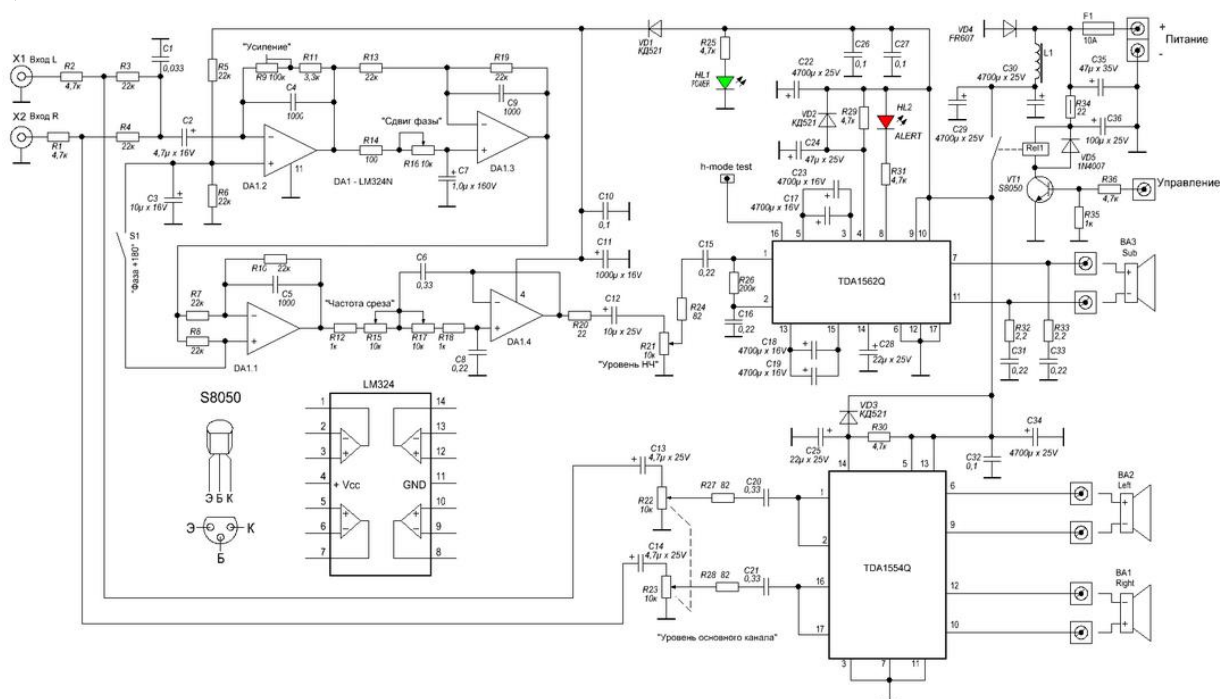


Рис. 1. Принципиальная схема автомобильного УМЗЧ

Проектирование печатной платы (ПП) буду осуществлять с помощью *Altium Designer*. Плату для анализа затем можно конвертировать в *SolidWorks*.

Создание печатной платы в *Altium Designer* можно разбить на несколько этапов. Сначала создается библиотека электрорадиоэлементов, которая содержит условно-графическое обозначение (УГО). Следующим этапом идет создание библиотеки посадочных мест, к которым подключаются заранее созданные трехмерные модели ЭРЭ. Эти библиотеки объединяют в общую интегрированную библиотеку. На основе библиотеки УГО элементов создается схема электрическая принципиальная, на основе которой получаем модель платы.

Рассмотрим методику создания модели печатной платы в *Altium Designer*. Компоненты являются

основными блоками электронных изделий. При разработке проекта каждый компонент нуждается в различных представлениях: условное графическое обозначение на схеме, посадочное место на плате (*Footprint*), описание в формате *Space* для моделирования, описание *IBIS*-модели для анализа целостности сигналов и трёхмерное описание для объёмного представления готовой платы. Наличие полной совокупности этих представлений для каждого компонента не обязательно: достаточно представить компонент своим логическим символом.

Для создания проекта печатной платы достаточно иметь УГО и посадочное место на плате. Для объёмной визуализации необходимо иметь 3D модель элементов.

**Создание УГО компонентов.** Чтобы создать УГО компонента на панели управления выбираем

*File > New > Library > Schematic Library*. После создания файла настроим рабочее пространство на

вкладке *Library Editor Workspace* (рис. 2), выбрав *Tools > Document Options*.

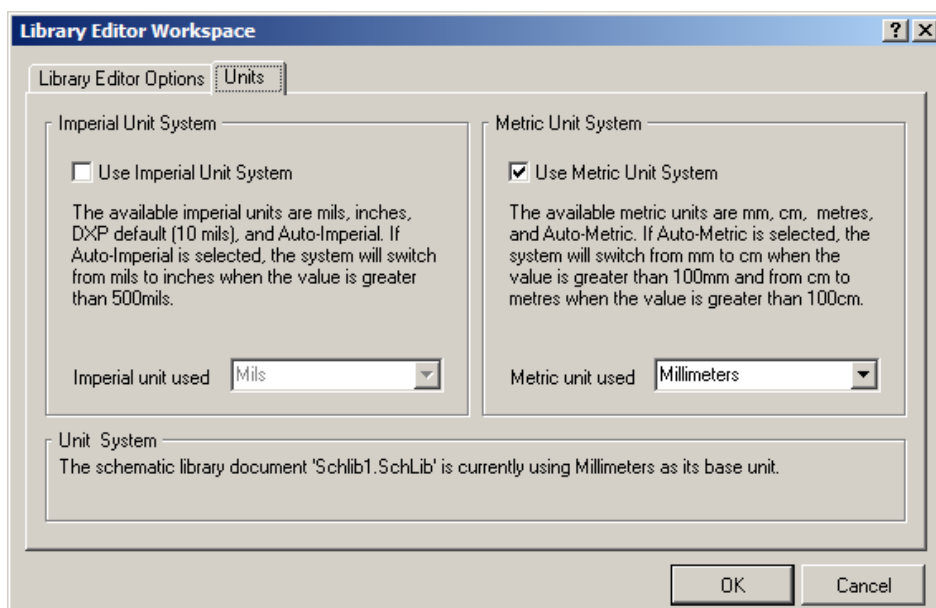


Рис. 2. Графическое поле УГО

Устанавливаем метрическую систему с основными единицами длины – миллиметр.

После того, как настроили рабочее пространство с помощью инструментов (меню *Place*) рисования создадим условный графический символ элемента в соответствии с ГОСТ.

