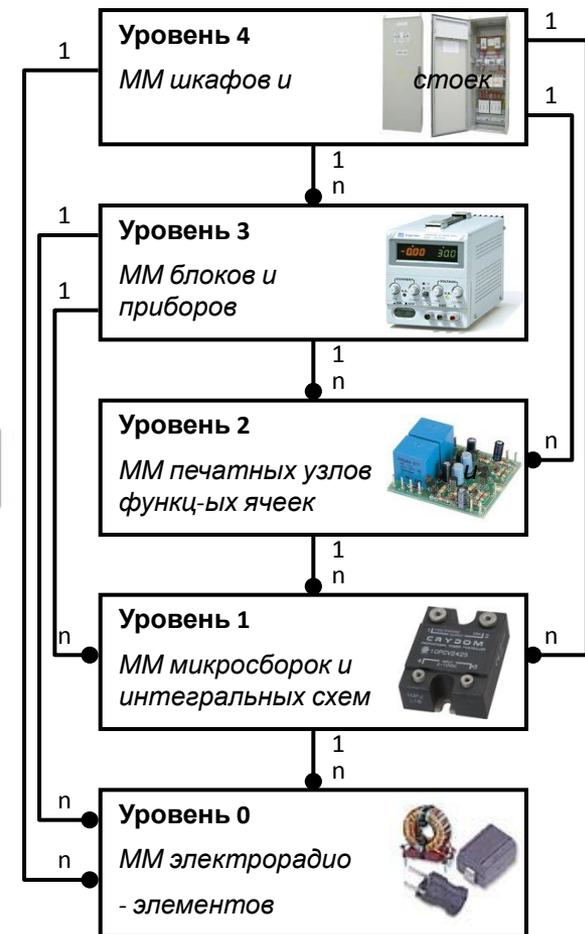


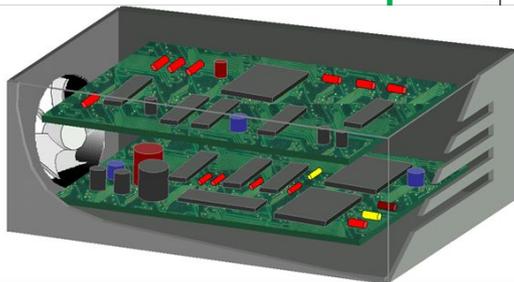
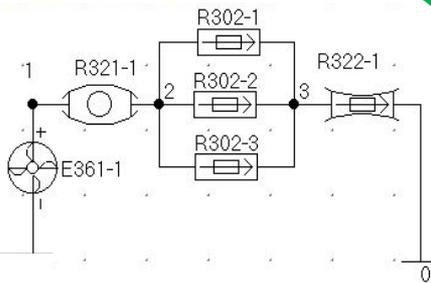
ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РЭУ



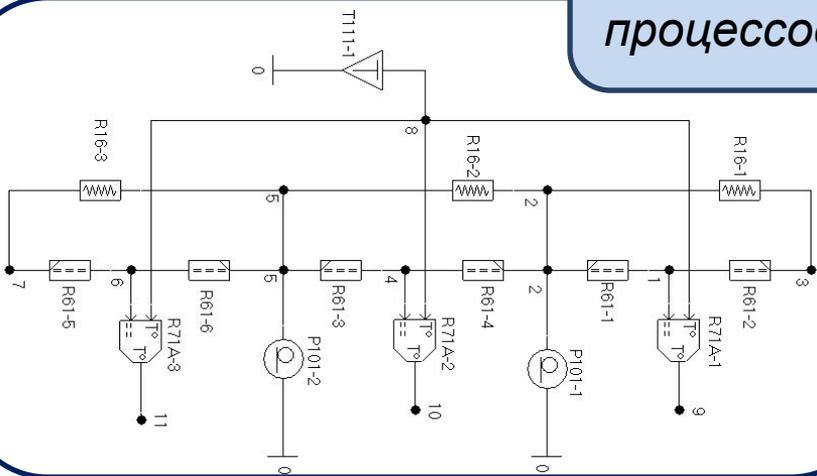
Математические модели верхних уровней иерархии

Эквивалентные схемы (уровни 3, 4)

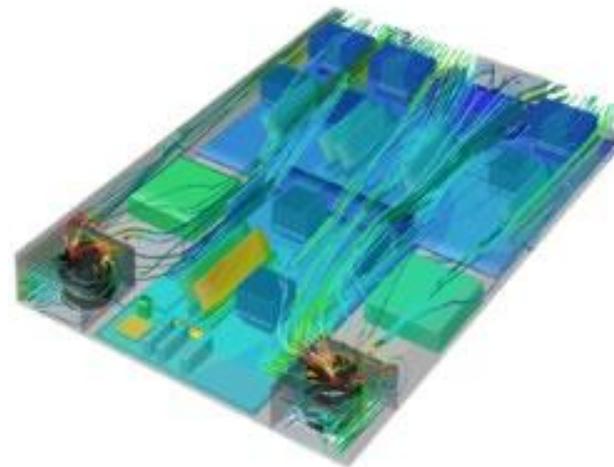
Модель
аэродинамическ
их процессов



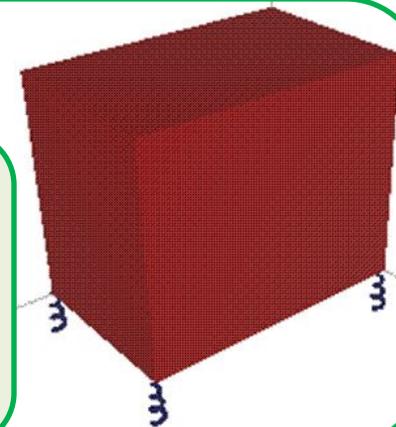
Модель
тепловых
процессов



Тепловые и
аэродинамические
процессы в блоке РЭУ

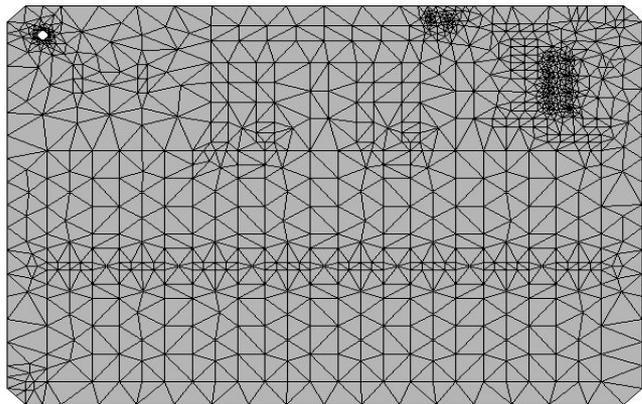


Упрощенная
модель
механических
процессов

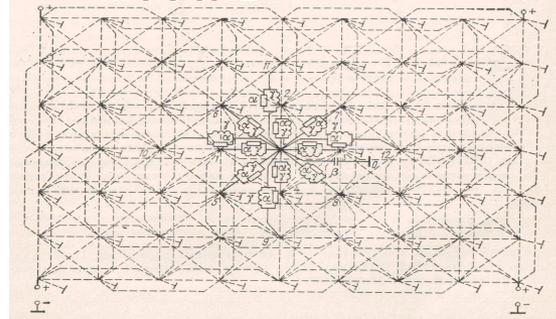
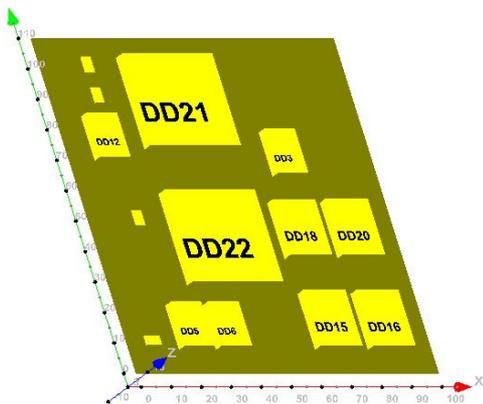


Математические модели нижних уровней иерархии (уровни 0 ... 2)

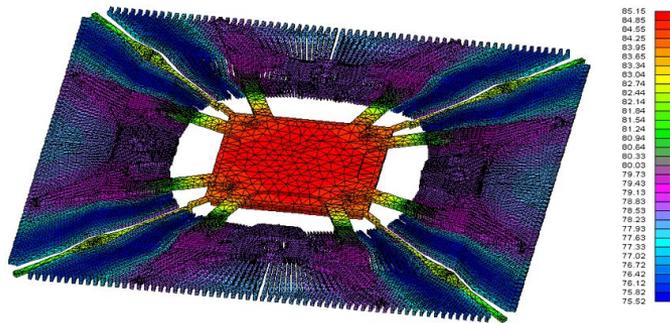
Конечноэлементная
модель платы



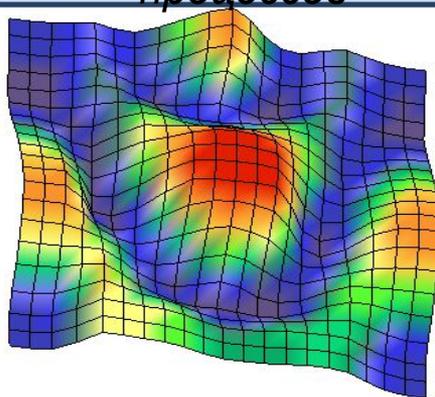
Трёхмерный эскиз печатного
узла и его топологическая
модель



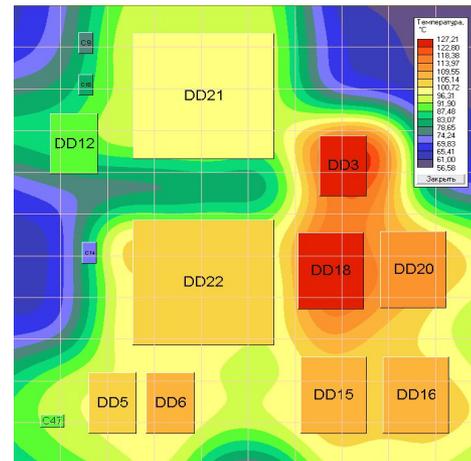
Конечноэлементная
модель ЭРИ и
результаты её расчёта



Результаты расчёта
механических
процессов



Результаты
расчёта тепловых
процессов



Программные средства математического моделирования

Программные средства моделирования Э., Т., ГА., М. процессов в РЭУ

Универсальные

Тепловые процессы:

*Ansys/Thermal;
Nastran;
Cosmos Works;
Simula;
FEMAP/Thermal Solver*

Механические процессы:

*Ansys/Mechanical;
Nastran;
Cosmos Works;
Simula;
Pro/ENGINEER
Mechanica*

Гидроаэродинамические процессы:

*Ansys/CFD; Cosmos FlowWorks; FLUENT;
Abaqus; FEMAP/Flow Solver*

Проблемно ориентированные

Электрические процессы:

*PCAD; OrCAD; PSB
Systems "MG";
Altium Designer
(Protel)*

Гидроаэродинамические процессы:

*АСОНИКА-П,
Ansys/IceBoard/
Icepack; Qfin;
FLOTHERM*

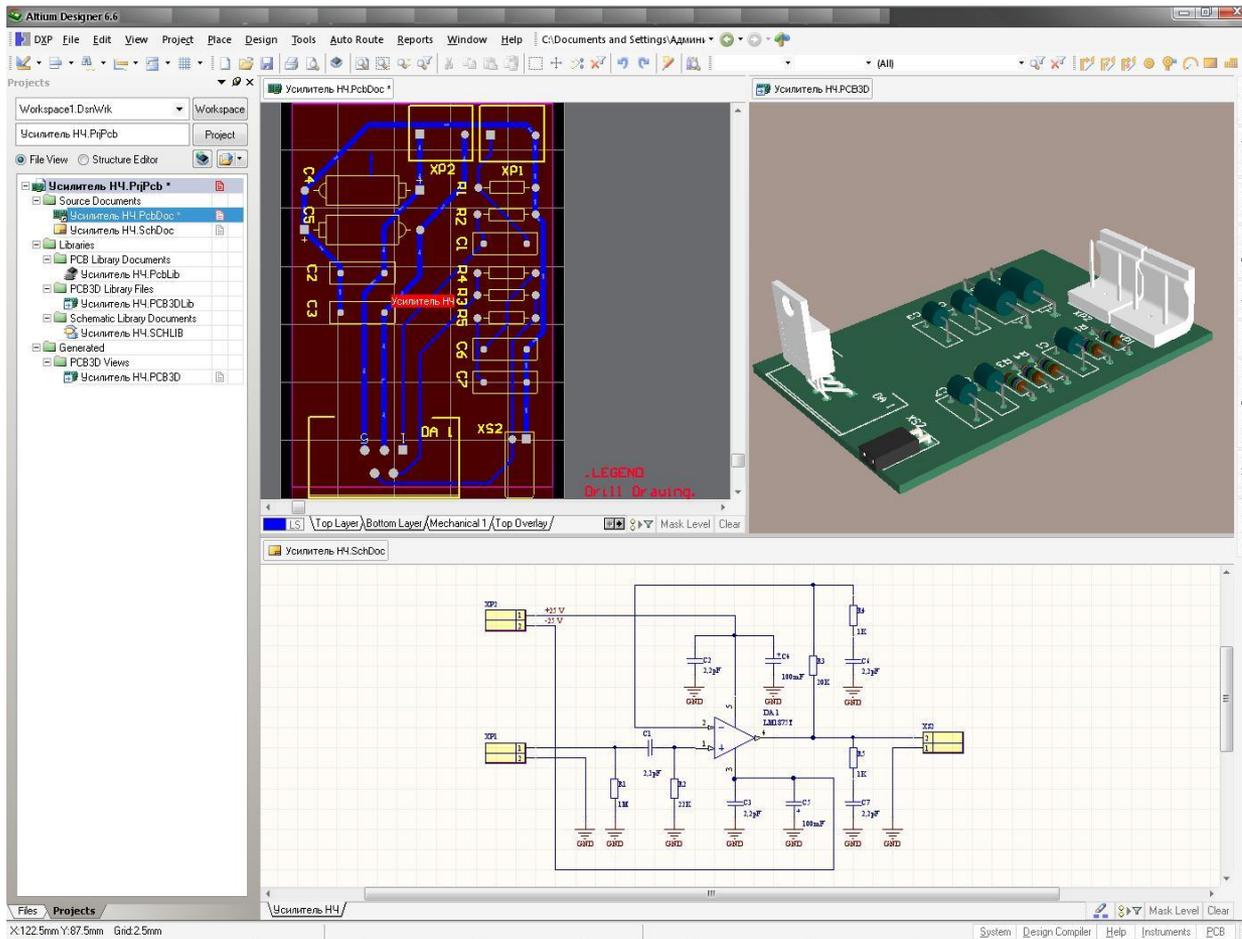
Тепловые процессы:

*АСОНИКА- Т / ТМ/
П; Ansys/ IceBoard/
Icepack; BetaSoft;
PCAnalyze; Qfin;
FLOTHERM*

Механические процессы:

*АСОНИКА- В /М/
ТМ/П;*

Программные средства для моделирования электрических процессов в РЭУ



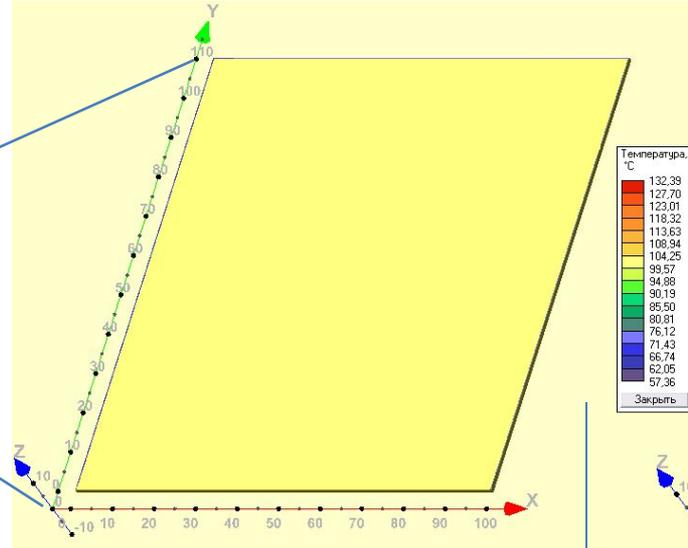
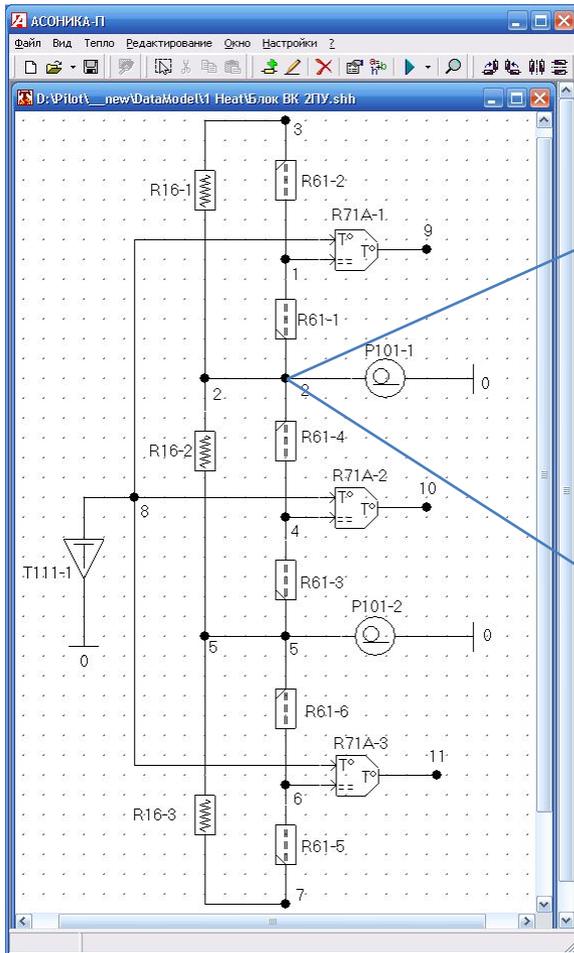
Программные средства
PCAD;
OrCAD;
PSB Systems “Mentor Graphics”;
Altium Designer (Protel);
CADSTAR “ZUKEN”;
Micro-Cap

