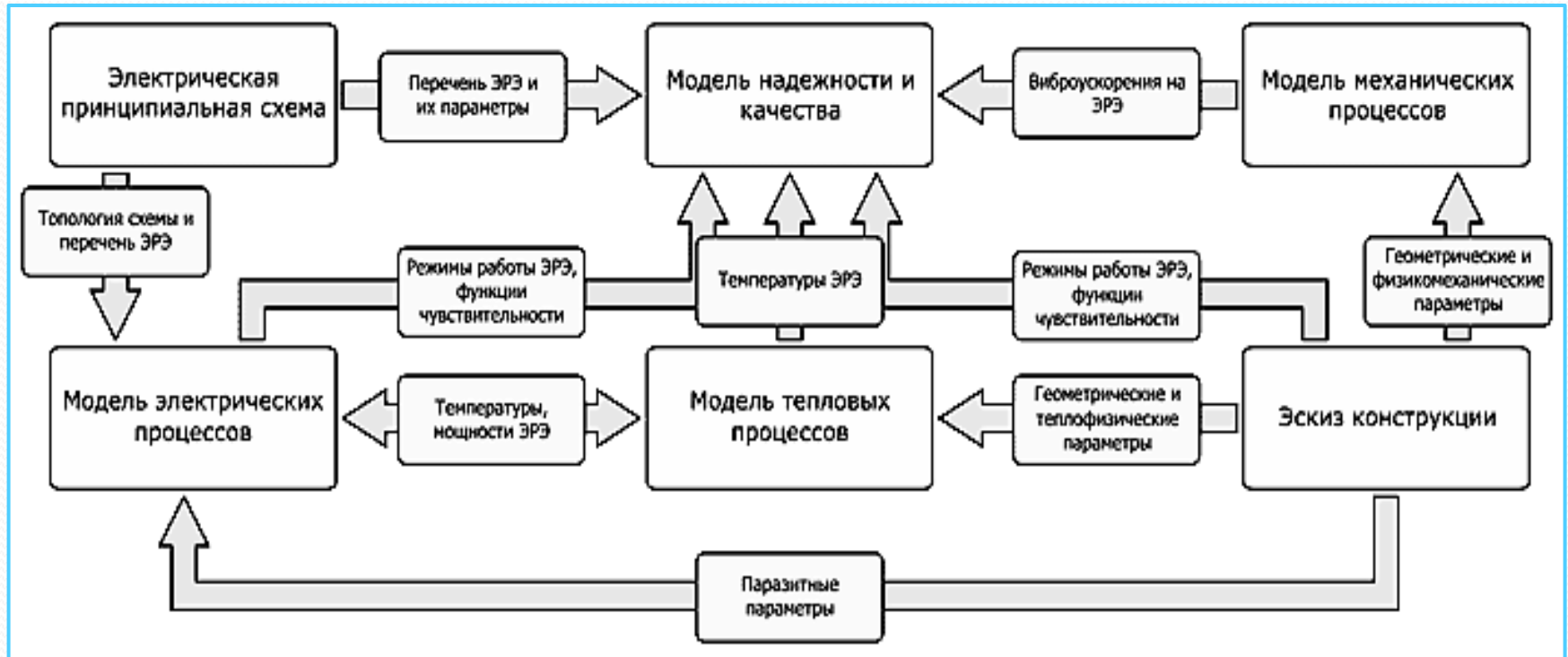




# Моделирование радиоэлектронных систем



# Схема процесса моделирования РЭУ



**Блоками** выделена исходная информация для построения моделей физических процессов в виде электрической схемы и эскиза конструкции и сами модели. **Стрелками** показано взаимодействие между моделями. **Надписи** на стрелках показывают информацию, которая получается в результате расчета по одной модели и требуется для построения другой.



## Модель электрических процессов:

- отражает электрические процессы, протекающие в схеме аппаратуры, что должно обеспечить получение с заданной точностью функциональных и режимных электрических характеристик;
- включает в себя эквивалентные схемы радиоэлементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, диодов, транзисторов, микросхем и пр.);
- учитывает паразитные проводимости, емкости, индуктивности, взаимные индуктивности и другие параметры, отражающие влияние конструкции на протекающие электрические процессы.