Для создания электрического вывода в УГО используем команду *Place > Pin*, после запуска команды, устанавливаем его свойства, нажав *Tab*. В свойствах следует указать название и позиционное обозначение вывода. Рекомендуется указать длину вывода, электрический тип вывода и специальные символы (атрибуты), однако все параметры можно установить после его размещения (рис. 3).

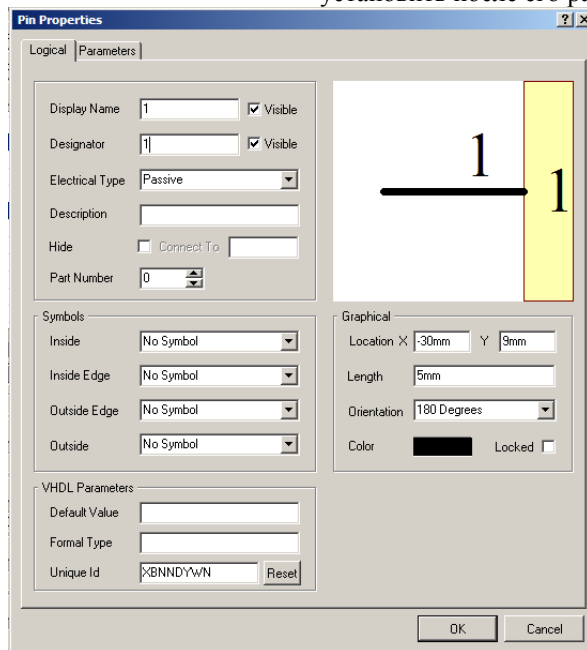


Рис. 3. Настройки вывода УГО

Определим свойства компонента в окне *Library Component Properties*, при помощи команды *Tools > Component Properties* (рис. 4).

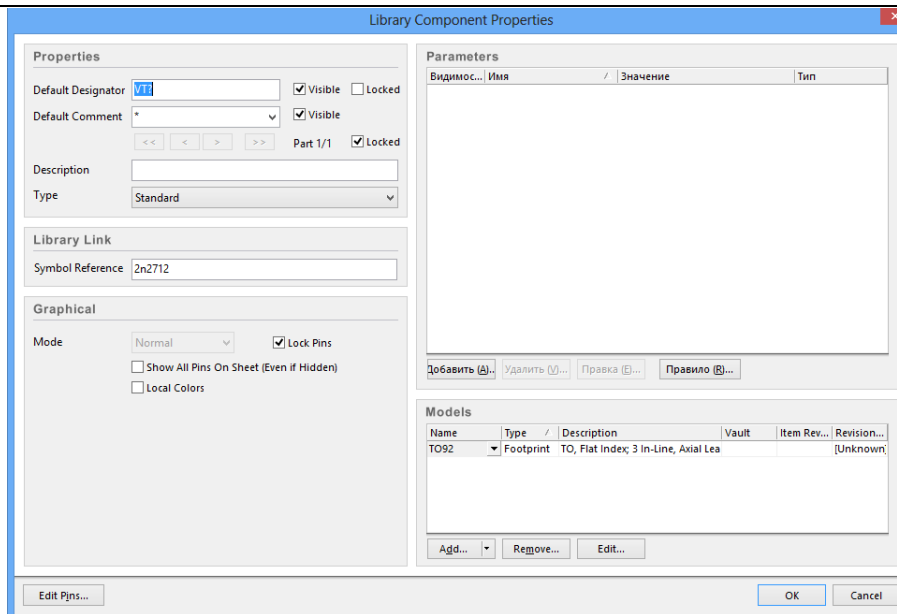


Рис. 4. Окно свойств компонента

Контур элемента рисуется функцией *Place>Line*.

По выше изложенному принципу создали УГО, пример созданного условно-графического обозначения транзистора представлен на рис. 5.

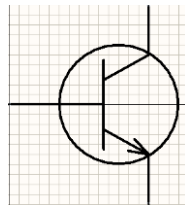


Рис. 5. УГО транзистора

**Создание посадочных мест компонентов.** Посадочное место является обязательным только при проектировании топологии печатной платы и не играет роли при проектировании электрической принципиальной схемы. Для хранения информации о посадочных местах компонентов используется файл с расширением \*.*pcplib*, который создается командой *File > New > Library > PCB Library* или

альтернативной командой *Project > Add New to Project > PCB Library*. После создания файла необходимо настроить рабочее пространство с помощью команды *Tools > Library Options*.

Для установки контактных площадок выполним команду *Place/Pad* и нажмём клавишу *TAB* для изменения параметров контактной площадки (рис. 6).

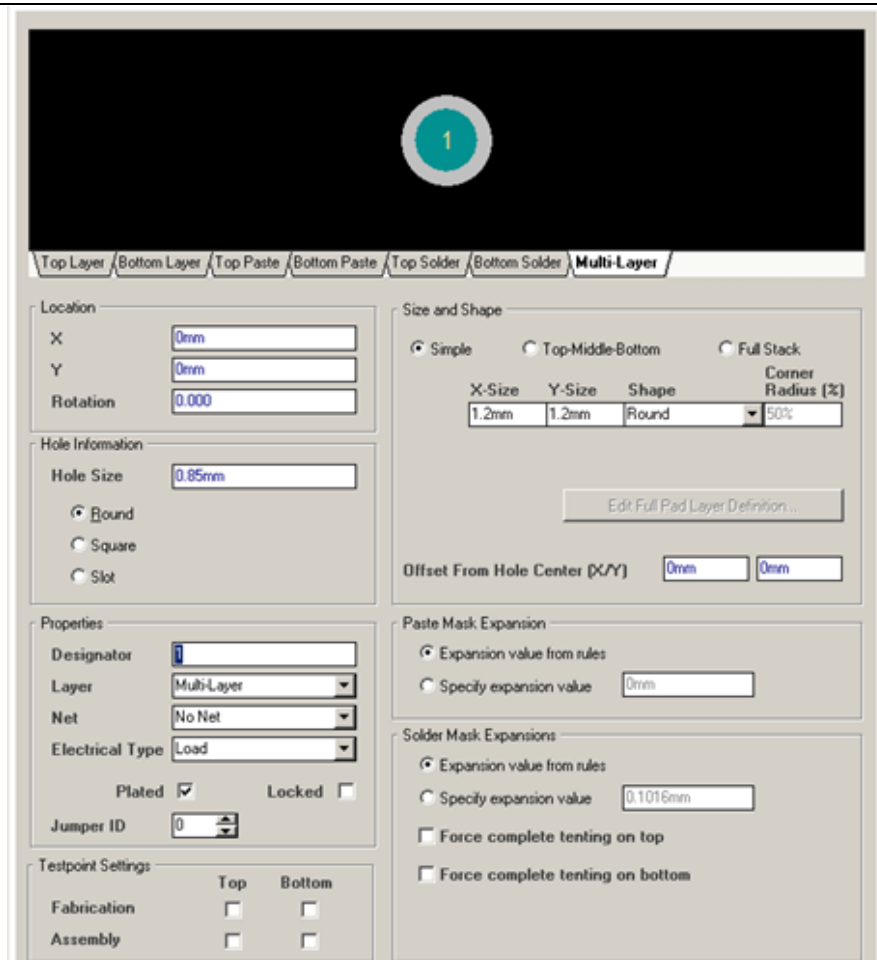


Рис. 6. Параметры контактной площадки

Далее требуется нарисовать изображение корпуса компонента. Для создания очертания компонента перейдём на слой *Top Overlay* (для выбора слоя требуется нажать кнопку с названием слоя