Общие черты:
Основаны на ядре Spice;
Позволяют организовать сквозной цикл проектирования ПП

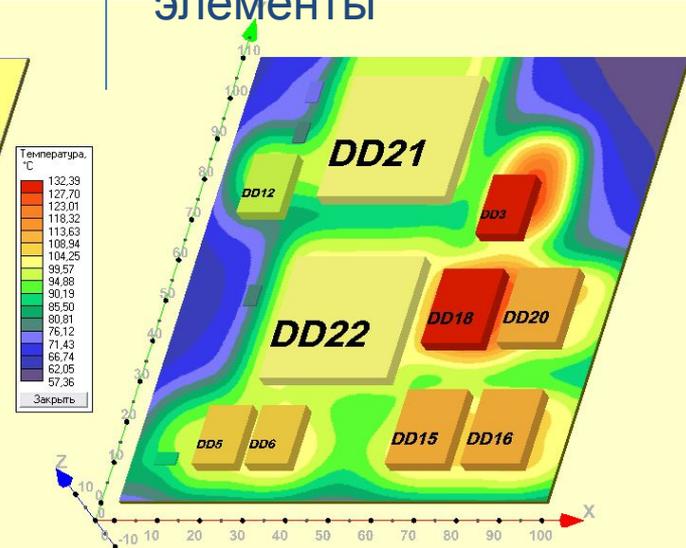
Проблемно-ориентированные программные средства для моделирования тепловых процессов в РЭУ

Элементарные виды
теплообмены

Типовые
конструктивные
элементы

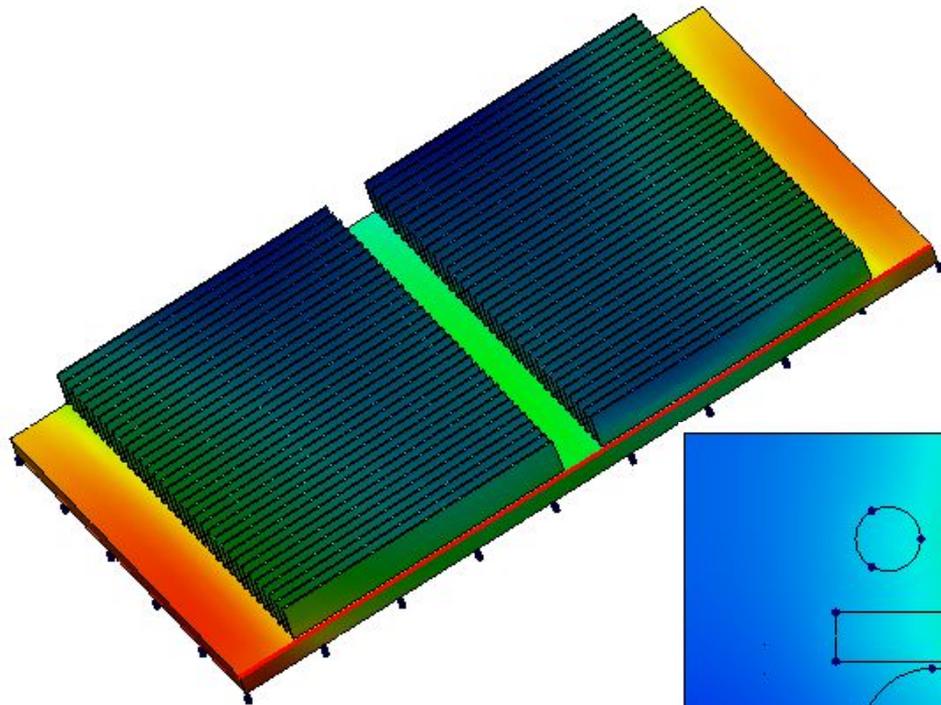


Идеализация
тепловых процессов,
принимаемая в
моделях **верхних**
уровней иерархии

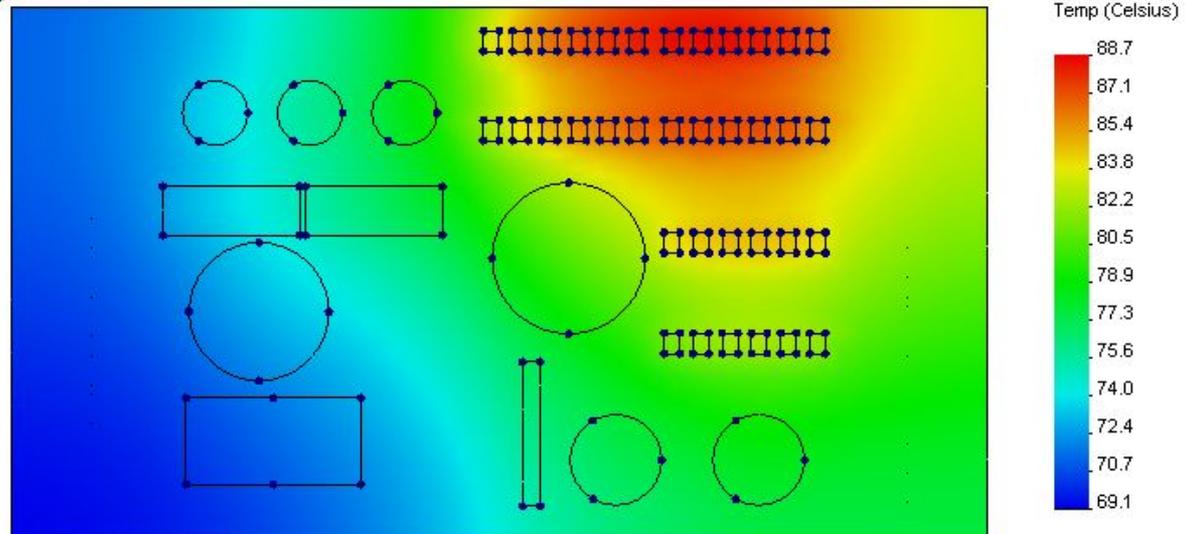


Идеализация
тепловых процессов,
принимаемая в
моделях **нижних**
уровней иерархии

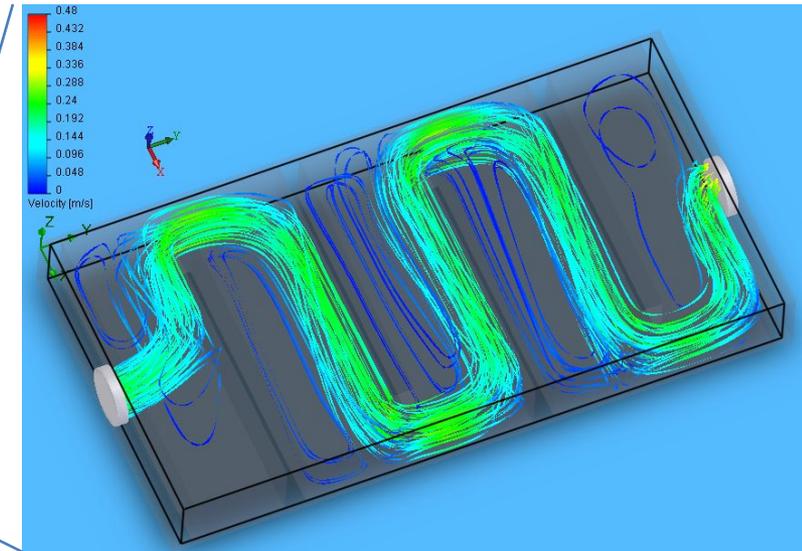
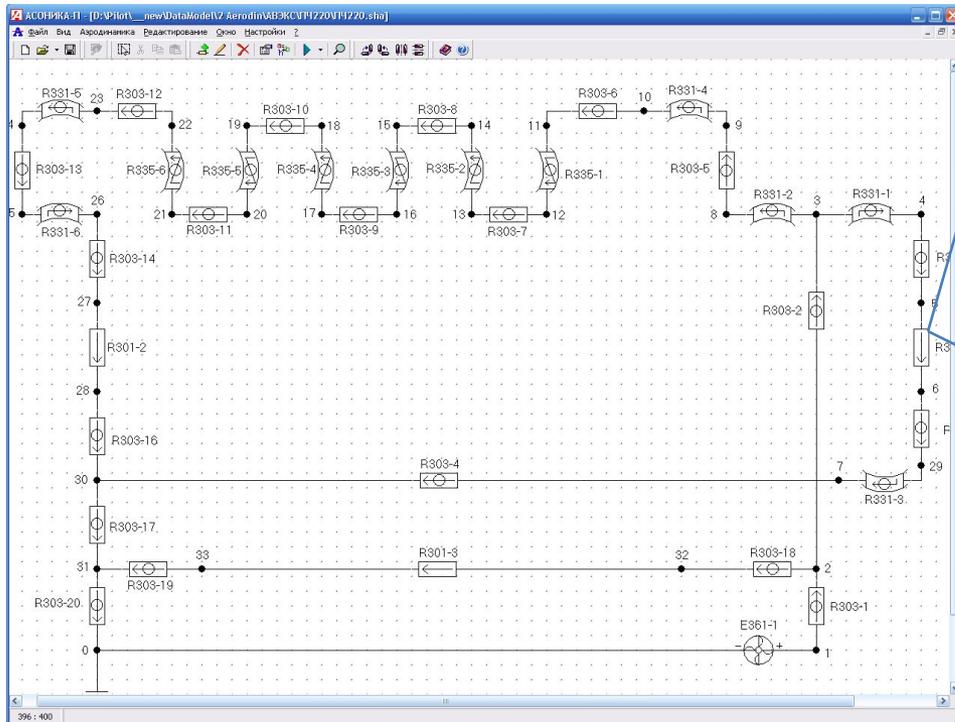
Универсальные программные средства для моделирования тепловых процессов в РЭУ



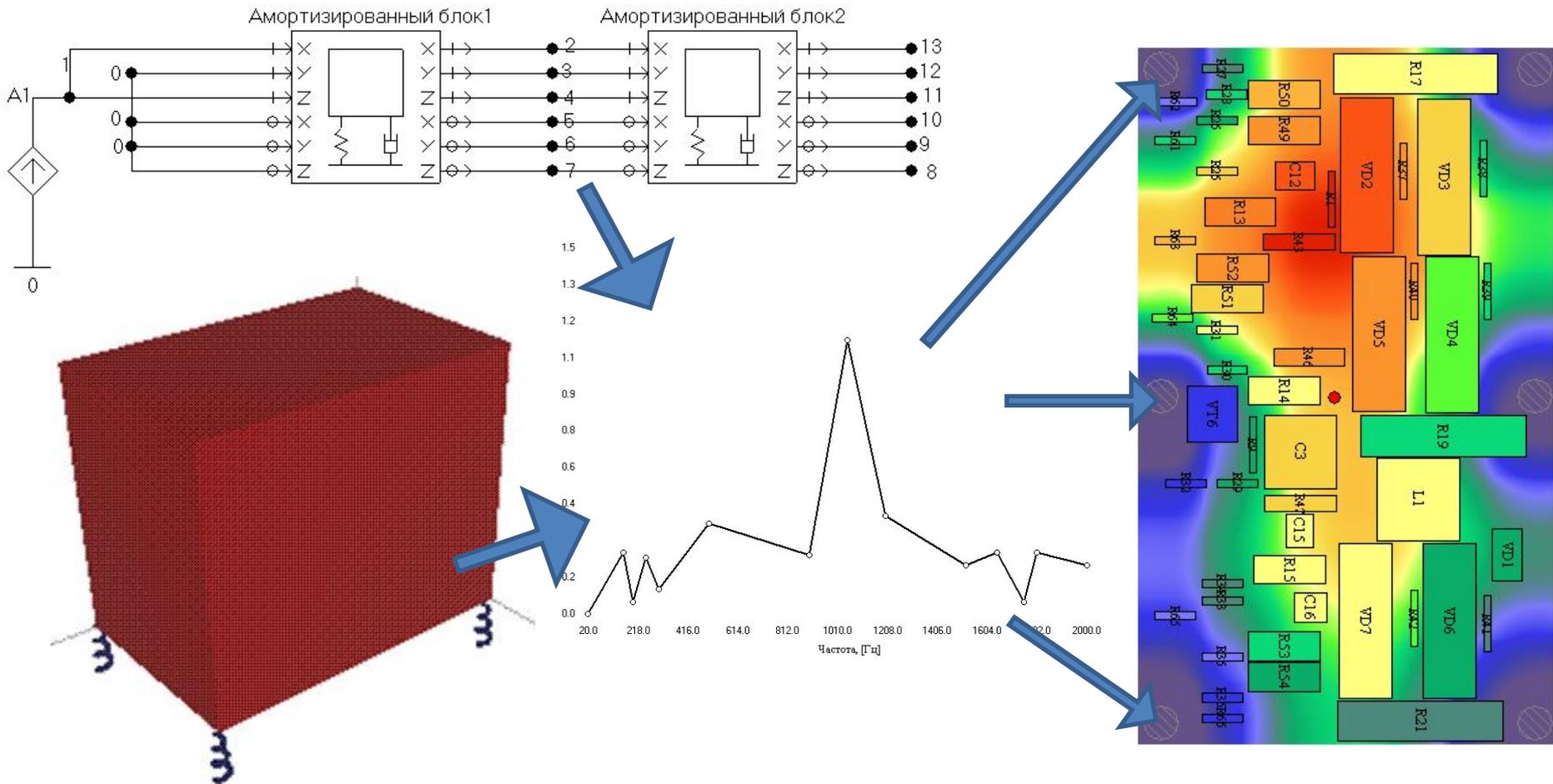
Нетиповые
конструктивные элементы



Программные средства для моделирования гидроаэродинамических процессов в РЭУ

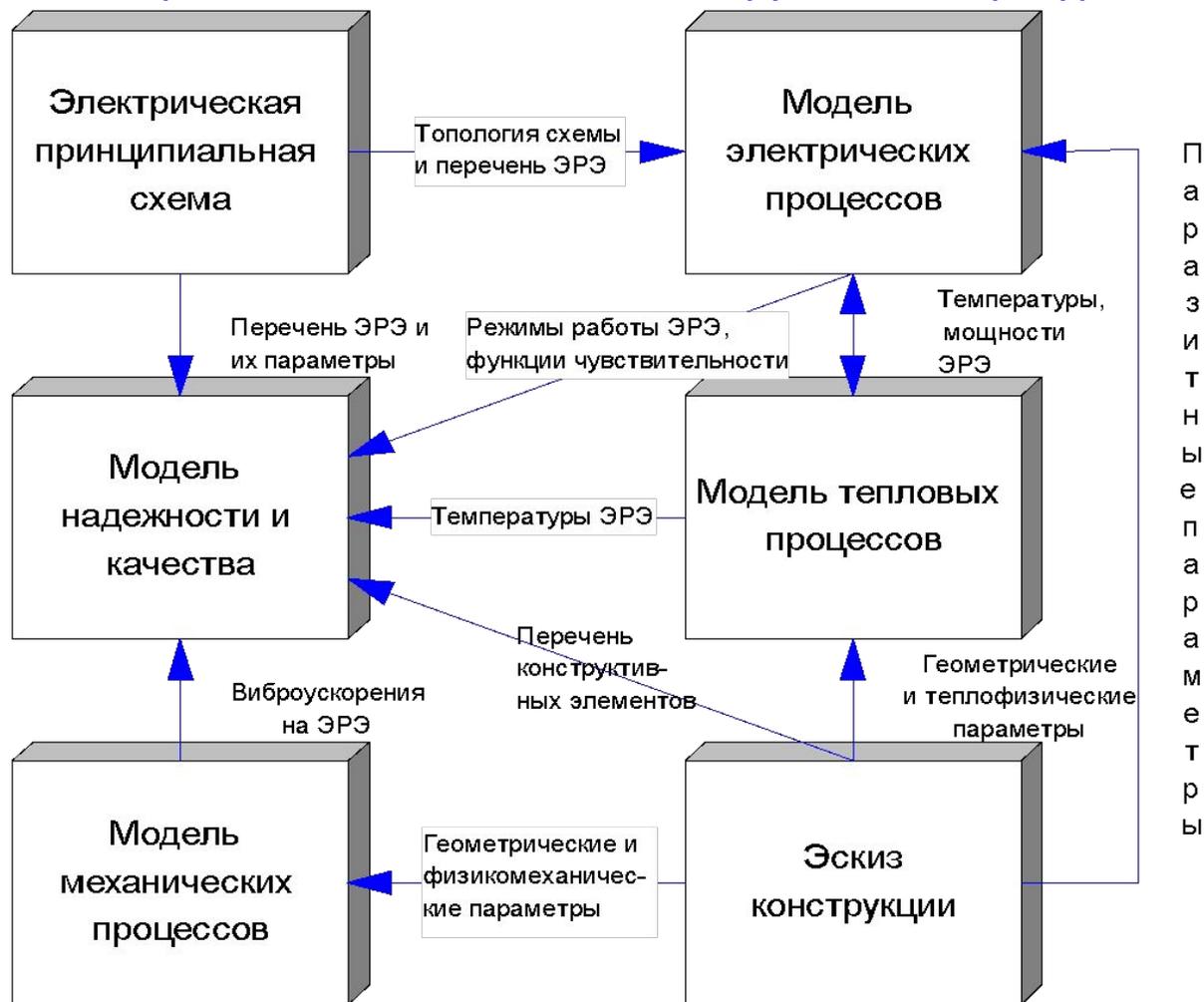


Программные средства для моделирования механических процессов в РЭУ



Моделирование в процессе автоматизированного проектирования

Под моделью аппаратуры, понимается представленное в той или иной форме математическое описание, которое адекватно отражает сущность и характерные свойства рассматриваемого физического процесса, протекающего в схеме и конструкции аппаратуры.