## Модель тепловых процессов:

- отражает тепловые процессы в конструкции, связанные с теплообменом под влиянием окружающей среды, тепловыделениями в радиоэлементах, действием систем охлаждения и термостатирования, что должно обеспечить получение с заданной точностью тепловых характеристик;
- учитывает кондуктивные, конвективные и лучистые составляющие теплообмена в аппаратуре;
- учитывает распределенность массы элементов конструкции и анизотропность тепловых свойств электрорадиоэлементов.



## Модель механических процессов:

- отражает механические процессы в конструкции, связанные с появлением механических деформаций и напряжений при механических воздействиях, что должно обеспечить получение с заданной точностью статических, частотных и временных механических характеристик;
- учитывает распределенность массы несущих конструкций и анизотропность механических свойств ЭРЭ;
- учитывает эффект внутреннего трения в материалах конструкции при деформациях;
- учитывает жесткость крепления ЭРЭ к печатным платам, шасси и другим несущим конструкциям, а также крепления элементов конструкции друг с другом.



## Модель надежности и качества:

- отражает, с заданной точностью, характеристики надежности и качества аппаратуры, связанные с технологическими факторами, тепловыми и механическими воздействиями, процессами старения;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы ЭРЭ;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы элементов конструкции;
- учитывает разбросы параметров ЭРЭ и элементов конструкции.



## Схема алгоритма методики моделирования радиоэлектронных устройств

Порядок при проведении моделирования физических процессов, протекающих в аппаратуре определяется:

- логикой проектирования аппаратуры,
- взаимосвязью моделей физических процессов между собой.