внизу экрана). Далее с помощью команды *Place > Line* нарисуем контур. Пример посадочного места транзистора с контуром корпуса представлена на рис. 7.

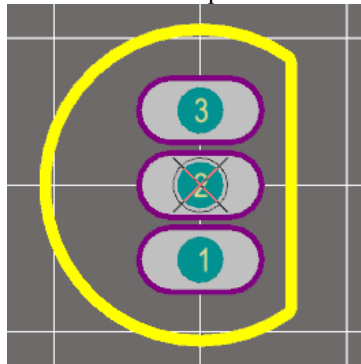


Рис. 7. Посадочное место корпуса транзистора TO-92

Для создания 3D модели платы, необходимо к полученным посадочным местам присоединить 3D-модели. Все модели создаются в среде создания трёхмерных моделей *SolidWorks*. Для того чтобы привязать созданную к компоненту 3D модель в *Altium Designer*, следует поступить следующим образом:

- выбрать библиотеку посадочных мест;
- выбрать один из элементов;
- нажать *Place – 3D Body*, появится диалоговое окно, в котором ставим галочку, как показано на рис. 8

Тип 3D-модели

Вытянутый контур       Цилиндр

Файл модели       Сфера

Convert To STEP

---

Свойства

Модель:

Сторона:

Слой:       Фикс

Модели компонентов могут быть созданы только в механических слоях.  
Проекция модели будет продублирована на механический слой, в зависимости от установок.

---

Отображение

Цвет 3D:       Прозрачность:

---

Обобщенная модель

Файл

Rotation X°:       Обновить с диска

Rotation Y°:       Удалить

Rotation Z°:       Изменить

Зазор по высоте:

Отсутствует ссылка в библиотеке PCB Library

Рис. 8. Диалоговое окно присвоения корпусу 3D модели

– выбираем *Embed STEP Model*, появляется обзор;

– выбираем уже созданную модель в виде формата *STEP*.

Следуя такой последовательности, получаем 3D модели для созданных посадочных мест. Пример 3D-модель транзистора представлена на рис. 9.

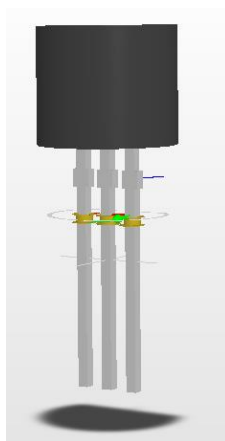


Рис. 9. 3D модель транзистора

Также создавать 3D компоненты можно непосредственно в самом *Altium Designer*. Для этого нужно воспользоваться командой *Размещение > Корпус компонента*. В появившемся окне необходимо выбрать тип 3D модели (вытянутый контур, цилиндр или сфера), указать геометрические пара-

метры компонента, его цвет, точки привязки, зазоры между компонентом и контактной площадкой.

Чтобы завершить создание библиотеки необходимо соединить УГО компонентов и соответствующие посадочные места. Для этого необходимо перейти в библиотеку УГО, выбрать изображение компонента, которому ходим добавить



посадочное место, и нажать кнопку *Add Footprint*. В появившемся окне выбираем библиотеку, в которой находятся созданные посадочные места, среди которых выбираем необходимый компонент. Аналогичные действия производим для всех остальных компонентов. На этом создание библиотечных компонентов завершено.

**Проектирование электрической схемы.** На основе созданной библиотеки необходимо спроектировать схему электрическую принципиальную (см. рис. 1).

Принципиальную электрическую схему выполняют по ГОСТ 2.701 и ГОСТ 2.702. Условные графические изображения элементов в электрических схемах должны соответствовать ГОСТ 2.721 – 2.742, размеры условных обозначений – ГОСТ

ЕСКД 2.747, 2.730 и буквенные обозначения – ГОСТ 2.710.

Для формирования электрической схемы выберем *File > New > Schematic*. Далее производим глобальные настройки *Schematic*. Для этого выберем в меню *DXP > Preferences > Schematic*.

После завершения настроек подключим созданные ранее библиотеки. Затем располагаем УГО компонентов на листе в соответствии с рис. 1. С помощью команды *Place > Wire* соединяем элементы проводниками.

Размещаем на схеме компоненты земли и питания, после того как все компоненты соединены. В результате получаем схему электрическую принципиальную, представленную на рис. 10.