Модель электрических процессов

Электрическими называются модели РЭС, отображающие процессы, протекающие в принципиальных схемах аппаратуры с учетом паразитных параметров конструкций.

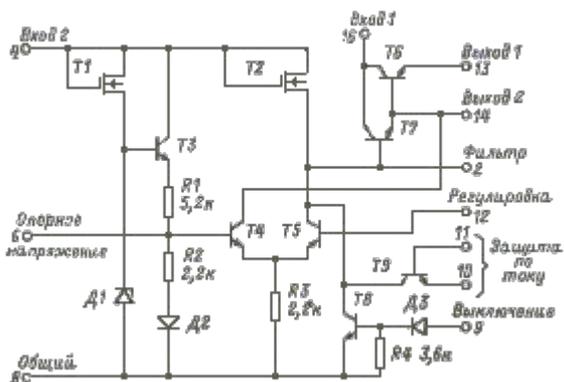


Рис.1. Электрическая принципиальная схема

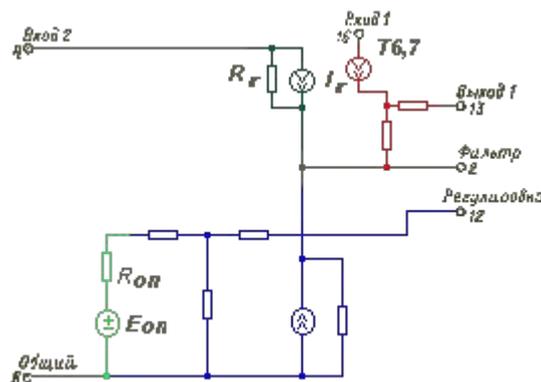


Рис.2. Модель электрических процессов

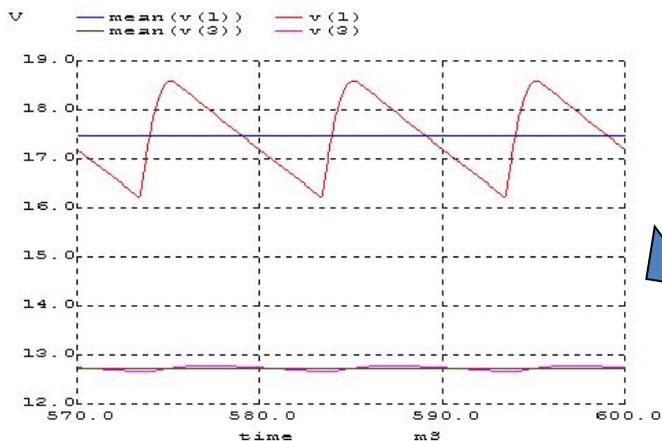
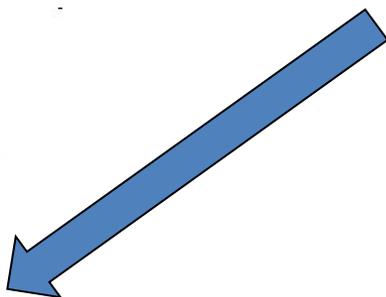


Рис.3. Результаты моделирования



Модель тепловых процессов

Моделью тепловых процессов называется, представленная в виде ненаправленного графа, схема путей распространения тепловых потоков в конструкции.

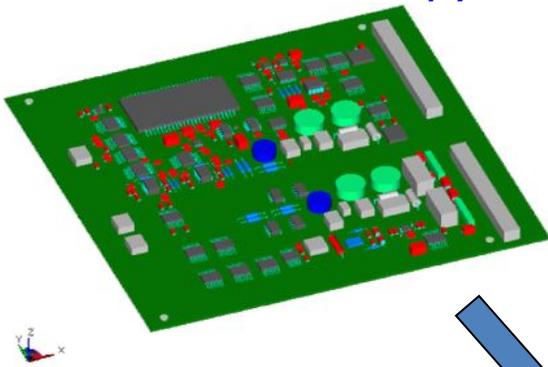


Рис. 1. Эскиз печатного узла

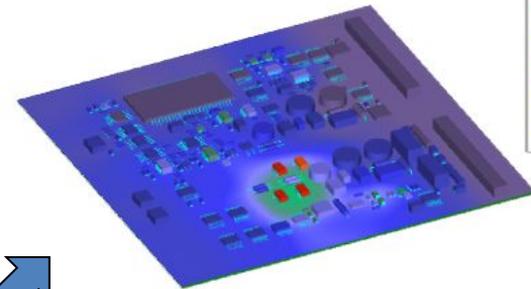


Рис. 3. Температурное поле печатного узла

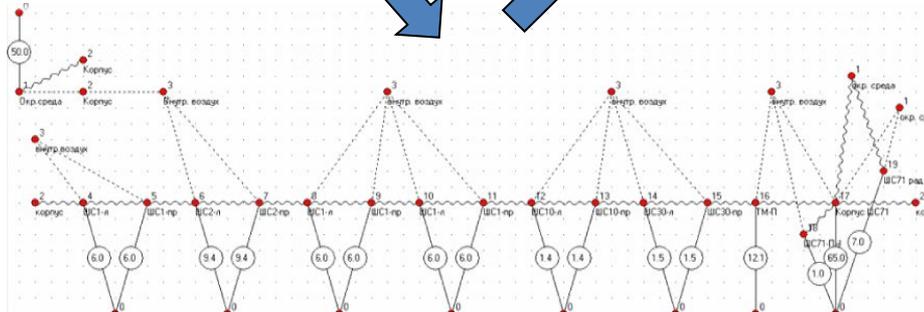


Рис.2. Вид модели тепловых процессов

Пример влияния тепловых процессов на электрические

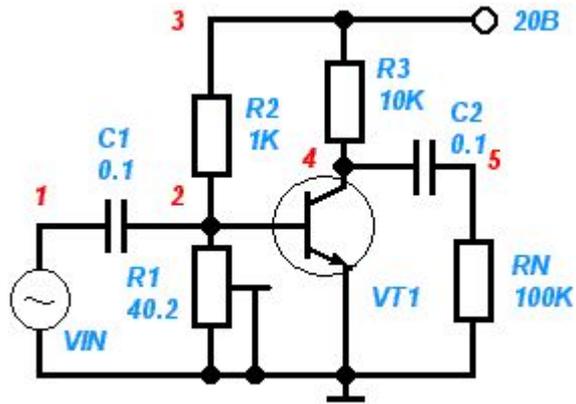


Рис.1. Электрическая принципиальная схема

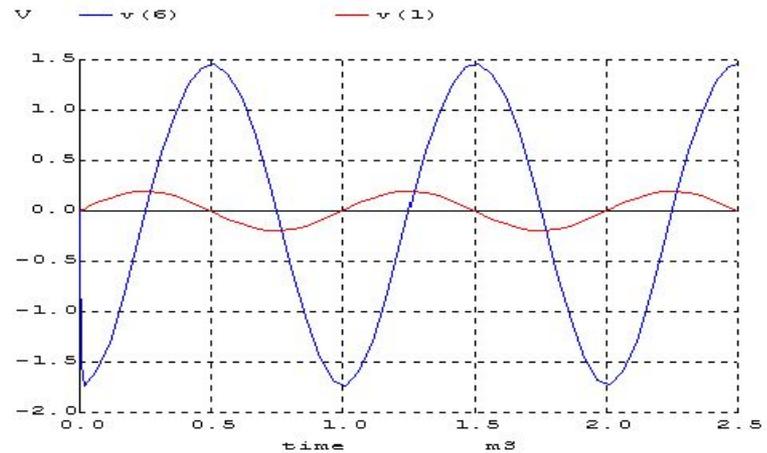


Рис.2. Результаты моделирования при $T=25^{\circ}\text{C}$

- С увеличением температуры транзистора с 25°C до 40°C , т.е. всего на 15°C , рабочая точка транзистора сместилась в сторону насыщения и, следовательно, входной сигнал усиливается с искажениями.

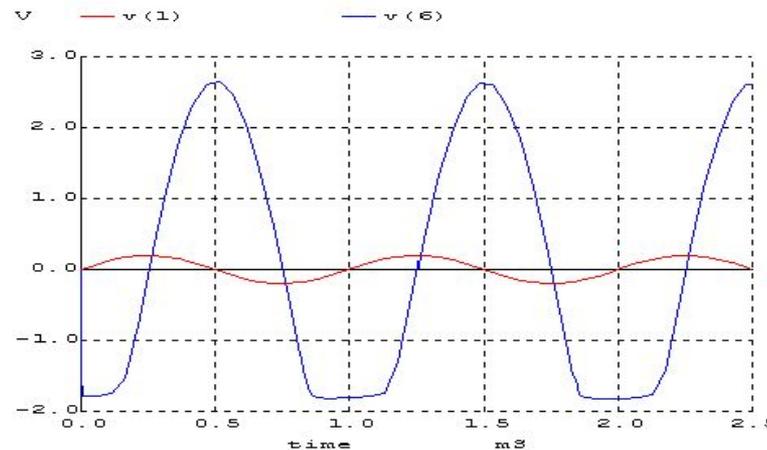


Рис.3. Результаты моделирования при $T=40^{\circ}\text{C}$

Модель механических процессов

Механическими называются модели РЭС, отображающие процессы, протекающие в конструкциях аппаратуры при воздействии ударов и вибраций.

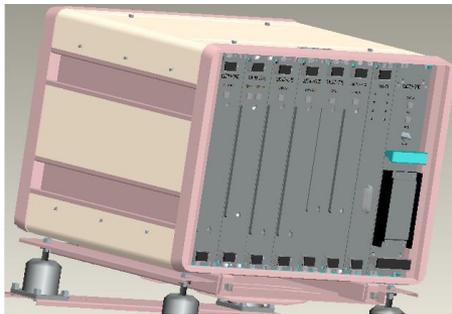


Рис. 1. Эскиз блока

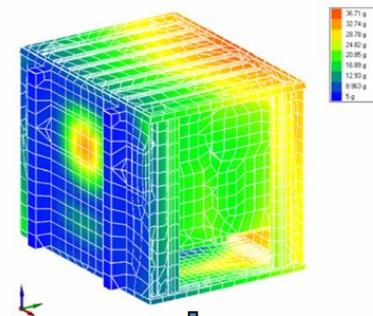


Рис. 2. Поле ускорений

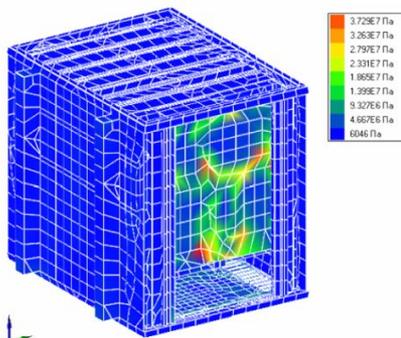


Рис. 3. Поле напряжений

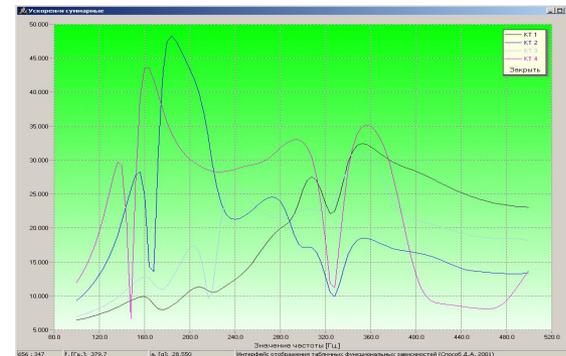
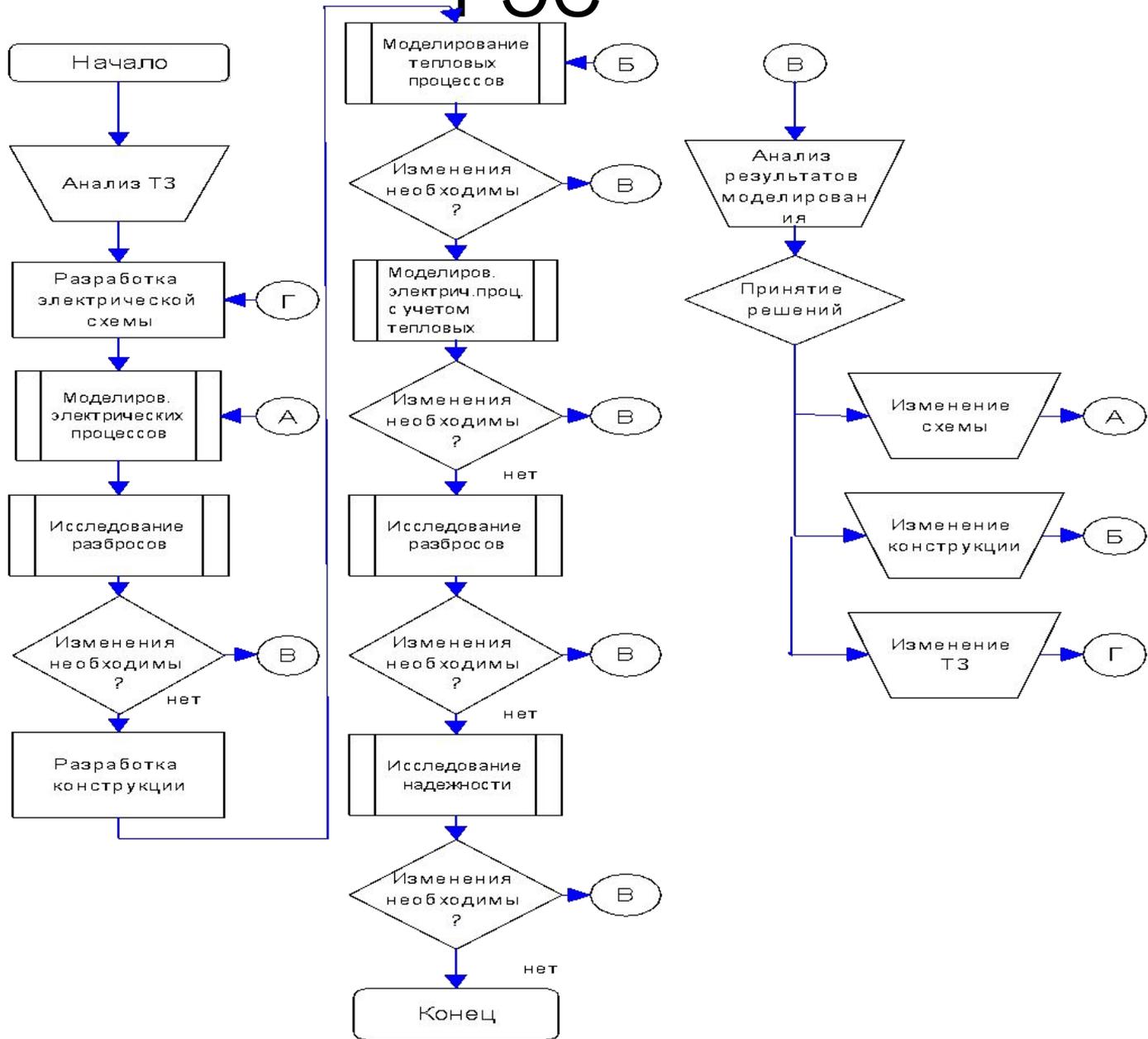