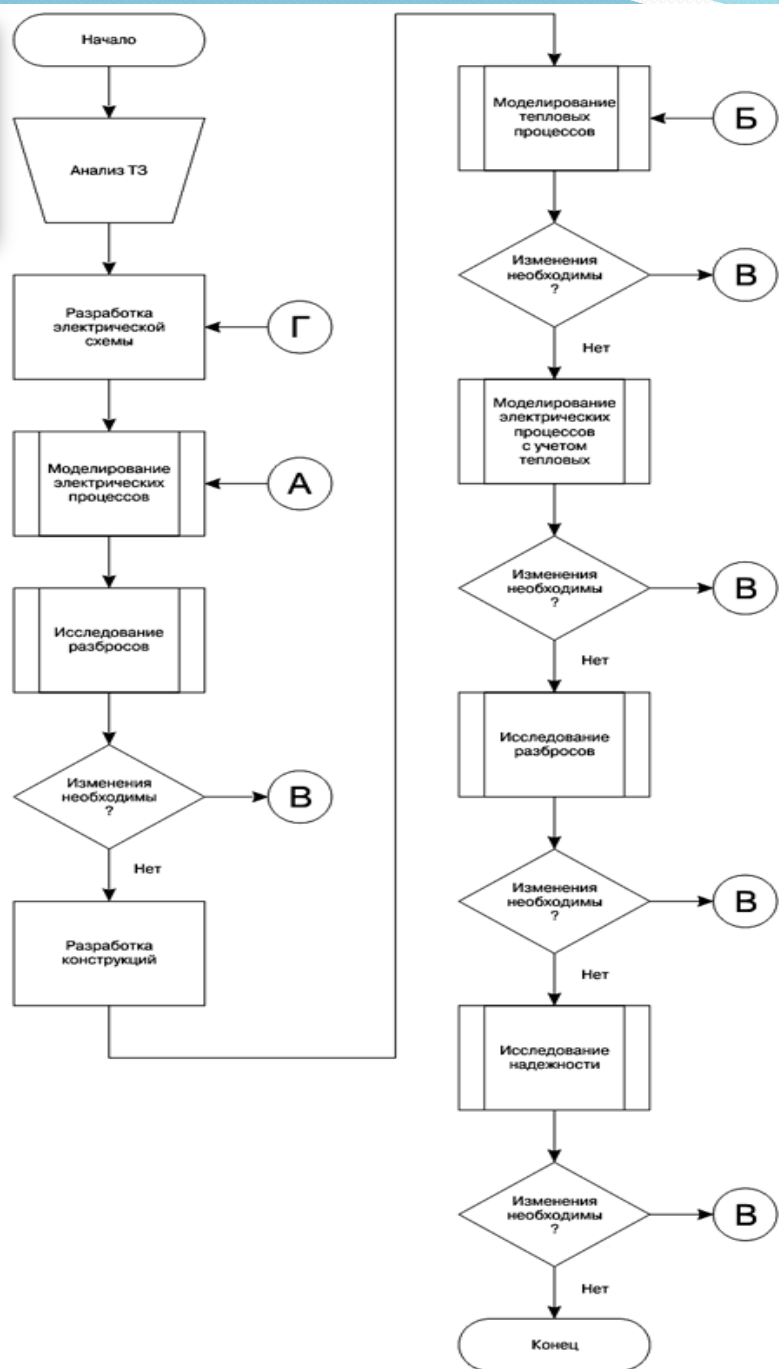


Схема алгоритма методики моделирования РЭС





Схема алгоритма методики моделирования РЭС



# Основные модели элементов

## Модели резистора, конденсатора, индуктивности

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

U - напряжение на элементе; I - ток через элемент;

R - сопротивление резистора;

C - емкость конденсатора;

L - индуктивность катушки.



## Модели резистора, конденсатора, индуктивности

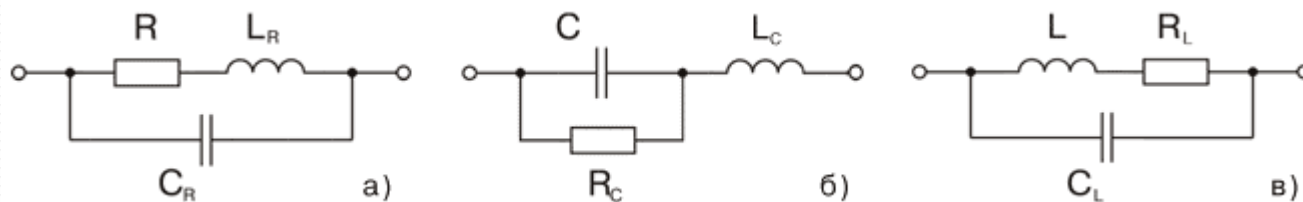


Рис. Топологические высокочастотные модели: а) резистора, б) конденсатора, в) катушки индуктивности



## Модель полупроводникового диода

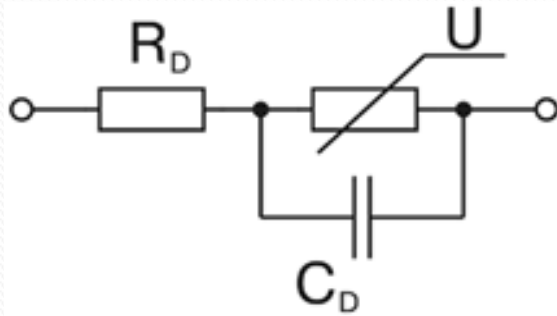


Рис. Топологическая модель диода

- модель относится к низкочастотным динамическим моделям большого сигнала

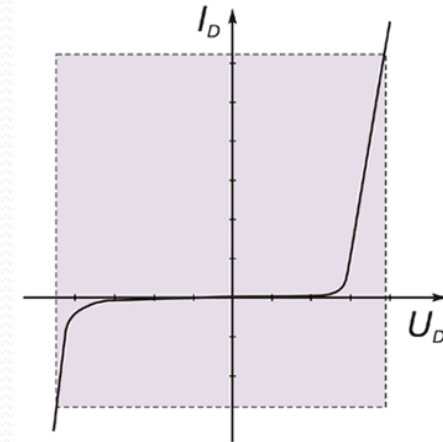


Рис. Область определения модели полупроводникового диода

- область определения модели выделена на ней серым цветом;
- модель описывает работу диода во всех режимах



# Модель полупроводникового диода

Нелинейное сопротивление р-n перехода:

$$I_d = I_f + I_r,$$

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

$$I_r = I_c \cdot e^{\frac{(-|U_t|+U)}{mV_t}}.$$

Емкость диода:

$$C_D = \frac{\tau}{mV_t} \cdot I_f + C_0 \cdot \left[ \frac{\psi}{\psi - U} \right]^n$$

Обозначение	Наименование параметра
$I_s$	Ток насыщения
$mV_t$	Температурный потенциал
$R_d$	Сопротивление диода
$C_0$	Емкость при нулевом смещении
$n$	Показатель степени
$\tau$	Постоянная времени
$\psi$	Контактная разность потенциалов
$U_c$	Напряжение стабилизации