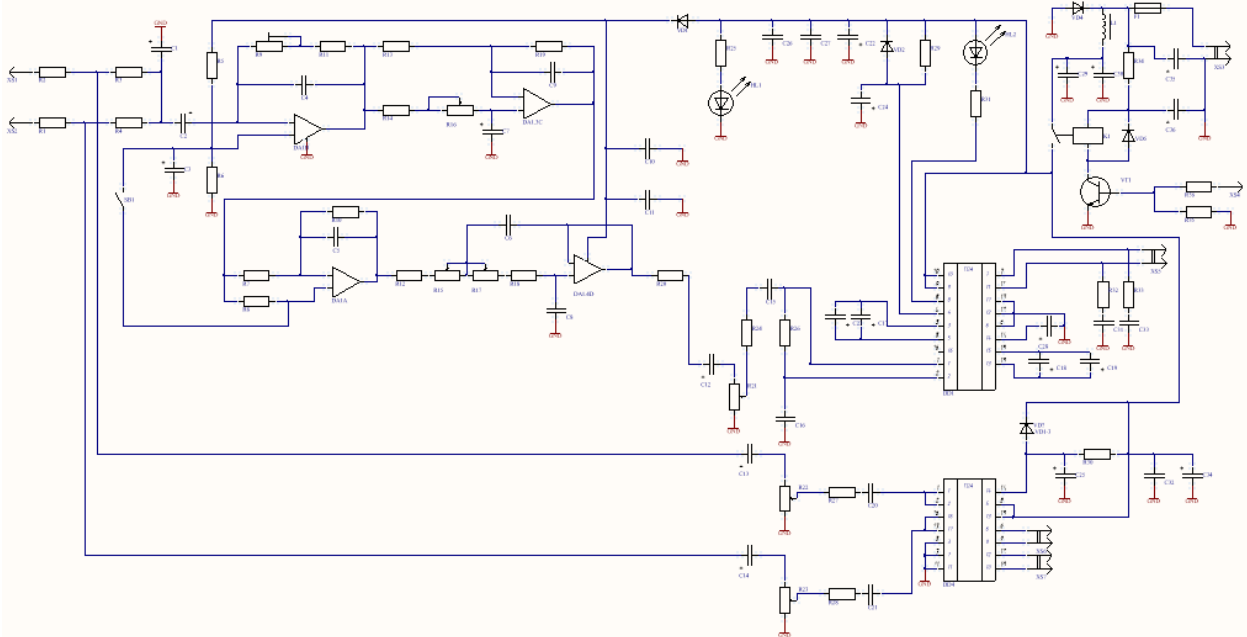


Рис. 10. Схема электрическая принципиальная в Altium Designer

После того как схема готова, производим компиляцию. В результате компиляции ошибок не обнаружено, значит схема сделана правильно.

#### Размещение компонентов на печатной плате.

Для того чтобы приступить к размещению компонентов, необходимо создать файл платы. Командой *Project > Add New to Project > PCB* добавляем файл платы в существующий проект. С помощью ко-

манды *Design > Board Option* вызываем окно параметров *PCB* проекта и устанавливаем метрическую систему. Теперь необходимо упаковать соединения на печатную плату и разместить компоненты. После установки параметров платы импортируем компоненты из принципиальной схемы с готовыми электрическими связями. Для этого воспользуемся командой *Project > Import Changes from Source Documents* (рис. 11).

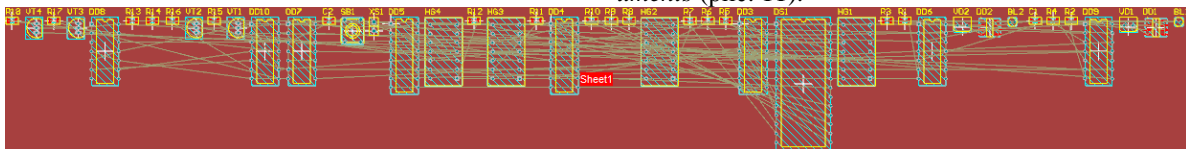


Рис. 11. Импортируемые компоненты платы

После того как элементы импортированы, производим их размещение на плате в соответствии с принципиальной схемой.

Необходимо создать контур платы. Для этого командой *Размещение > Линия* рисуем контур платы, после чего при помощи команды *Проект > Форма платы > Задать по выделенным объектам*, создаем плату необходимого размера. После того как плата готова, необходимо разместить крепежные отверстия. Для этого воспользуемся командой *Place > Pad*. Размеры крепежных отверстий устанавливаем равными 3,2 мм (рис. 12).

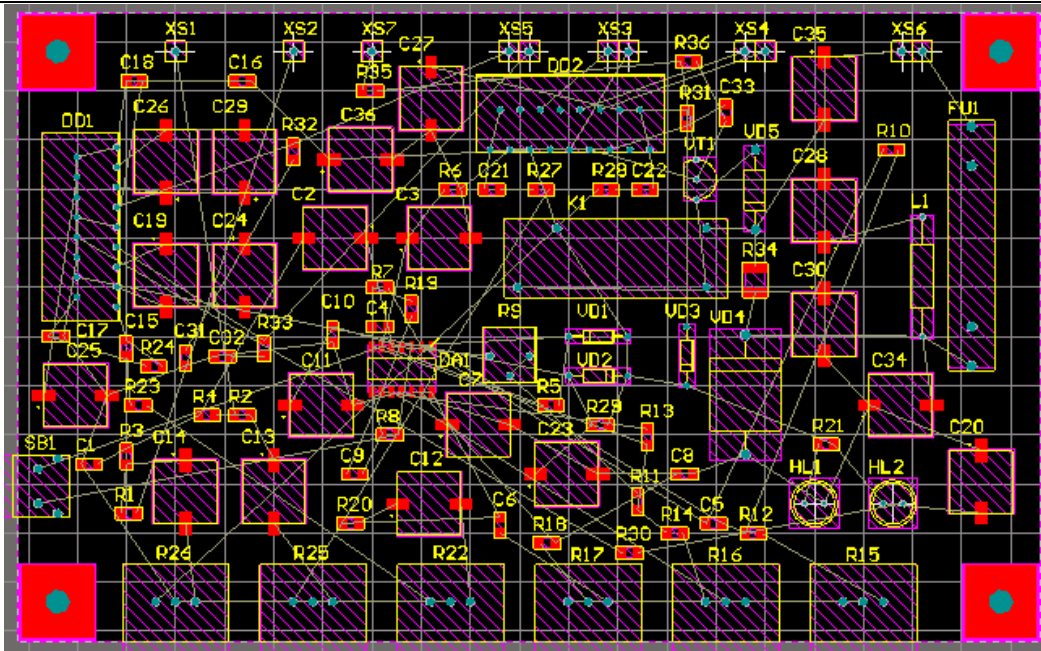


Рис. 12. Плата с крепежными отверстиями

Теперь плата полностью готова и можно получить ее 3D модель. Для этого нужно перейти в режим 3D Altium Designer командой Вид > Включить 3D.

В результате получили 3D модель печатной платы УМЗЧ в двух вариантах компоновки ЭРЭ, которые представлены соответственно на рис. 13, 14.