Рис. 4. Графики ускорений в контрольных точках

Схема алгоритма методики моделирования

РЭС

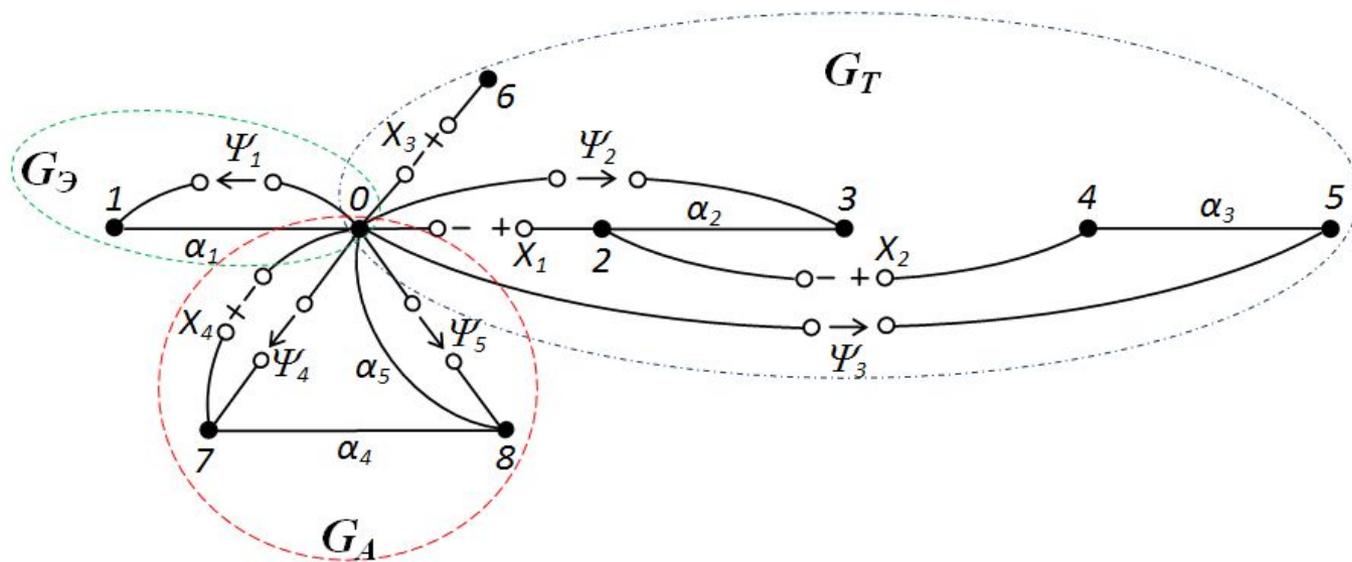
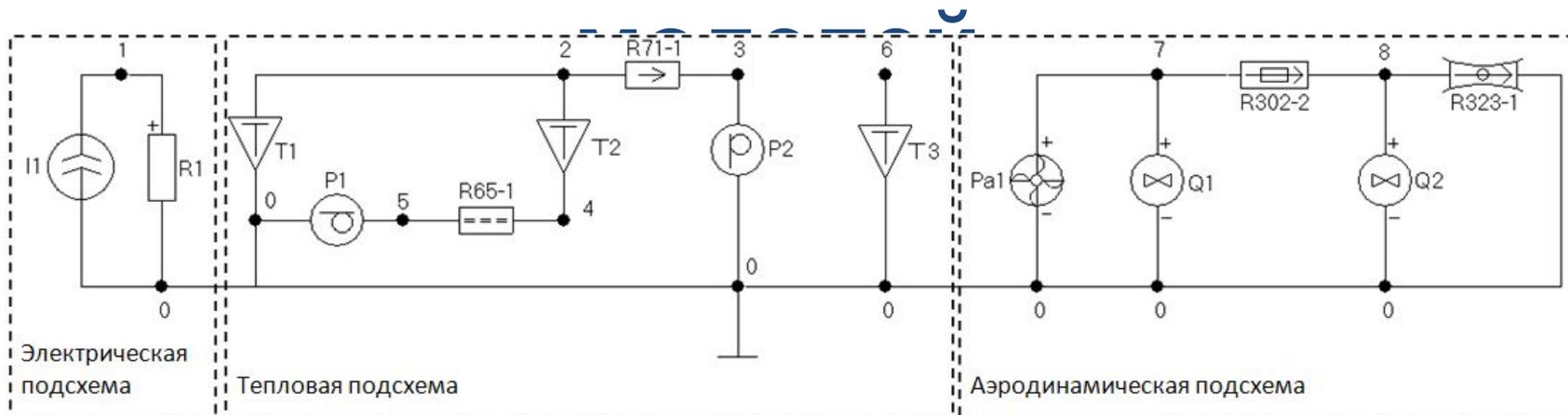


Аналогии в математическом описании физических процессов

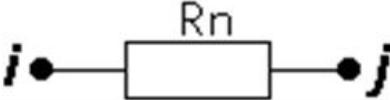
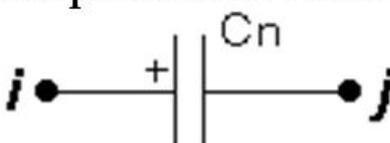
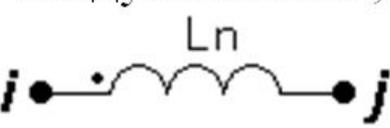
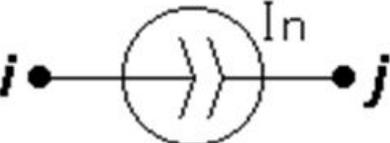
Физический процесс	Как термодинамическая переменная)	
	Узлы	Ветви
Электричество	Напряжение (потенциал)	Ток, напряжение (перепад напряжения)
Тепло	Температура	Тепловой поток
Аэродинамика	Давление	Скорость и расход воздуха
Механика	Перемещение	Производная силы
	Скорость	Сила
	Ускорение	Импульс силы

Универсальное обозначение	Электрическая цепь	Тепловая цепь	Аэродинамическая цепь	Механическая цепь
Диссипативный компонент	Сопротивление	Тепловое сопротивление: - кондукция; - конвекция (ЕК и ВК); - излучение.	Аэродинамическое сопротивление: - местные; - трения.	Демпфирование
Консервативный компонент I-го рода	Ёмкость	Теплоёмкость	Аэродинамическая ёмкость	Масса
Консервативный компонент II-го рода	Индуктивность	-	-	Податливость
Активный потенциальный компонент	Источник тока	Источник мощности	Расход воздуха	Источник скорости
Активный потоковый компонент	Источник напряжения	Источник температуры	Источник давления	Источник силы

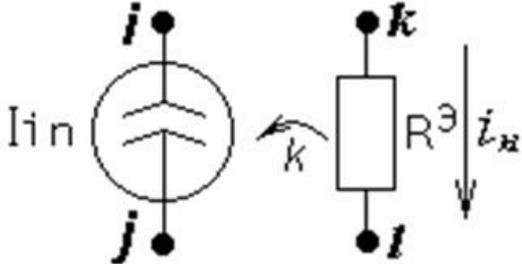
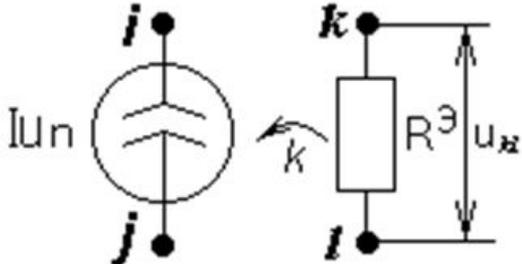
Топологическая форма представления математических



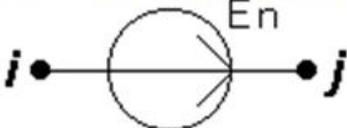
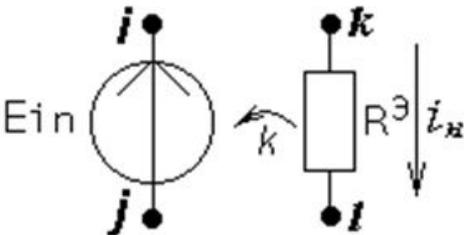
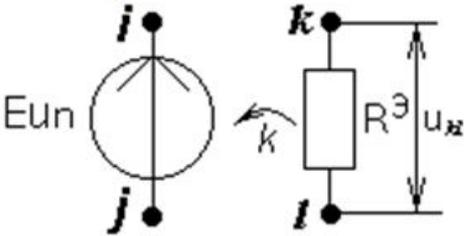
Компоненты моделей электрических процессов

№ п/п	Название и обозначение ветви	Тип компонента и параметры ветви
1.	Электрическое сопротивление, 	Диссипативный, r – электрическое сопротивление ветви
2.	Электрическая емкость, 	Консервативный I рода, c – электрическая емкость ветви.
3.	Индуктивность, 	Консервативный II рода, l – индуктивность ветви.
4.	Источник тока, 	Активный потоковый, i – ток ветви.

Компоненты моделей электрических процессов (продолжение)

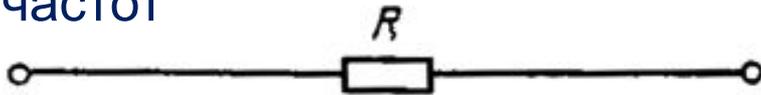
№ п/п	Название и обозначение ветви	Тип компонента и параметры ветви
5.	<p>Источник тока, управляемый током ветви</p> 	<p>Активный потоковый, i – ток в ветви R^z включенной между узлами k и l; μ – коэффициент управления.</p>
6.	<p>Источник тока, управляемый напряжением в ветви</p> 	<p>Активный потоковый, u – напряжение в ветви R^z включенной между узлами k и l; μ – коэффициент управления.</p>

Компоненты моделей электрических процессов

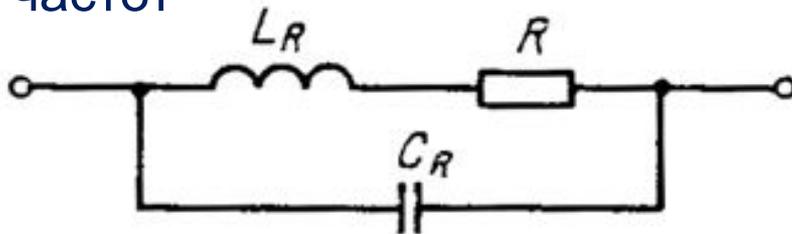
№ п/п	Название и обозначение ветви	Тип компонента и параметры ветви
8	<p>Источник напряжения,</p> 	<p>Активный потенциальный, u – напряжение ветви.</p>
9	<p>Источник напряжения, управляемый током ветви</p> 	<p>Активный потенциальный, i – ток в ветви R^{\exists} включенной между узлами k и l; μ – коэффициент управления.</p>
10	<p>Источник напряжения, управляемый напряжением ветви</p> 	<p>Активный потенциальный, u – напряжение в ветви R^{\exists} включенной между узлами k и l; μ – коэффициент управления.</p>

Топологические модели резисторов

Для области низких частот

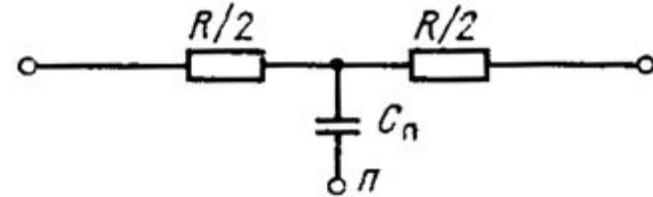
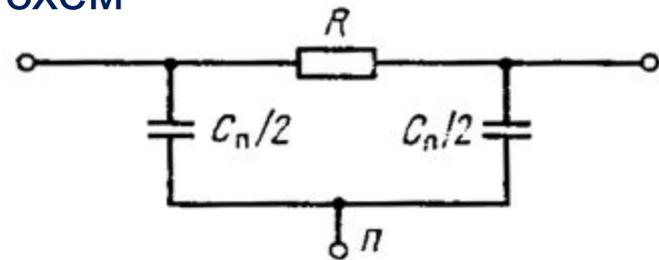


Для области высоких частот



R — сопротивление резистора;
 L_R — индуктивность выводов и проводящей части резисторов;
 C_R — ёмкость выводов и проводящей части резисторов

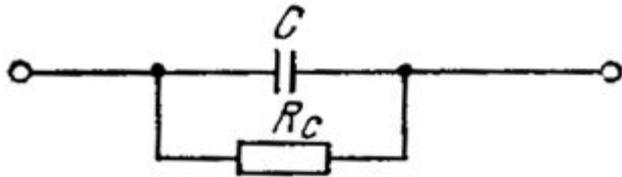
Для диффузионных резисторов интегральных схем



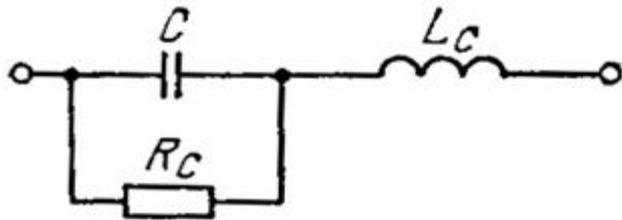
C_n — ёмкость проводящей части относительно подложки (включая ёмкость обратносмещённого паразитного p-n перехода)

Топологические модели конденсаторов

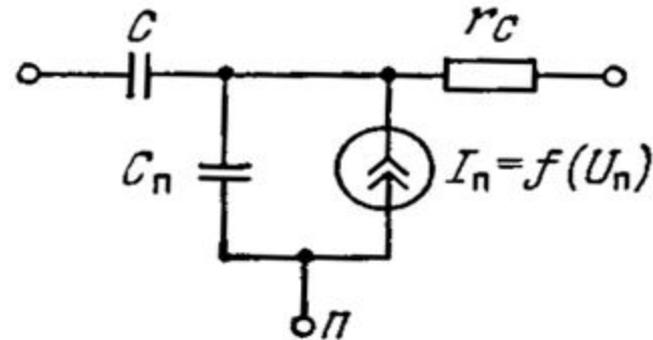
Для области низких



В широкополосной



Интегральный конденсатор, построенный на структуре металл-диэлектрик-полупроводник



R_c — сопротивление потерь в диэлектрике;

L_c — индуктивность выводов и обкладок конденсатора;

r_c — сопротивление последовательного слоя в структуре конденсатора;

$I_n = f(U_n)$ — зависимый источник, моделирующий статическую характеристику паразитного р-п перехода;

C_n — емкость р-п перехода;

Π — подложка

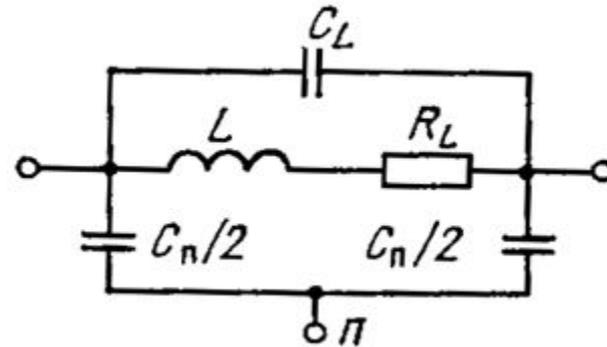
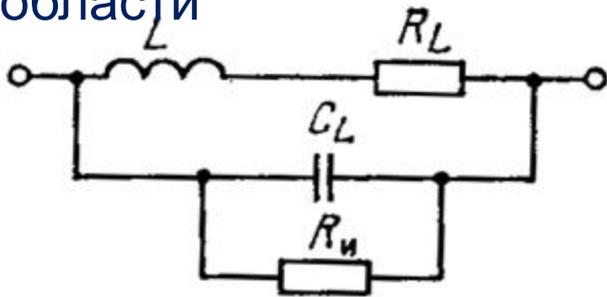
Топологические модели индуктивностей

Для области низких частот



Спиральная катушка индуктивности интегральных схем

В широкополосной области



R_L — сопротивление обмотки (спирали);

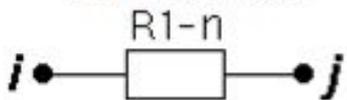
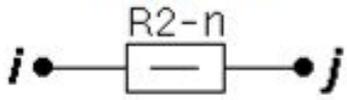
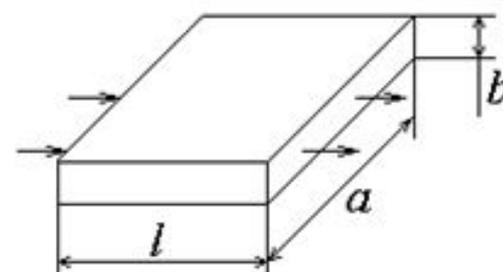
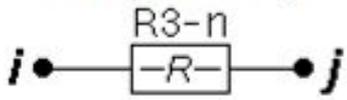
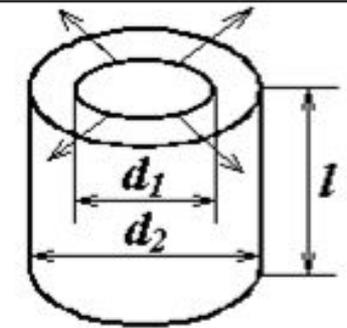
C_L — межвитковая емкость;

$R_{и}$ — сопротивление потерь межвитковой изоляции;

$C_{п}$ — емкость между спиралью и подложкой Π .