# Модель биполярного транзистора

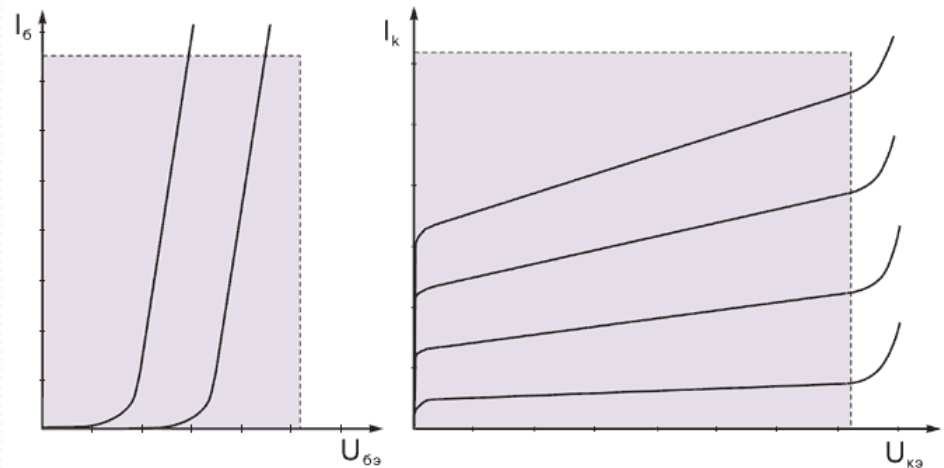
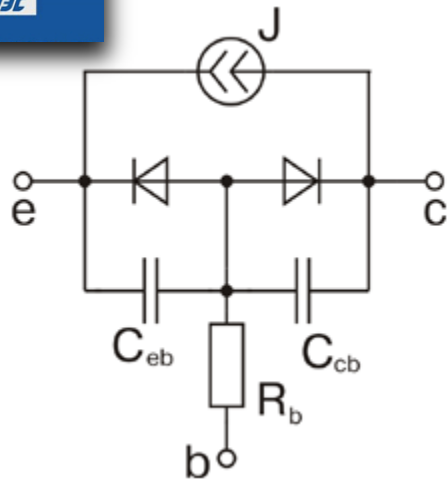


Рис. Топологическая модель биполярного транзистора

Рис. Входные и выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

- модель относится к низкочастотным динамическим моделям большого сигнала

- серыми прямоугольниками на графиках выделены области определения этой модели
- модель описывает работу транзистора во всех режимах, исключая пробой.



## Модель биполярного транзистора

Для нелинейных сопротивлений  
р-п переходов:

$$I_N = I_{se} \left( e^{\frac{U_{eb}}{mV_{te}}} - 1 \right),$$
$$I_I = I_{sk} \left( e^{\frac{U_{eb}}{mV_{tc}}} - 1 \right).$$

Для зависимого источника тока:

$$J = B_N I_N + B_I I_I,$$

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

Для нелинейных емкостей эмиттер-  
база и коллектор-база:

$$C_{eb} = \frac{\tau_e}{mV_{te}} I_N + C_{0e} \left[ \frac{\psi}{\psi - U_{eb}} \right]^{n_e},$$
$$C_{cb} = \frac{\tau_c}{mV_{tc}} I_I + C_{0c} \left[ \frac{\psi}{\psi - U_{cb}} \right]^{n_c}.$$



# Модель биполярного транзистора

## Параметры модели биполярного транзистора

Обозначение	Наименование параметра
$I_{se}$	Ток насыщения эмиттера
$I_{sc}$	Ток насыщения коллектора
$mV_{te}$	Температурный потенциал эмиттера
$mV_{tc}$	Температурный потенциал коллектора
$\beta_N$	Коэффициент усиления по току при прямом включении в схеме с ОЭ
$\beta_I$	Коэффициент усиления по току при инверсном включении в схеме с ОЭ
$\psi$	Контактная разность потенциалов
$V_N$	Коэффициент усиления по напряжению при прямом включении в схеме с ОЭ
$V_I$	Коэффициент усиления по напряжению при инверсном включении в схеме с ОЭ
$\tau_N, \tau_I$	Постоянные времени при прямом и инверсном включении
$C_{Oe}, X_{Oc}$	Барьерные емкости эмиттера и коллектора при нулевом смещении
$n_e, n_c$	Показатели степени в уравнениях барьерных емкостей