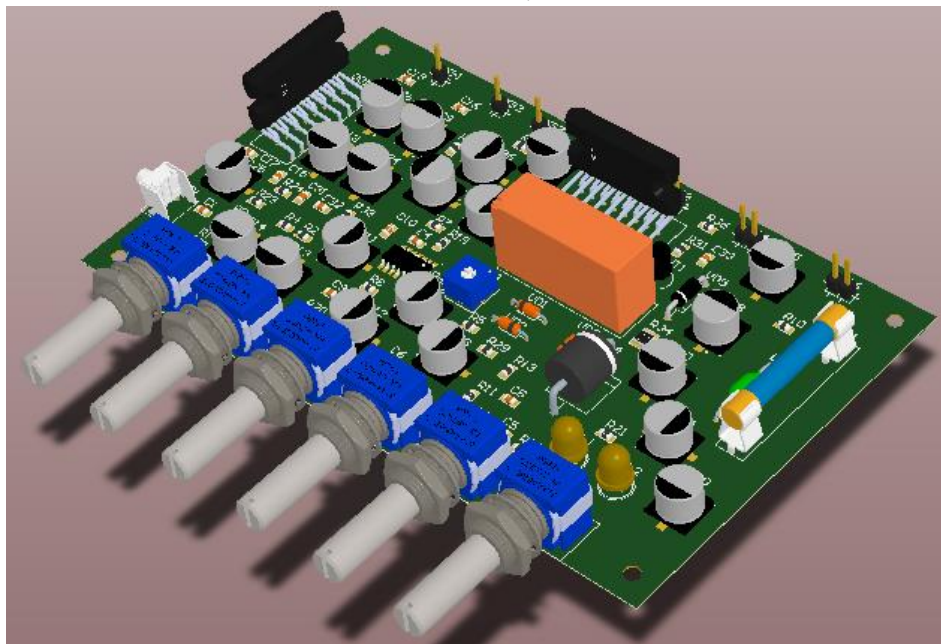


Рис. 13. Модель ПП УМЗЧ (1-й вариант компоновки)

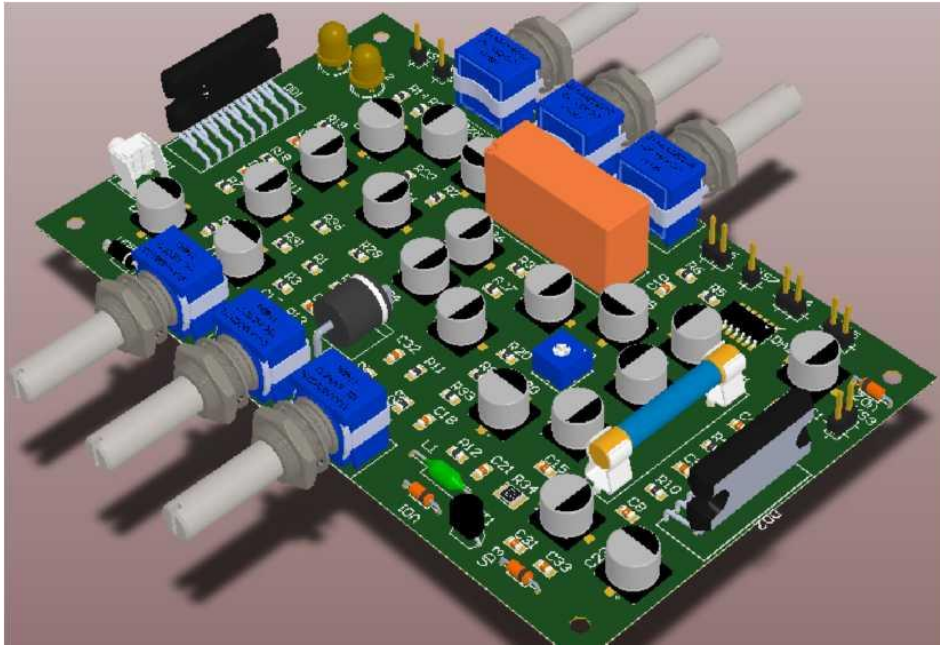


Рис. 14. Модель ПП УМЗЧ (2-й вариант компоновки)

Экспортирование модели печатной платы в *SolidWorks*. Для того чтобы можно было провести термический анализ печатной платы в *SolidWorks Simulation*, необходимо файл ПП сохранить в под-

держиваемом формате. Для этого выполняем последовательность команд: *File/Save Copy As*, затем выбираем тип файла «*Export IDF Board Files (\*.brd)*». Появляется окно, представленной на рис. 15.

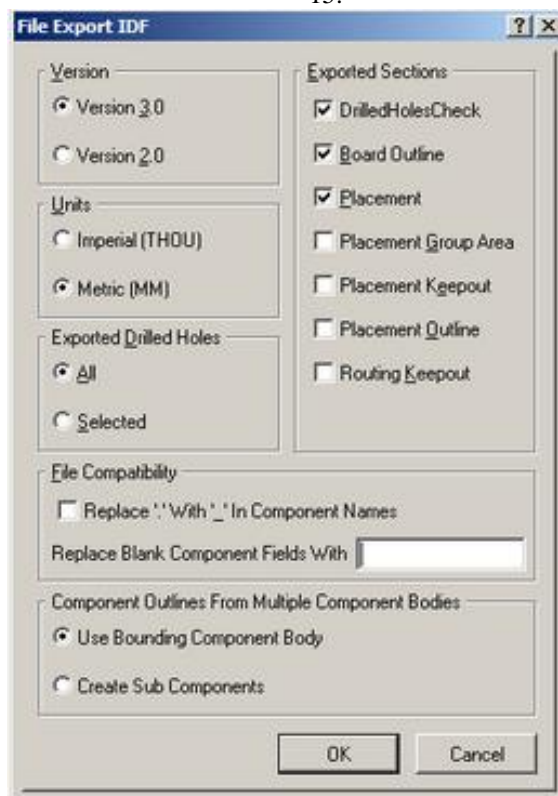


Рис. 15. Диалоговое окно экспорта в Altium Designer

В этом окне выставляем следующие опции: версия 3.0; метрическая система; экспорт контура платы (*Board Outline*); положение компонентов (*Placement*)

После экспорта получаем 2 файла: *.brd* файл с контуром печатной платы и расположением компо-

нентов и *.pro* файл с описанием компонентов. Каждое посадочное место описано координатами контура компонента и высотой.

В платформе *SolidWorks* с файлами, экспортированными из различных программ *ECAD*, работает приложение *CircuitWorks*. Перед началом им-

порта модели проводим настройку основных параметров *CircuitWorks*, таких как: ориентация модели в оси XZ, метрическая система измерений. Запускаем .brd файл и получаем плоскую модель платы с

прорисованными компонентами и отверстиями (рис. 16).