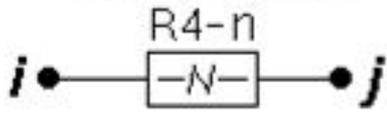
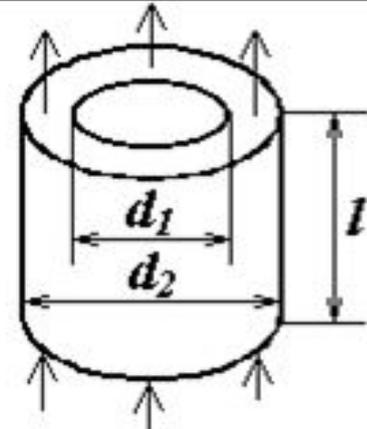
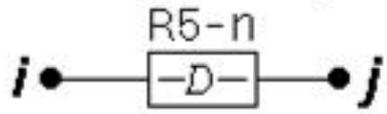
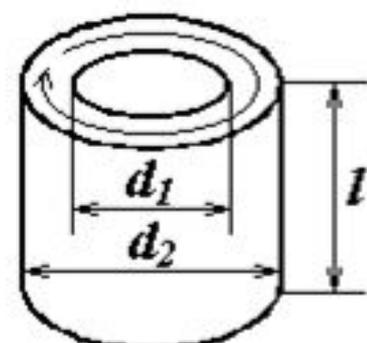
Компоненты моделей тепловых

процессов

№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ КОНДУКЦИЕЙ			
1	<p>Заданное тепловое сопротивление</p> 	R – заданное тепловое сопротивление.	Пример – заданное тепловое сопротивление «переход-корпус» у полупроводникового прибора.
2	<p>Вычисляемое тепловое сопротивление в декартовой системе координат</p> 	λ – коэффициент теплопроводности материала; a, b – геометрические размеры, площадь поперечного сечения тела, через которую проходит тепловой поток; l – длина тела в направлении прохождения теплового потока	
3	<p>Вычисляемое тепловое сопротивление в цилиндрической системе координат (радиальное направление)</p> 	λ – коэффициент теплопроводности материала; d_1 – внутренний диаметр цилиндра; d_2 – внешний диаметр цилиндра; l – высота цилиндра.	

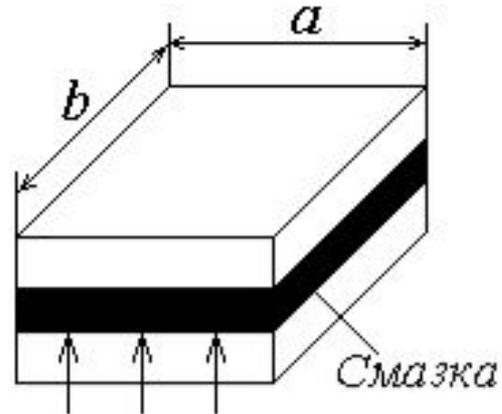
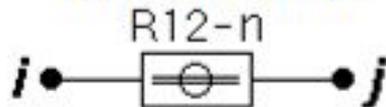
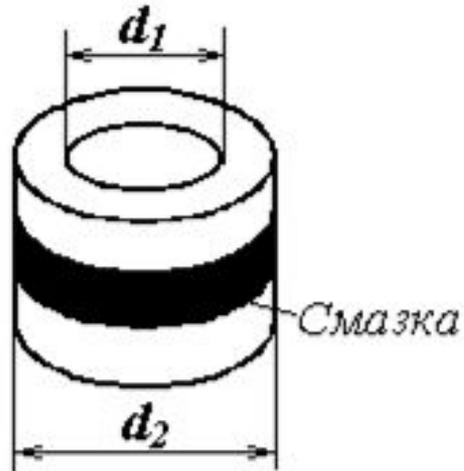
Компоненты моделей

тепловых процессов (продолжение)

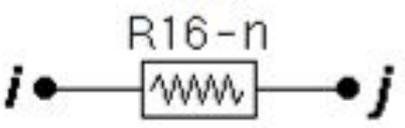
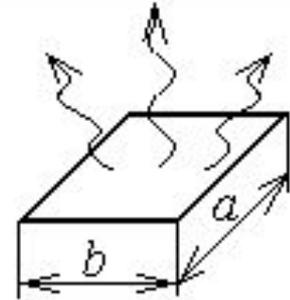
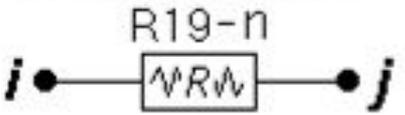
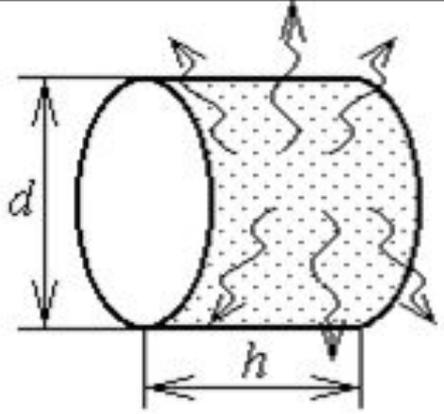
№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ КОНДУКЦИЕЙ			
4	<p>Вычисляемое тепловое сопротивление в цилиндрической системе координат (нормальное направление)</p> 	<p>λ – коэффициент теплопроводности материала; d_1 – внутренний диаметр цилиндра; d_2 – внешний диаметр цилиндра; l – <u>высота</u> цилиндра.</p>	
5	<p>Вычисляемое тепловое сопротивление в цилиндрической системе координат (рокадное направление)</p> 	<p>λ – коэффициент теплопроводности материала; d_1 – внутренний диаметр цилиндра; d_2 – внешний диаметр цилиндра; l – <u>высота</u> цилиндра.</p>	

Компоненты моделей

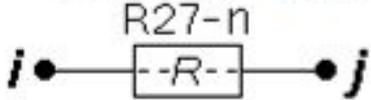
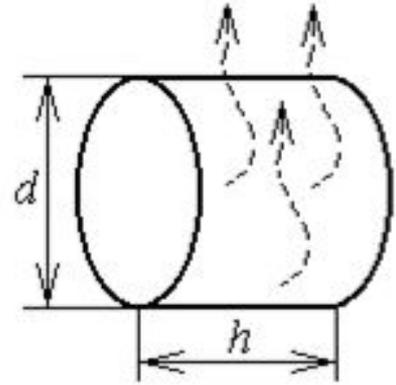
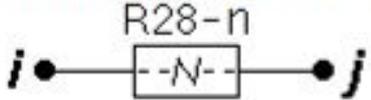
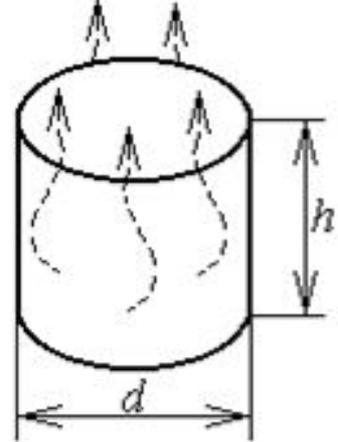
тепловых процессов (продолжение)

№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ КОНДУКЦИЕЙ			
7	<p>Контактный теплообмен (пятно контакта прямоугольной формы)</p> 	<p>k_c – коэффициент смазки; a, b – геометрические размеры площади пятна контакта.</p>	
8	<p>Контактный теплообмен (пятно контакта круглой формы)</p> 	<p>d_1 – внутренний диаметр цилиндра; d_2 – внешний диаметр цилиндра; k_c – коэффициент смазки</p>	

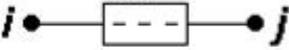
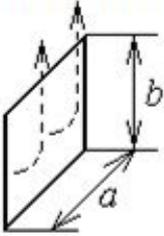
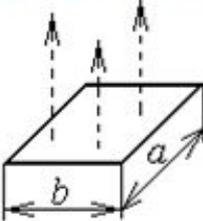
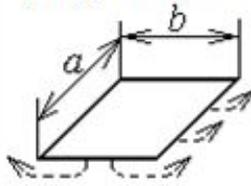
Компоненты моделей тепловых процессов (продолжение)

№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ			
9	<p>Тепловое излучение с неразвитой поверхности</p> <p style="text-align: center;">R16-n</p> 	<p>a, b – геометрические размеры поверхности;</p> <p>ε – приведенная степень черноты поверхностей тел;</p> <p>ξ – приведенный коэффициент облученности поверхностей тел</p>	
10	<p>Тепловое излучение с неразвитой цилиндрической поверхности</p> <p style="text-align: center;">R19-n</p> 	<p>d – диаметр цилиндра.</p> <p>h – высота цилиндра;</p> <p>ε – приведенная степень черноты поверхностей тел;</p> <p>ξ – приведенный коэффициент облученности поверхностей тел</p>	

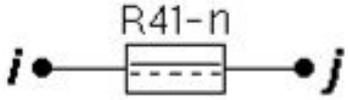
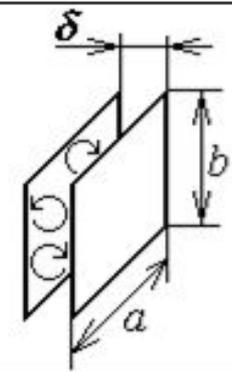
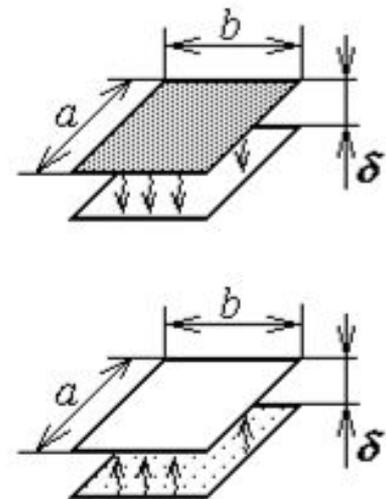
Компоненты моделей тепловых процессов (продолжение)

№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ТЕПЛООТДАЧУ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ			
11	<p>Естественная конвекция с горизонтальной цилиндрической поверхности в окружающую среду</p> <p style="text-align: center;">R27-n</p> 	<p>P_{oc} – давление окружающего воздуха;</p> <p>d – диаметр цилиндра;</p> <p>h – высота цилиндра.</p>	
12	<p>Естественная конвекция с вертикальной цилиндрической поверхности</p> <p style="text-align: center;">R28-n</p> 	<p>h, d, P_{oc}</p>	

Компоненты моделей тепловых процессов (продолжение)

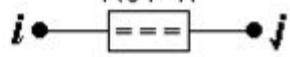
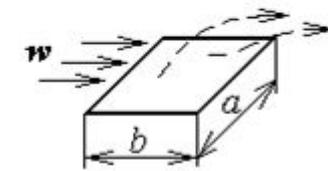
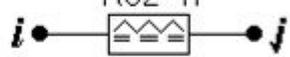
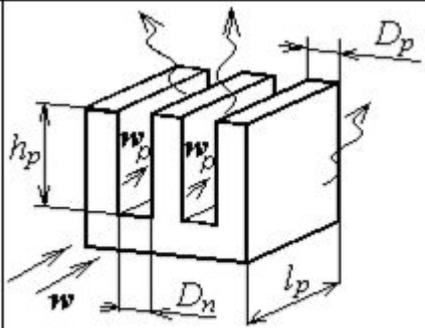
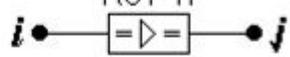
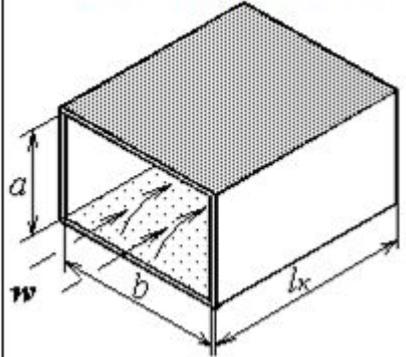
№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ТЕПЛОТДАЧУ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ			
13	<p>Естественная конвекция с плоской неразвитой поверхности в окружающую среду</p> <p style="text-align: center;">R26-n</p> 	<p>где a, b – геометрические размеры поверхности теплоотдачи; l_0 – определяющий размер.</p>	<p>Вертикальная поверхность:</p>  <p style="text-align: right;">$l_0 = b;$ $k_{ср} = 1.$</p> <p>Горизонтальные поверхности:</p> <p>$l_0 = \min(a, b);$</p> <p>а) нагретая зона сверху:</p>  <p style="text-align: right;">$k_{ср} = 1,3;$</p> <p>б) нагретая зона внизу:</p>  <p style="text-align: right;">$k_{ср} = 0,7.$</p>

Компоненты моделей тепловых процессов (продолжение)

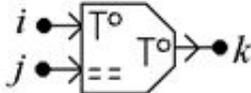
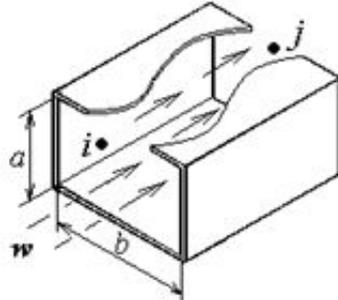
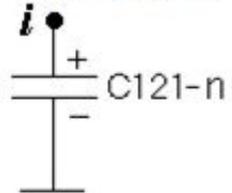
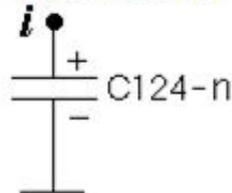
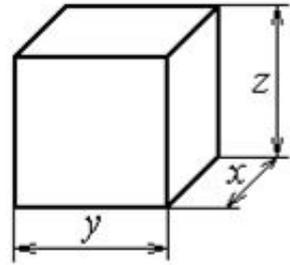
№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ТЕПЛООТДАЧУ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ			
14	<p>Кондуктивно-конвективный теплоперенос через плоские вертикальные воздушные прослойки</p> 	<p>a, b – линейные размеры поверхностей теплообмена; δ – расстояние между пластинами; P_{oc} – давление окружающей среды</p>	
15	<p>Естественная конвекция между двумя горизонтальными плоскими поверхностями</p> 	<p>a, b, δ, P_{oc}</p>	

Компоненты моделей тепловых процессов

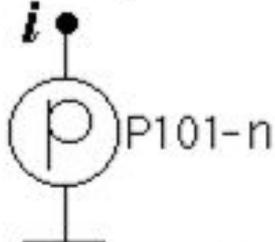
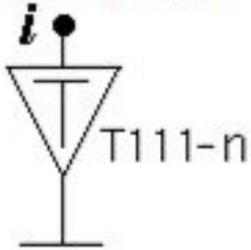
(продолжение)

№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ТЕПЛОТДАЧУ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ			
16	<p>Вынужденная конвекция с плоской неразвитой поверхностью в окружающую среду</p> <p>R51-n</p> 	<p>$l_0 = b$, (размер в направлении обдува)</p> <p>a, b – линейные размеры;</p> <p>w – линейные размеры;</p> <p>P_{oc}</p>	
17	<p>Обдув развитой поверхности с пластинчатым оребрением</p> <p>R52-n</p> 	<p>$l_0 = l_p$.</p> <p>$w, P_{oc}, \lambda, h_p, l_p, D_p, D_n$ – первичные параметры ветви.</p>	
18	<p>Вынужденная конвекция в продуваемом воздушном канале</p> <p>R61-n</p> 	<p>a, b, l_x, w, P_{oc} – первичные параметры ветви.</p>	<p>Тепловыделяющими являются только верхняя и нижняя стенки канала.</p> 

Компоненты моделей тепловых процессов (продолжение)

№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВЬ, МОДЕЛИРУЮЩАЯ ТЕПЛОПЕРЕНОС			
19	<p>Теплоперенос в продуваемом воздушном канале</p> <p>R71A-n</p> 	<p>a, b – размеры поперечного сечения канала;</p> <p>w – скорость потока теплоносителя на входе в канал</p>	
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ТЕПЛОВЫЕ ЕМКОСТИ			
20	<p>Постоянная теплоемкость</p> 	<p>m – масса;</p> <p>C_0 – удельная теплоемкость.</p>	
21	<p>Вычисляемая теплоемкость</p> 	<p>ρ – плотность материала;</p> <p>x, y, z – размеры тела;</p> <p>C_0 – удельная теплоемкость.</p>	

Компоненты моделей тепловых процессов (продолжение)

№ п/п	Название и обозначение ветви	Параметры ветви	Пример
ВЕТВИ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ			
22	<p>Источник постоянной мощности</p> 	p – мощность тепловыделения.	
23	<p>Источник постоянной температуры</p> 	t – температура.	