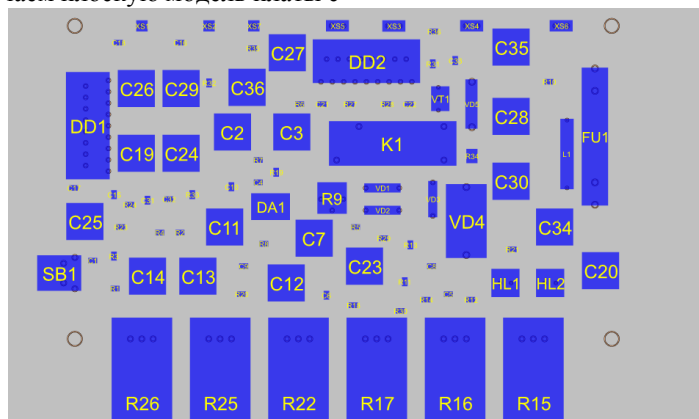


Рис. 16. Модель платы в *CircuitWorks*

Для упрощения модели печатной платы, необходимо погасить все отверстия, кроме крепежных и отредактировать толщину подложки. *CircuitsWorks* автоматически создаст упрощенные модели компонентов в виде параллелепипедов по габаритным

размерам на основе моделей, импортированных из *Altium Designer*.

После задания всех необходимых параметров, *CircuitsWorks* генерирует твердотельную 3D модель печатной платы в *SolidWorks*. В результате получаем модель, представленную на рис. 17.

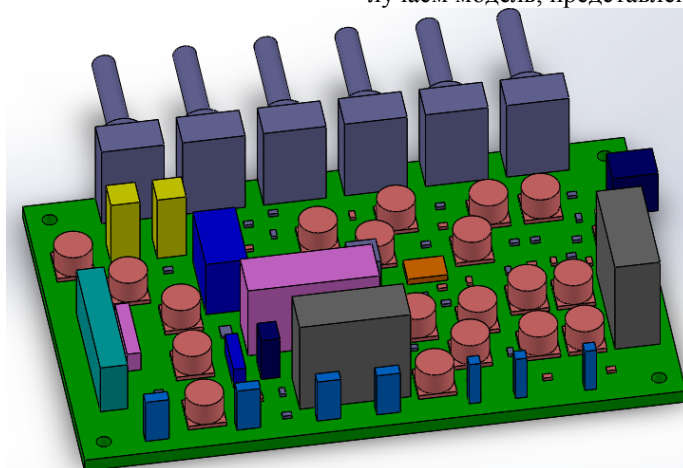


Рис. 17. 3D модель платы в *SolidWorks*

**Термический анализ печатной платы.** Термический анализ ПП осуществляется с помощью программного пакета *SolidWorks Simulation*. Для этого в *Property Manager* выбираем тип исследования: термический. Для того, чтобы приступить к

анализу, необходимо определить материал компонентов на плате. Для упрощения расчетов, выбираем в библиотеке материалов для самой платы – гетинакс, для ЭРЭ – ABS-пластик. Параметры выбранных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материалов модели

Параметры	Гетинакс	ABS-пластик
Модуль упругости Н/м <sup>2</sup>	1,5 · 10 <sup>9</sup>	2 · 10 <sup>9</sup>
Коэффициент Пуассона	0,3	0,394
Плотность кг/м <sup>3</sup>	1350	1020
Предел прочности (рассяжение)	16 · 10 <sup>7</sup>	3 · 10 <sup>7</sup>
Теплопроводность Вт/(м · К)	0,3	0,2256
Удельная теплоемкость Дж/(кг · К)	1470	1386

Следующим этапом является задание граничных условий для нашей модели. Программа позволяет реализовать следующие виды тепловых воздействий: конвекция, температура, тепловая мощность, тепловой поток, излучение.

Условия испытаний: воздействие 3 температур окружающей среды (273 К, 300 К, 323 К).

Нас интересует стационарный тепловой процесс, а именно: получить тепловую карту, которую в дальнейшем можно будет проанализировать.



Чтобы реализовать данные условия испытаний, нам достаточно будет использовать 2 вида термических нагрузок: конвекция и тепловая мощность.

Параметры конвекции: указываем грани с конвективным теплообменом с окружающей средой, коэффициент конвективной теплоотдачи (25

Вт/(м<sup>2</sup>·К)), температура окружающей среды. Параметры тепловой мощности: объект рассеивания, рассеиваемая мощность.

После задания термических нагрузок, необходимо построить сетку. Результаты создания сетки представлены на рис. 18.

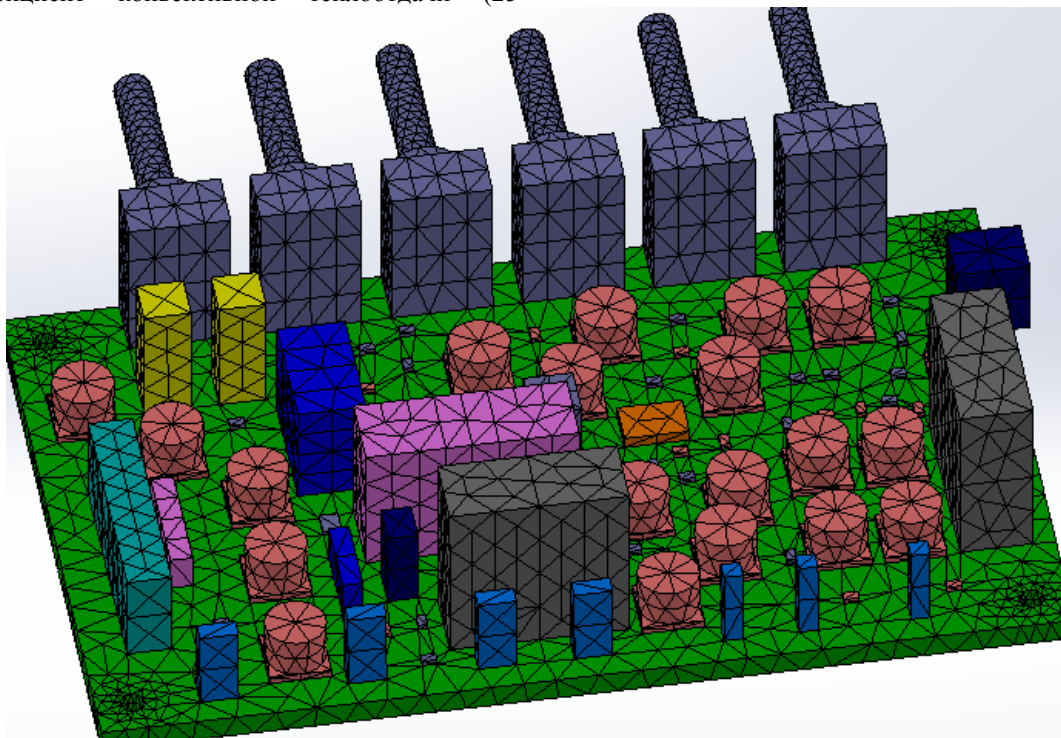


Рис. 18. Построение сетки КЭ

Если при построении сетки возникли ошибки – устраняем, если нет – запускаем решение, которое будет выполняться решающей программой *FFEPlus*.

В результате моделирования, для указанных температур получаем следующие тепловые карты:

- 273 К (рис. 19);
- 300 К (рис. 20);
- 323 К (рис. 21);

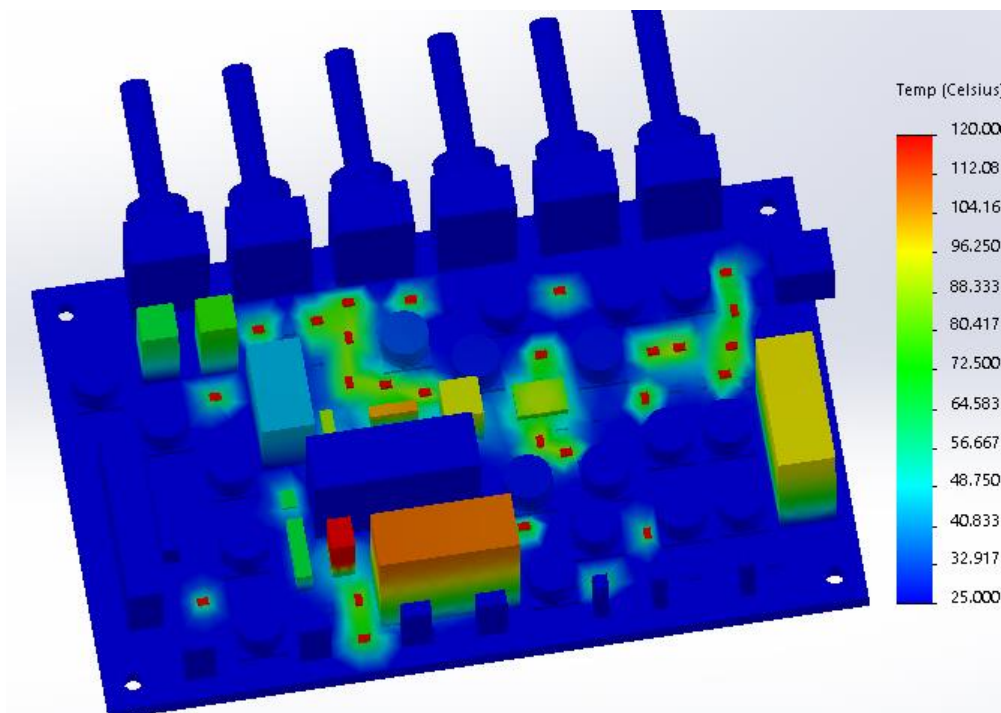


Рис. 19. Тепловая карта (273 К)

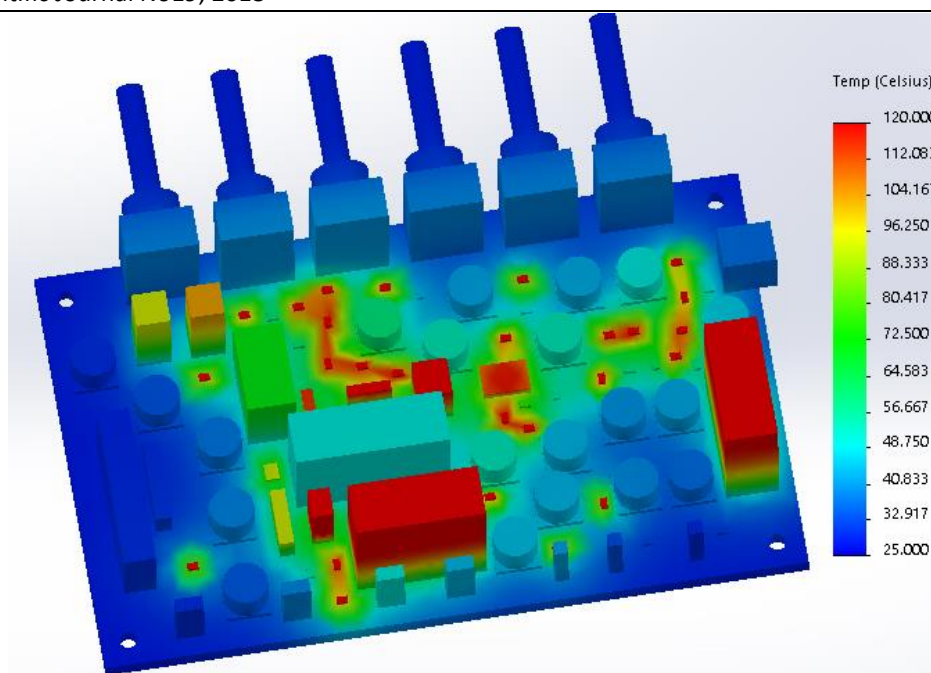


Рис. 20 – Тепловая карта (300 K)

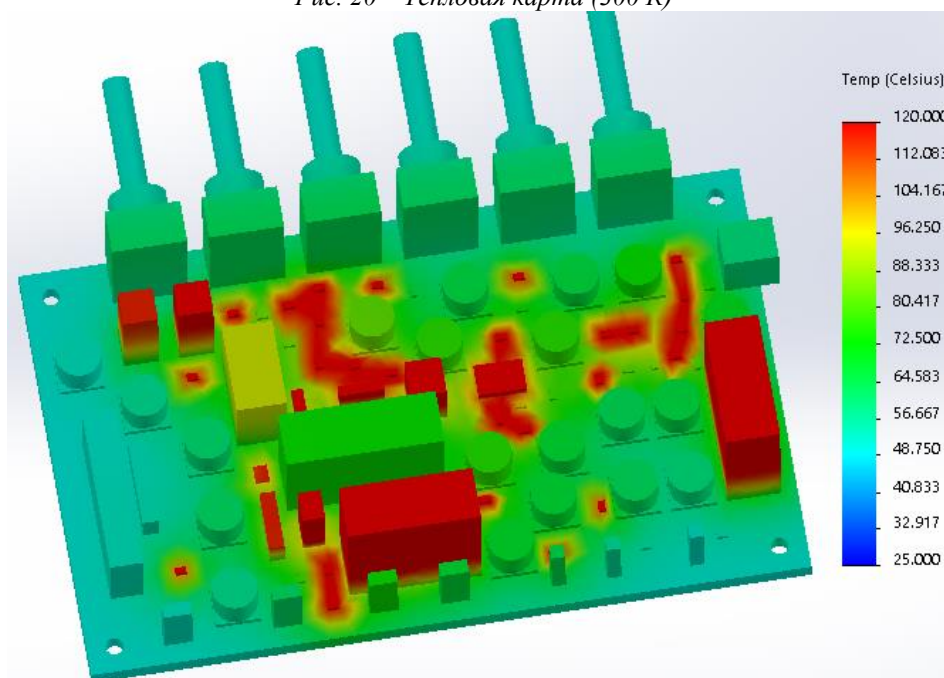


Рис. 21 – Тепловая карта (323 K)