Модели резистора, конденсатора,

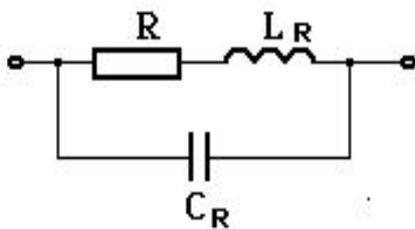
ИНДУКТИВНОСТИ

Аналитическими моделями идеальных резистора, конденсатора и катушки индуктивности являются уравнения:

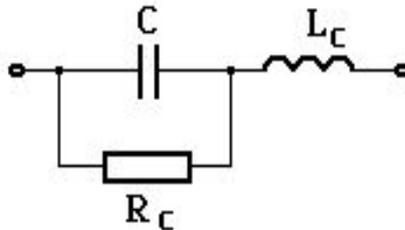
$$U = RI, I = C \frac{dU}{dt}, U = L \frac{dI}{dt}, \text{ где}$$

- U - напряжение на элементе;
- I - ток через элемент;
- R - сопротивление резистора;
- C - емкость конденсатора;
- L - индуктивность катушки

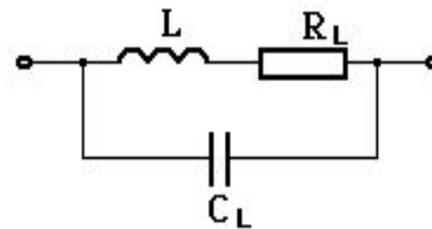
Топологические модели радиоэлементов



Резистор



Конденсатор



Катушка индуктивности

Модели зависимых источников

Четыре типа зависимых источников:

- источник тока, управляемый напряжением,
- источник напряжения, управляемый напряжением,
- источник тока, управляемый током,
- источник напряжения, управляемый током.

$$I_S = gU , \quad U_S = eU , \quad I_S = fI , \quad U_S = hI$$

U_S – напряжение источника,

I_S – ток источника,

U, I – управляющее напряжение и ток,

g, e, f, h – соответствующие коэффициенты

Модель полупроводникового диода

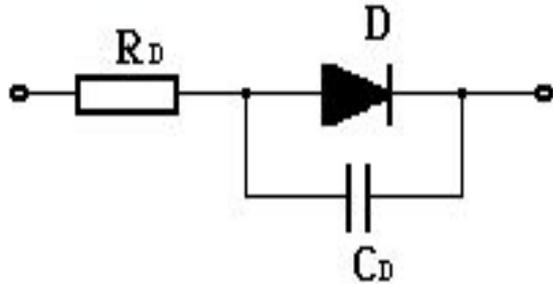


Рис. 1. Модель диода

Диода

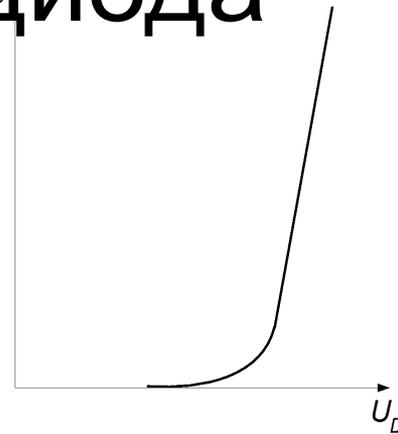


Рис. 2. ВАХ диода

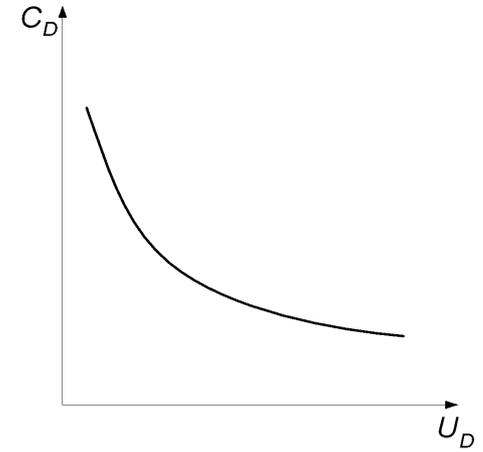


Рис. 3. ВФХ диода

Обозначение	Наименование параметра
I_s	Ток насыщения
mV_t	Температурный потенциал
R_D	Сопротивление диода
C_0	Емкость при нулевом смещении
n	Показатель степени
τ	Постоянная времени
ψ	Контактная разность потенциалов
U_c	Напряжение стабилизации

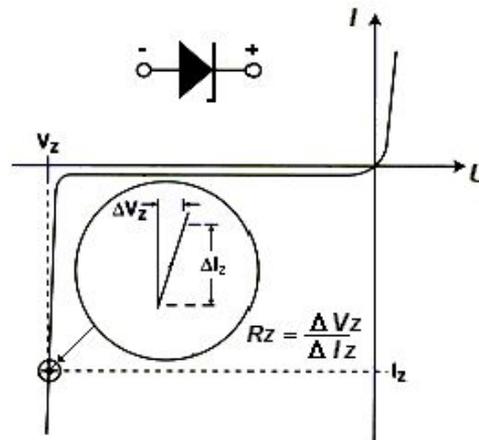


Рис. 4. Обратная ВАХ диода

$$C_D = \frac{\tau}{mV_t} I_f + C_0 \left[\frac{\Psi}{\Psi - U_D} \right]^n$$

$$I_f = I_s \left(e^{\frac{U_D}{mV_t}} - 1 \right)$$

$$R_S = R_Z - \frac{V_t}{I_Z}$$

$$I_{BV} = \frac{I_Z}{e^{\frac{I_Z(R_Z - R_S)}{V_t}}}$$



Модель диода описывает работу диода во всех режимах

Модель биполярного транзистора

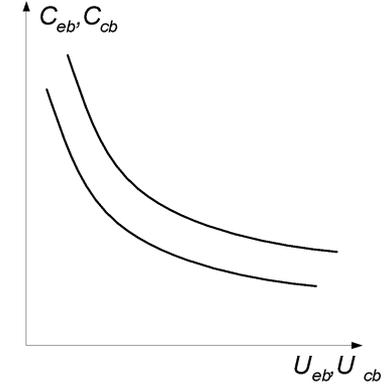
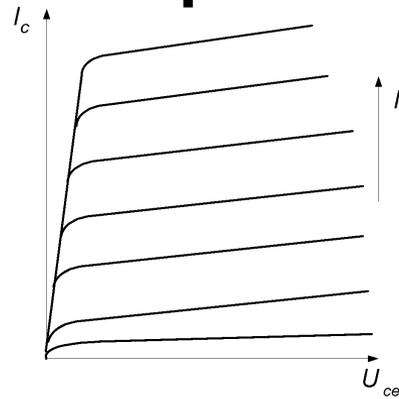
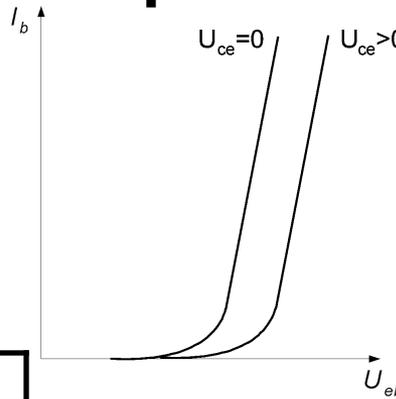
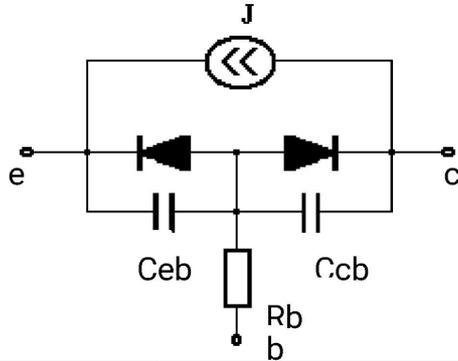


Рис. 1. Входные ВАХ

Рис. 2. Выходные ВАХ

Рис. 3. ВФХ рп-переходов

Обозн.	Наименование параметра
I_{se}, I_{sk}	Токи насыщения эмиттера и коллектора
mV_{te}, mV_{tc}	Температурные потенциалы эмиттера и коллектора
β_N, β_I	Коэффициенты усиления по току при прямом и инверсном включении в схеме с ОЭ
ψ	Контактная разность потенциалов
V_N, V_I	Коэффициенты усиления по напряжению при прямом и инверсном включении в схеме с ОЭ
τ_N, τ_I	Постоянные времени при прямом и инверсном включении
C_{0e}, C_{0c}	Барьерные емкости эмиттера и коллектора при нулевом смещении
n_e, n_c	Показатели степени в уравнениях барьерных емкостей

$$I_N = I_{se} \left(e^{\frac{U_{eb}}{mV_{te}}} - 1 \right), \quad C_{eb} = \frac{\tau_e}{mV_{te}} I_N + C_{0e} \left[\frac{\Psi}{\Psi - U_{eb}} \right]^{n_e},$$

$$I_I = I_{sk} \left(e^{\frac{U_{cb}}{mV_{tc}}} - 1 \right), \quad C_{cb} = \frac{\tau_c}{mV_{tc}} I_I + C_{0c} \left[\frac{\Psi}{\Psi - U_{cb}} \right]^{n_c}.$$

$$J = B_N I_N + B_I I_I$$

$$B_N = \beta_N + \frac{U_{cb}}{V_N}, \quad B_I = \beta_I + \frac{U_{eb}}{V_I}$$



Модель описывает работу транзистора во всех режимах исключая пробой

Модель полевого транзистора

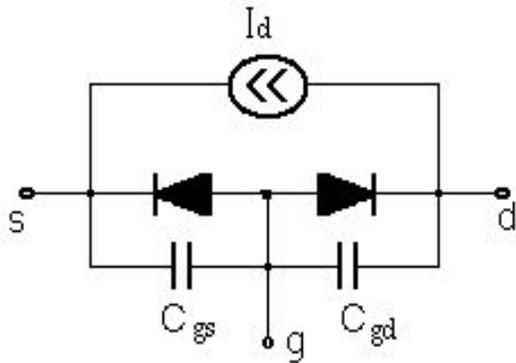


Рис. 1. Модель полевого транзистора

$$I_D = \begin{cases} 0, & \Rightarrow U_{gs} - V_{t0} < 0 \\ \beta(1 + \lambda U_{ds})(U_{gs} - V_{t0})^2, & \Rightarrow 0 < U_{gs} - V_{t0} < U_{ds} \\ \beta(1 + \lambda U_{ds})U_{ds} [2(U_{gs} - V_{t0}) - U_{ds}], & \Rightarrow U_{gs} - V_{t0} > U_{ds} \end{cases}$$

$$C_{gs} = C_{0s} \left[1 + \frac{U_{gs}}{\Psi} \right]^{-m_s}, \quad C_{gd} = C_{0d} \left[1 + \frac{U_{gd}}{\Psi} \right]^{-m_d},$$

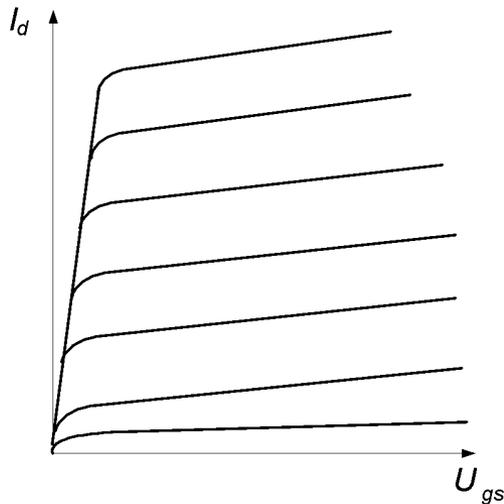


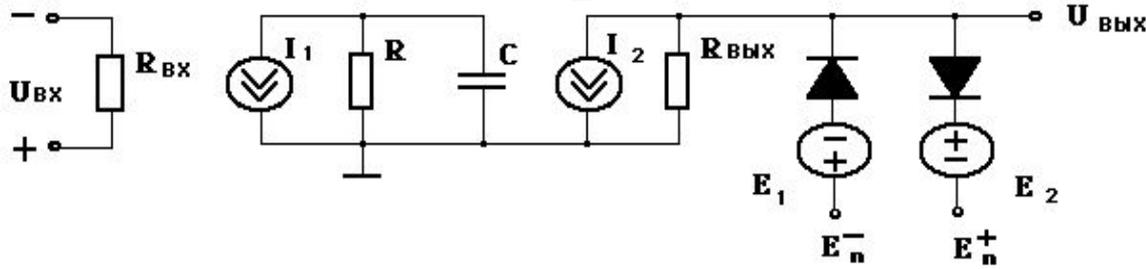
Рис. 2. Выходные ВАХ

Обозначение	Наименование параметра
I_s	Ток насыщения рп-перехода
mV_t	Температурный потенциал рп-перехода
β	Коэффициент пропорциональности
λ	Коэффициент модуляции длины канала
ψ	Контактная разность потенциалов
C_{gs}, C_{gd}	Барьерные емкости эмиттера и коллектора при нулевом смещении
m_s, m_d	Показатели степени в уравнениях барьерных емкостей



Модель описывает работу транзистора во всех режимах исключая пробой

Макромодель операционного усилителя



$$I_1 = K_1 U_{ВХ}, \quad I_2 = K_2 U_{R_{ВХ}}$$

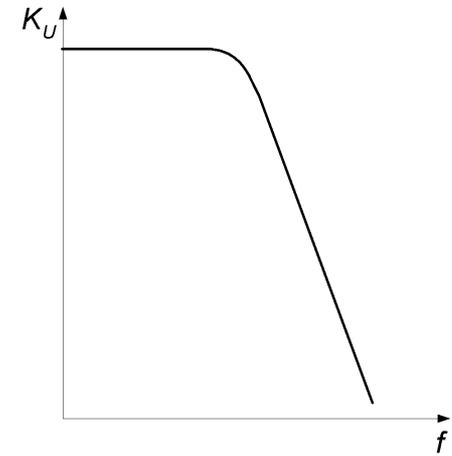


Рис. 1. Частотная характеристика

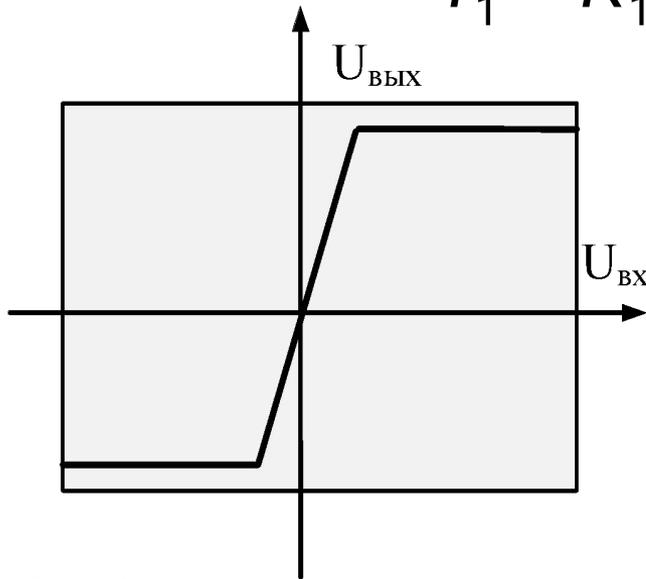


Рис. 2. Характеристика вход-выход

$$U_{ВЫХ}(p) = \left[\frac{K_0}{1 + p\tau} \right] U_{ВХ}(p)$$

Обозначение	Наименование параметра
K_0	Коэффициент усиления без ОС
$f_{гр}$	Граничная частота сигнала (частота единичного усиления)
$R_{вх}$	Входное сопротивление
$R_{вых}$	Выходное сопротивление



Область определения модели выделена серым прямоугольником

Моделирование тепловых процессов в конструкциях РЭС

- Задачей моделирования тепловых процессов является определение температур элементов конструкции, поскольку именно она является одной из основных характеристик состояния вещества, и, именно, от нее зависят его механические и электрические свойства.
- Уменьшение размеров и веса аппаратуры, применение интегральных микросхем, жесткие условия эксплуатации, часто при повышенной температуре окружающей среды - осложняет задачу обеспечения правильного теплового режима.

При изменении температуры всего на несколько десятков градусов электропроводность кремния, основного вещества из которого изготавливают полупроводниковые элементы, изменяется в сотни раз.

Особенности конструкции с точки зрения тепловых

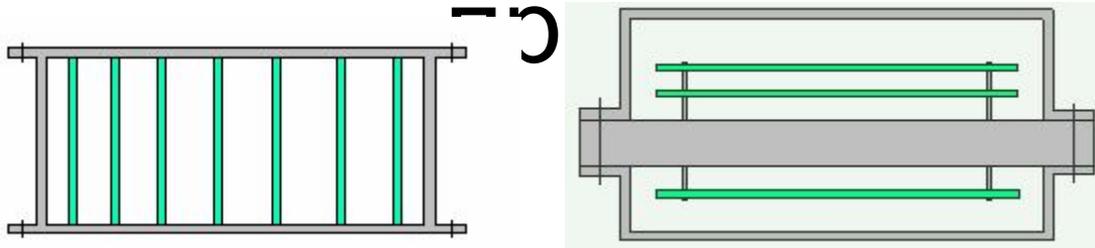


Рис. 1. Пример кассетной конструкции

Рис. 2. Пример этажерочной конструкции

- При конструировании РЭС в зависимости от сложности и степени интеграции применяются конструкции кассетного и этажерочного типа.
- Основными конструктивным и, как правило, функциональным узлом таких конструкций являются печатные узлы (ПУ), представляющие собой однослойные или многослойные печатные платы (ПП) с расположенными на них микросборками и дискретными электрорадиоэлементами (ЭРЭ).
- При наличии мощных полупроводниковых приборов применяется их установка на корпус блока, который в этом случае выполняется оребренным.
- Корпуса и несущие конструкции блоков изготавливаются из алюминиевых и магниевых сплавов, обладающих хорошими теплопроводящими свойствами и сравнительно небольшим удельным весом.

Топологические модели тепловых процессов

Топологической моделью тепловых процессов называется, представленная в виде ненаправленного графа, схема путей распространения тепловых потоков в конструкции.

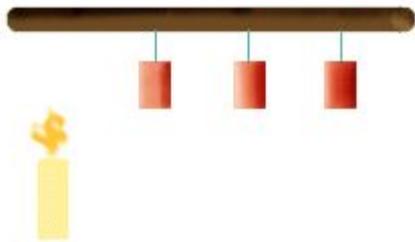
Построение модели тепловых процессов сводится к выполнению следующих этапов:

1. Качественный анализ тепловых процессов в конструкции, на основе которого определяются элементарные виды теплообмена, которые необходимо учитывать при построении модели.
2. Идеализация конструкции, позволяющая существенно упростить задачу построения модели за счет принятия определенных допущений.
3. Составление модели тепловых процессов конструкции, заключающееся в построении топологической модели с учетом проведенного анализа и идеализации.

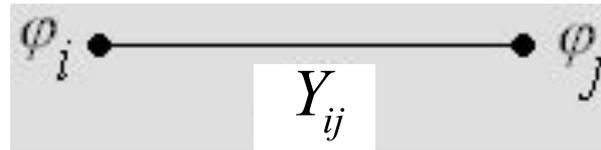
Теплопроводность.

Кондукция

Теплопроводностью называется передача кинетической энергии хаотического движения молекул от нагретого участка тела к холодному.

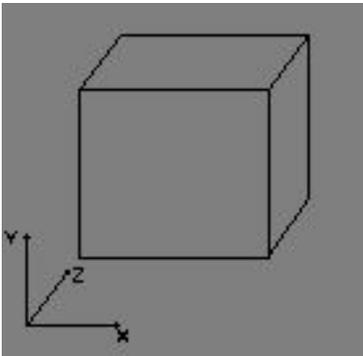


Кондуктивный теплообмен - распространение тепла в твердом теле



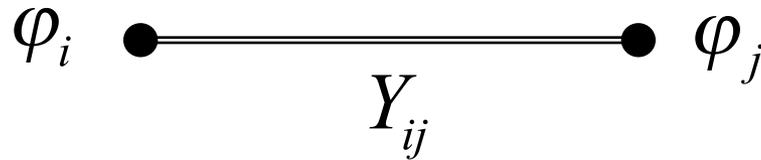
$$Y_{ij}^x = \frac{\lambda_x S_{yz}}{l_x}, Y_{ij}^y = \frac{\lambda_y S_{xz}}{l_y}, Y_{ij}^z = \frac{\lambda_z S_{xy}}{l_z},$$

λ – коэффициент теплопроводности,
Площадь поперечного сечения ,
Длина .



Теплопроводность. Контакт

Контактный теплообмен - передача тепла от одного тела другому при их непосредственном контакте.



$$Y_{ij} = 143R^2;$$

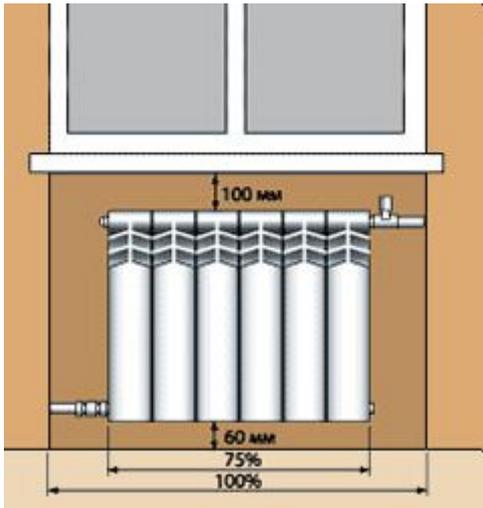
$$Y_{ij} = 45.5ab.$$

Радиус контакта ,

линейные размеры контакта .

КОНВЕКЦИЯ

- Конвекцией называется передача тепла движущейся жидкостью или газом.



$$\varphi_i \bullet \text{---} \bullet \varphi_j$$

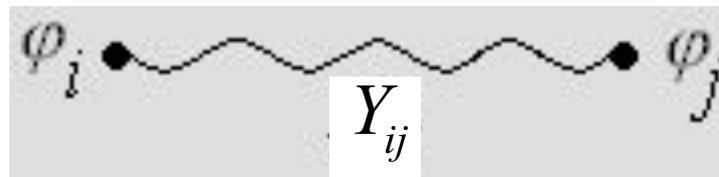
Y_{ij}

$$Y_{ij} = \alpha_k S$$

α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи;
Площадь поверхности .

Излучение

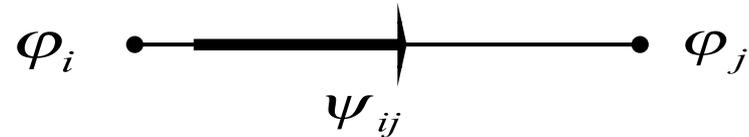
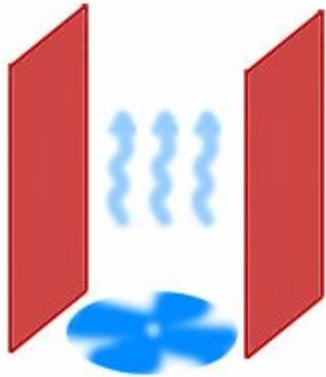
Излучением называется передача тепла при испускании и поглощении электромагнитных



$$Y_{ij} = \alpha_L S$$

α_L – коэффициент лучистой теплоотдачи;
Площадь поверхности .

Перенос тепла воздухом в плоском воздушном канале



$$\psi_{ij} = C_p G_m (\varphi_i - \varphi_j)$$

C_p – удельная теплоемкость воздуха,
 G_m – массовый расход воздуха.

Пример построения тепловой модели

Металлическая пластина малой толщины с пленочным нагревателем на одной из сторон расположена в воздухе с температурой t .

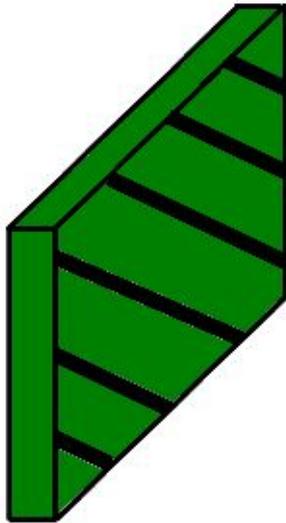


Рис. 1. Металлическая пластина

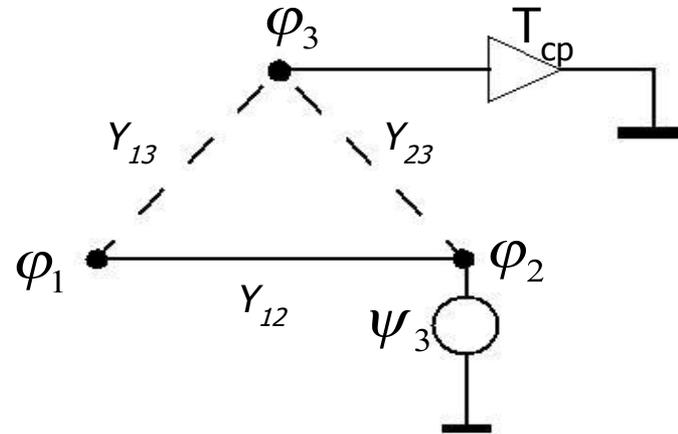


Рис. 2. Модель тепловых процессов

Идеализация конструкции:

1. Пренебрегаем теплоотдачей с торцов пластины, т.к. площадь торцевых поверхностей пластины значительно меньше площади ее боковых поверхностей.
2. Считаем левую (1) и правую (2) поверхности пластины изотермичными.
3. Пренебрегаем тепловым излучением с пластины в окружающую среду.

С учетом принятых допущений модель теплового процесса имеет вид, представленный на рис. 2.

Пример построения тепловой модели

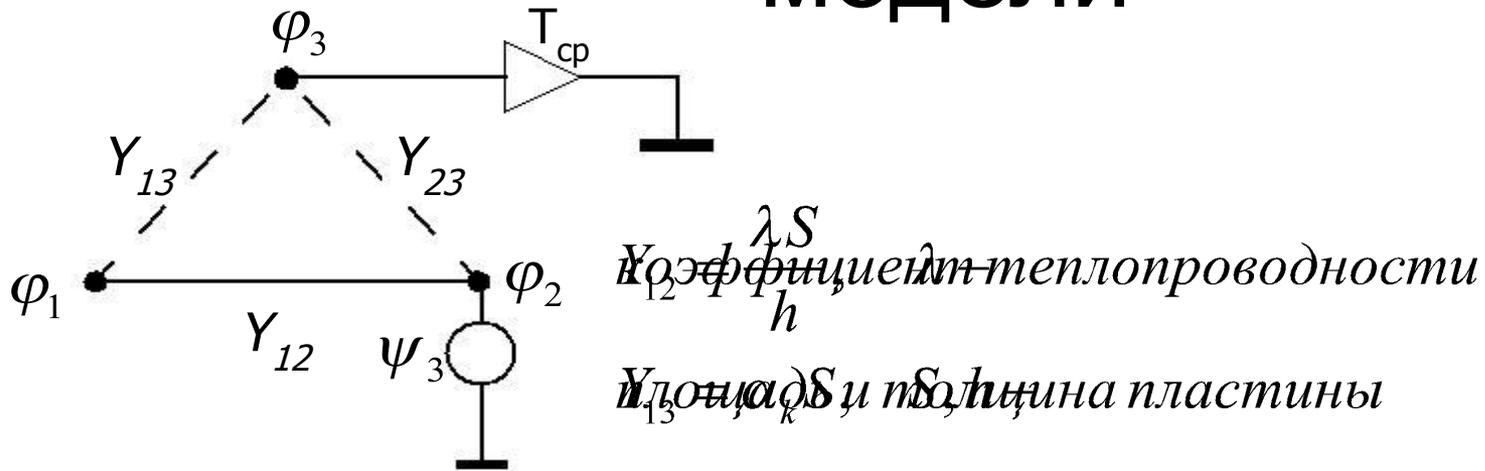


Рис. 1. Модель тепловых процессов

$$\begin{cases} (Y_{12} + Y_{13})\varphi_1 - Y_{12}\varphi_2 - Y_{13}\varphi_3 = 0 \\ -Y_{12}\varphi_1 - (Y_{12} + Y_{23})\varphi_2 - Y_{23}\varphi_3 = \psi_2 \\ -Y_{13}\varphi_1 - Y_{23}\varphi_2 - (Y_{13} + Y_{23})\varphi_3 = \psi_3 \end{cases}$$

Тепловая модель элементарного объема

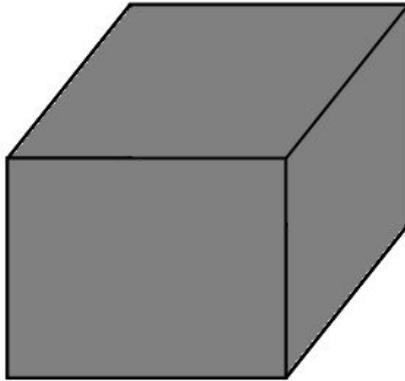


Рис. 1. Эскиз конструкции

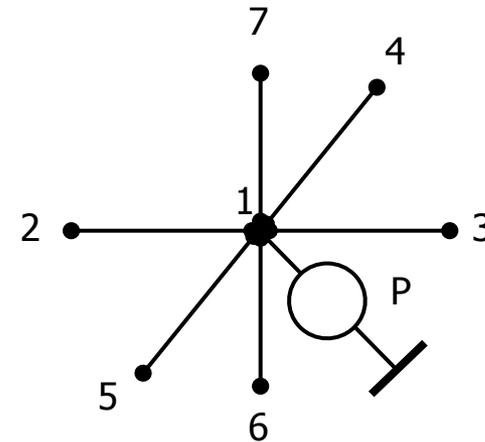


Рис. 2. Модель элементарного объема

- Объем твердотельный, например, монолитный (залитый) блок;
- Мощность P выделяется в центре элементарного объема (узел 1);
- Каждая грань объема (узлы 2...7) изотермична.

Тепловая модель ЭРЭ на печатной плате

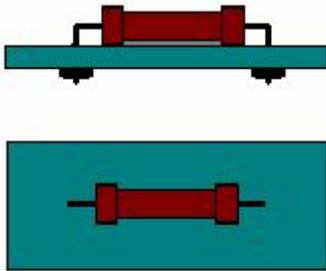


Рис. 1. Эскиз крепления резистора

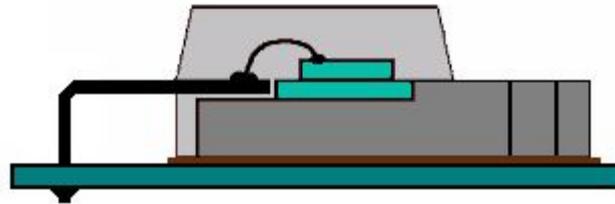


Рис. 2. Эскиз транзистора

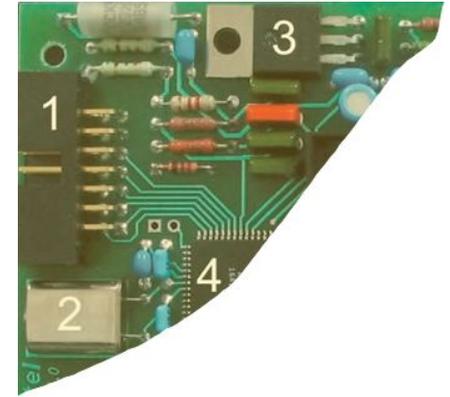


Рис. 3. Фрагмент печатного узла

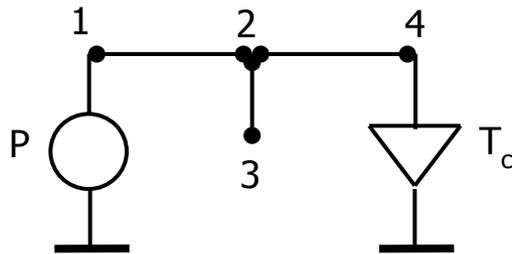


Рис. 4. Модель ЭРЭ на печатной плате



Корпус ЭРЭ изотермичен.

1. Активная зона;
2. Поверхность корпуса;
3. Поверхность платы;
4. Окружающая среда.

Тепловая модель транзистора на одностороннем радиаторе

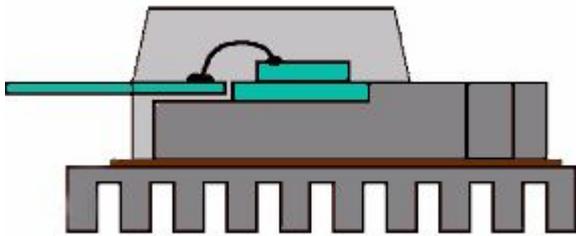


Рис. 1. Эскиз конструкции



Рис. 2. Ребристый радиатор

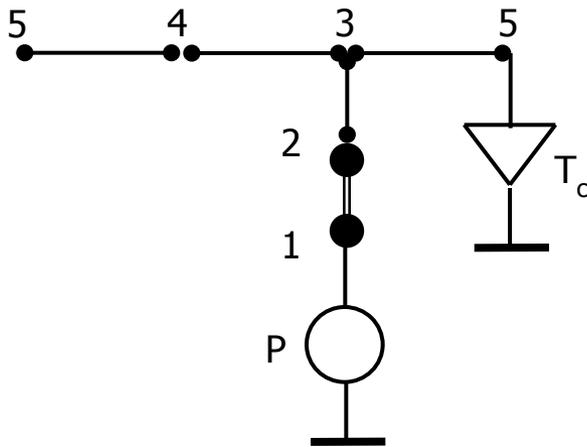


Рис. 3. Модель транзистора на радиаторе



Теплоотдача с торцев основания радиатора не учитывается.

1. pn – переход транзистора;
2. Корпус транзистора;
3. Верхняя поверхность радиатора;
4. Нижняя поверхность радиатора;
5. Окружающая среда.