**Заключение.** В результате исследований были получены трехмерные модели печатной платы в разных вариантах компоновки радиоэлектронных элементов и проведено численное моделирование тепловых процессов при различных условиях окружающей среды. Создание трехмерной модели и сам процесс моделирования тепловых процессов производились при помощи САПР *Altium Designer* и *SolidWorks Simulation*.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Алексеев, В.Ф. Тепловые модели отказов полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлев // Доклады БГУИР. – 2005. – № 2 (10). – С. 65–72.
2. Анализ физико-химических процессов, определяющих отказы интегральных схем / В.В. Маклюк, В.Ф. Алексеев, Р.А. Божко, А.Н. Савосько, Эль-Хадад Весама Мохамед // Инженерный вестник. – 2006. – №1(21)/3. – С. 229–234.
3. Алексеев, В. Ф. Использование кондуктивной схемы испытаний реакции полупроводниковых приборов на внешний ЭМИ / В. Ф. Алексеев, В. И. Журавлёв, В. П. Бруцкий-Стемпковский // Известия Белорусской инженерной академии, Минск. – 2005. – № 1 (19)/1. – С. 28–31.
4. Физические основы проектирования радиоэлектронных средств. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 2: Исследование физических процессов в конструкциях РЭС: пособие / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, И. Н. Богатко. – Минск: БГУИР, 2017.

– 74 с.

5. Кожевников, А.М. Методология оптимального проектирования бортовых радиоэлектронных средств на основе моделирования их электрических, тепловых и механических режимов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – М.: ФГУП «ВИМИ». – 2005. – № 2. – С. 7-13.

6. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1: Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий: пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск: БГУИР, 2017. – 124 с.

7. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

8. Русак, А.А. Анализ методов теплового моделирования радиоэлектронных средств / А.А. Русак, А.П. Горбач, В.Ф. Алексеев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. трудов по материалам междунар. заоч. науч.-практич. конф., Воронеж, Российская Федерация / ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж. 2015. – С. 391–394.

9. Пискун, Г. А. Методика расчета распределения температуры в токоведущих элементах печатной платы при воздействии электромагнитного импульса до 2-х наносекунд в Comsol Multiphysics / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. А. Денисов // Электронный депозитарий научных изданий БелИСА. – 2018. – №Д201807 от 05.01.2018.

10. Пискун, Г. А. Распределение температуры в токоведущих элементах печатной платы при воздействии электромагнитного импульса длительностью до 2-х наносекунд / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. А. Денисов // Электронный депозитарий научных изданий БелИСА. – 2018. – №Д201806 от 05.01.2018.

11. Марочкин, Д. М. Моделирование физических процессов электронных средств в программном комплексе SIMULINK / Д.М. Марочкин, Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ - 2013»: Материалы 9-ой международной молодежной научно-технической конференции. – Севастополь, 2013. – С. 369.

12. Причины повреждения металлизации интегральных схем в условиях воздействия токов повышенной плотности / Э.М. Врабий, Д.А. Дегалевич, Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – № 7 (18-1). – С. 228–232.

13. Алексеев, В. Ф. Особенности формализации задач принятия проектных решений при автоматизации проектирования радиоэлектронных средств / В.Ф. Алексеев // Известия Белорусской инженерной академии. – Минск, 2004. – № 1 (17/4). – С. 250–259.

14. Алексеев, В.Ф. Анализ влияния климатических факторов на работоспособность интегральных схем, работающих в составе РЭС / В.Ф. Алексеев,

Д.О. Ковальков, В.М. Эль-Хадад // Известия белорусской инженерной академии. – Минск, 2004. – № 1 (17/4). – С.18–22.

15. Zhuravliov, V.I. Failures of integrated circuits due to external EMI action through PCB / V.I. Zhuravliov, V.F. Alexeev // XXVIth General Assembly of International Union of Radioscience. Toronto, Canada. – 1999. – p.315.

16. Zhuravliov, V.I. Thermal transient in ICs due to NEMP action of nanosecond duration / V.I. Zhuravliov, V.F. Alexeev // International Scientific Conference «EuroElectromagnetics». Edinburgh, UK. – 2000. – p.68.

17. Алексеев, В.Ф. Прогнозирование работоспособности методом ускоренного пробоя / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв // Материалы научно-технической конференции «Направления и перспективы развития микросистемной базы, узлов и установок для приборостроения, систем связи и информатики». Белорусская научно-промышленная ассоциация. – Минск: 1995. – С.30–31.

18. Адамов, Ю. Ф. Кремниевые гетероструктуры для наноразмерных транзисторов // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – №7. – С.4–9.

19. Жан, М. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования: пер. с англ. / М. Жан. – М.: ООО «ИД Вильяме», 2007. – 197 с.

20. Алямовский, А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 160 с.

21. Кофанов, Ю. Н. Автоматизация проектирования и моделирования печатных узлов радиоэлектронной аппаратуры / Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин, А.В. Сарафанов и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 389 с.

22. Басов, К.А. Catia и Ansys. Твёрдотельное моделирование / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 242 с.

23. Бесшейнов, А. В. Исследование влияния вариантов установки радиоэлементов на их тепловые режимы / А.В. Бесшейнов, С.Б. Иджеллиден // Труды международного симпозиума. Надежность и качество (Россия, Пенза, 27 мая – 2 июня 2002). – Пенза: Информационно-издательский центр Пензенского государственного университета, 2002. – С.232.

24. Беляев, Я. М., Методы теории теплопроводности / Я. М. Беляев, А. А. Рядно. Т. 1,2. – М.: 1982. – 160 с.

25. Бесшейнов, А.В. Метод расчета тепловых режимов печатных узлов электронных средств / А. В. Бесшейнов, С. У. Увайсов // Статья. Журнал «Технологии ЭМС», №2 (21), 2007. – с. 59 – 62.

26. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1987. – 188 с.

27. Средства и технологии проектирования и производства электронных устройств. – М.: Изд-во ОАО «Родник Софт», 2000. – № 1. – 32 с.