Тепловая модель микросборки на печатной плате

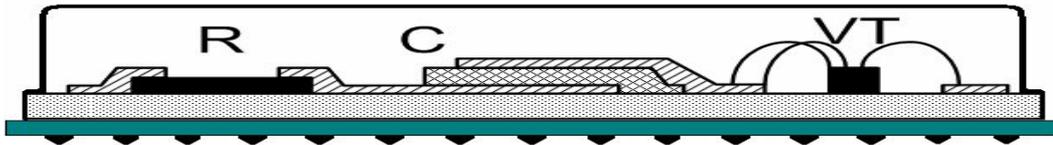


Рис. 1. Эскиз конструкции микросборки

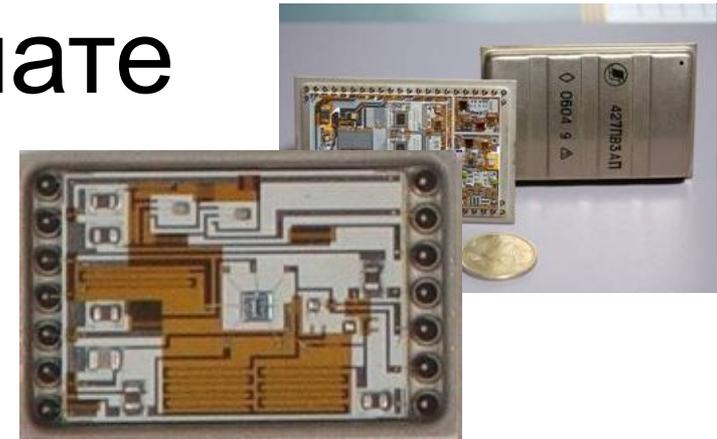
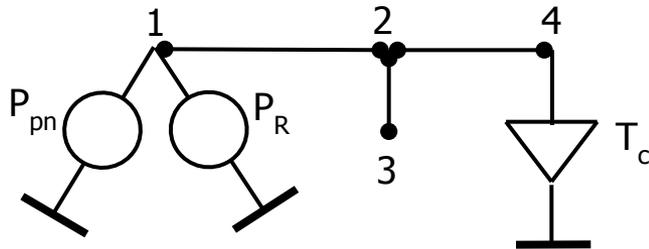


Рис. 2. Конструкция микросборки

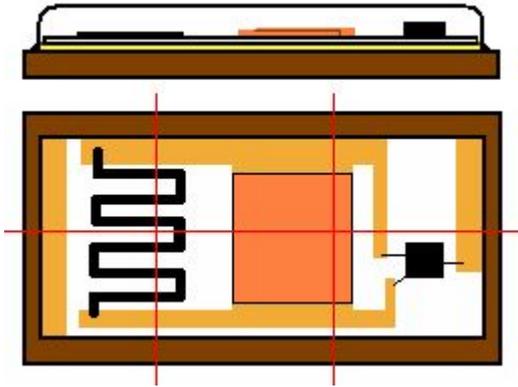


Поверхность корпуса изотермична;
Поверхность основания изотермична.

Рис. 3. Модель микросборки на печатной плате

1. Поверхность подложки.
2. Поверхность корпуса.
3. Поверхность печатной платы.
4. Окружающая среда.

Моделирование тепловых процессов в микросборке



- 1 - 8 - зоны на подложке;
- 9 - транзистор VT;
- 10 - основание микросборки

Рис. 1. Эскиз конструкции микросборки

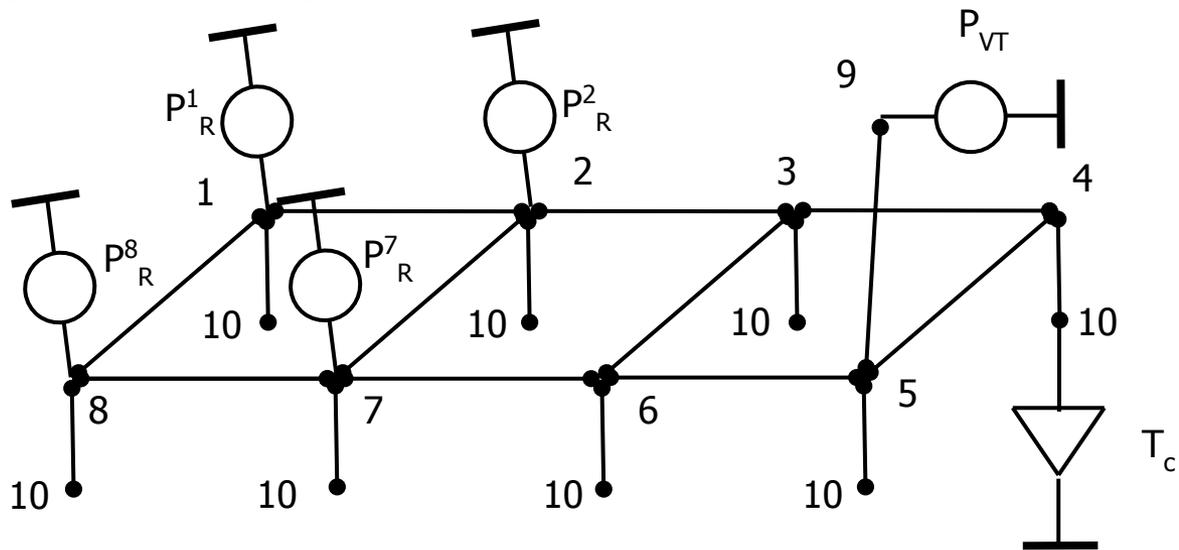


Рис. 2. Модель тепловых процессов в ПУ

Моделирование тепловых процессов в печатном узле

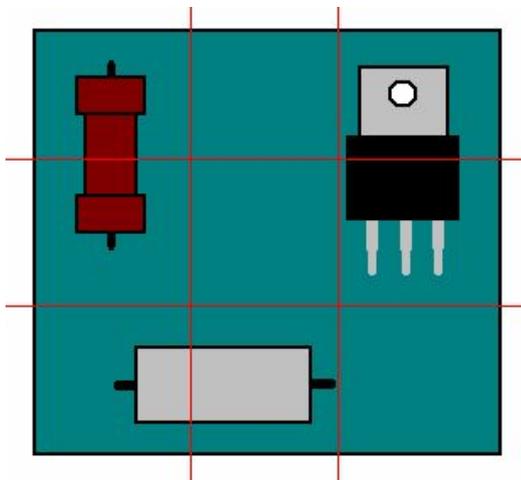


Рис. 1. Эскиз печатного узла

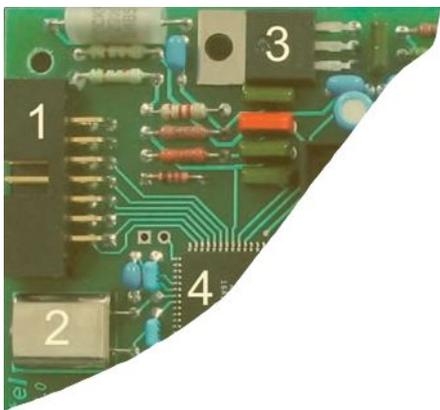


Рис. 2. Фрагмент печатного узла

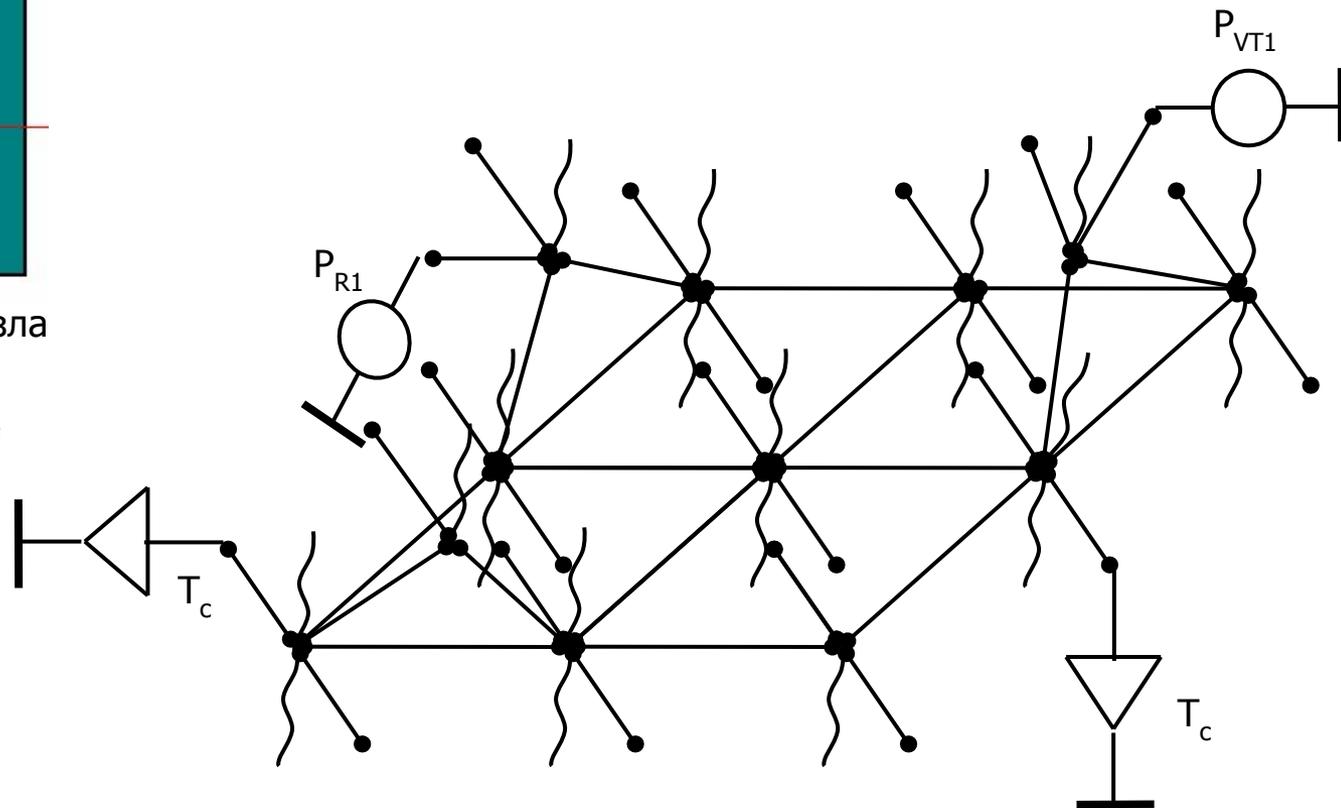


Рис. 3. Модель тепловых процессов в ПУ

Пример расчета тепловых процессов

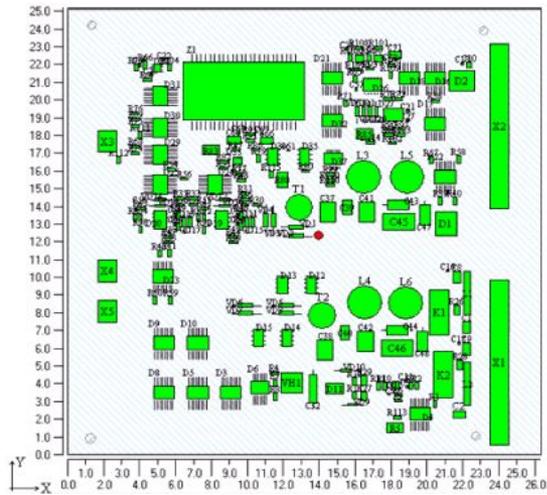


Рис. 1. Эскиз печатного узла

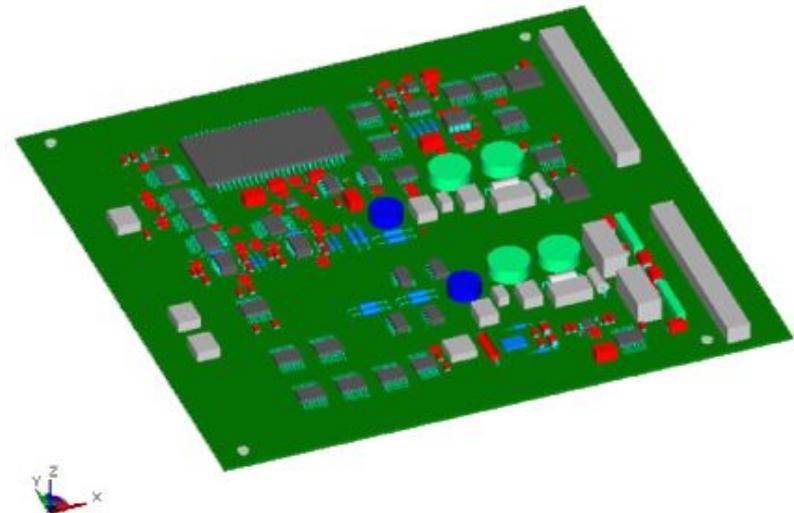


Рис. 2. 3D модель печатного узла

№ п/п	Обозначение ЭРИ	Ступень	Температура ЭРИ		Коэффициент тепловой нагрузки, [отн. ед.]	Перегрев, [°C]
			Расчетная, [°C]	Максимальная допустимая по ТУ, [°C]		
1	C1	1	105.046	100.000	1.050	5.046
2	C10	1	104.714	100.000	1.047	4.714
3	C11	1	105.581	100.000	1.056	5.581
4	C16	1	104.855	100.000	1.049	4.855
5	C17	1	105.048	100.000	1.050	5.048
6	C18	1	104.718	100.000	1.047	4.718
7	C2	1	105.114	100.000	1.051	5.114
8	C21	1	105.104	100.000	1.051	5.104
9	C22	1	105.280	100.000	1.053	5.280
10	C24	1	105.270	100.000	1.053	5.270

Рис. 3. Карта тепловых режимов ЭРИ

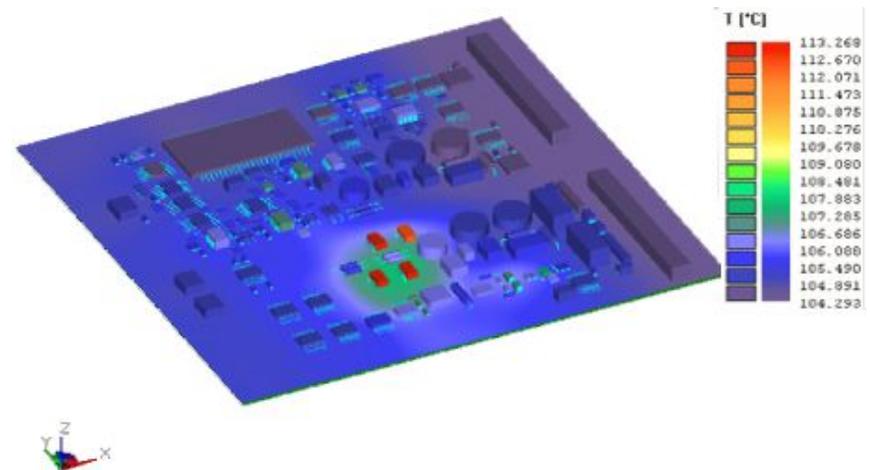


Рис. 4. Температурное поле печатного узла

Пример моделирования тепловых процессов системы радиатор-транзистор

Температура окружающей среды - 75°C . Тепловая мощность кристалла транзистора - 3 Вт. Коэффициент конвективной теплоотдачи среды - $5\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{C}$. Коэффициенты теплопроводности: кристалла - $83\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{C}$; подложки транзистора - $330\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{C}$; корпуса транзистора - $0,25\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{C}$; медного радиатора - $330\text{Вт}/\text{м}^{\circ}\text{C}$. Толщина стенок радиатора - 0,8 мм.

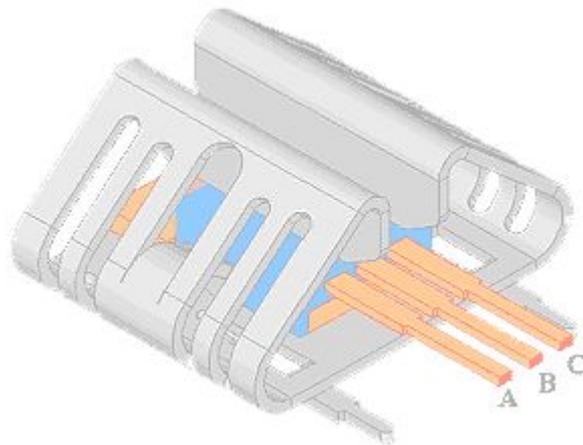


Рис. 1. Эскиз конструкции

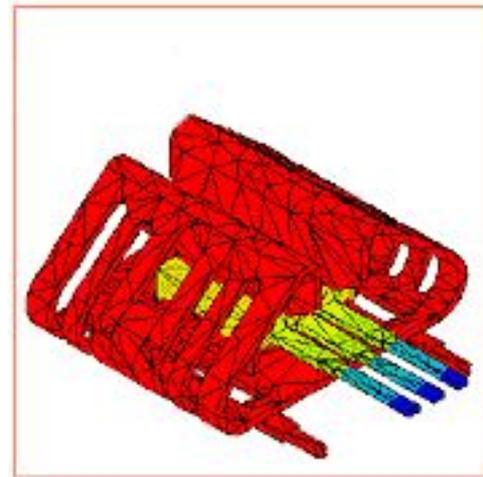


Рис. 2. Результаты моделирования