

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СИСТЕМ СВЯЗИ**

Лекторы:

проф., д.т.н.  
Кофанов Юрий  
Николаевич

тел.: 8 (926) 344 30 40  
E-mail: [yurykofanov@yandex.ru](mailto:yurykofanov@yandex.ru)

к.т.н.  
Сотникова Светлана  
Юрьевна

тел.: 8 (495) 798 45 48  
E-mail: [sotnikova4548@mail.ru](mailto:sotnikova4548@mail.ru)

# Исходные термины дисциплины

**Система** – комплекс взаимодействующих компонентов или совокупность элементов, находящихся в определенных отношениях друг с другом и со средой. Или: нечто целое, представляющее собой единство закономерно расположенных и находящихся во взаимной связи частей.

**Многофункциональная система** – суперсистема для выполнения двух и более функций.

**Инфокоммуникационные системы** - комплекс программно-аппаратных средств, обеспечивающих обмен информационными сообщениями между абонентами путём электрической связи определенного типа.

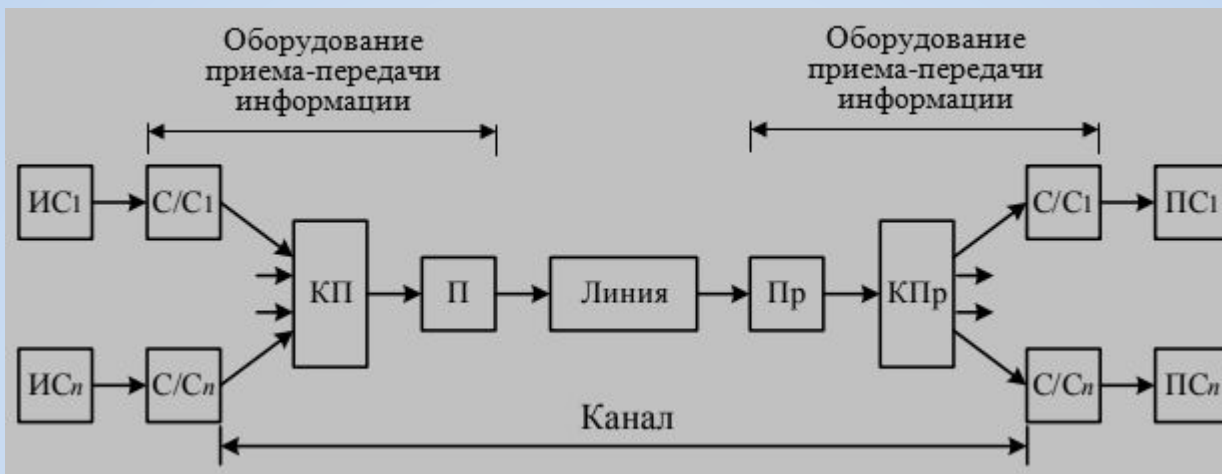
**Коммуникация** - это связь нескольких объектов между собой для передачи и приема информации: по радиоканалам, по проводам или по оптоволокну.

Процесс обмена информационными сообщениями посредством электромагнитных сигналов получили название электросвязь, разновидностями которой являются электрическая связь по проводам, оптическая связь, радиосвязь.

# Информация в инфокоммуникационной системе



# Структурная схема многоканальной инфокоммуникационной системы



**Система связи** – комплекс радиотехнического оборудования и других технических средств, предназначенный для реализации коммуникации между расположенными в пространстве объектами с использованием распространяющихся электромагнитных волн (радиоканалов) или линий связи (проводных или оптических).

**Примеры СС и коммуникации:** системы связи спутника с ЦУП; сотовая связь одного человека с другими через смартфоны; связь начальника с подчиненными на предприятии через внутреннюю телефонную сеть (проводная связь); система связи от спутниковой антенны на доме с телевизорами у жителей (по медным проводам или по оптоволокну) и пр.

# Исходные термины дисциплины

**Радиоэлектронное средство (РЭС)** – приборы и технические устройства, предназначенные для преобразования электрических и электромагнитных сигналов с определенными целями (для целей беспроводной коммуникации (т. е. передачи и приёма информации) между расположенными в пространстве объектами с использованием распространяющихся электромагнитных волн).

**Электронное средство (ЭС)** – техническое изделие, выполняющее функции определенной сложности, или составная часть этого изделия, в основу действия которого положены принципы электроники и радиотехники.

**Проектирование** – процесс, заключающийся в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характеров.

или

**Проектирование** – процесс разработки проекта еще не существующей системы или отдельного её ЭС на основе технического задания на проектирование, содержащего исходные технические требования:

- а) к принципиальной электрической схеме и облику конструкции системы или ЭС,
- б) к её входным воздействиям и выходным характеристикам,
- в) к условиям её будущего изготовления и эксплуатации.

# Исходные термины дисциплины

**Модель** – условный упрощённый образ объекта исследования, находящийся в отношении подобия к этому объекту, называемого оригиналом. Модель отображает оригинал частично с точки зрения конструкции и некоторых его свойств или процессов, протекающих в нём. Модель – это аналог реального объекта в виде материального объекта или записанный на каком-то языке.

Под **моделированием** понимается как процесс получения модели, так и ее применение для исследования поведения и свойств моделируемой системы.

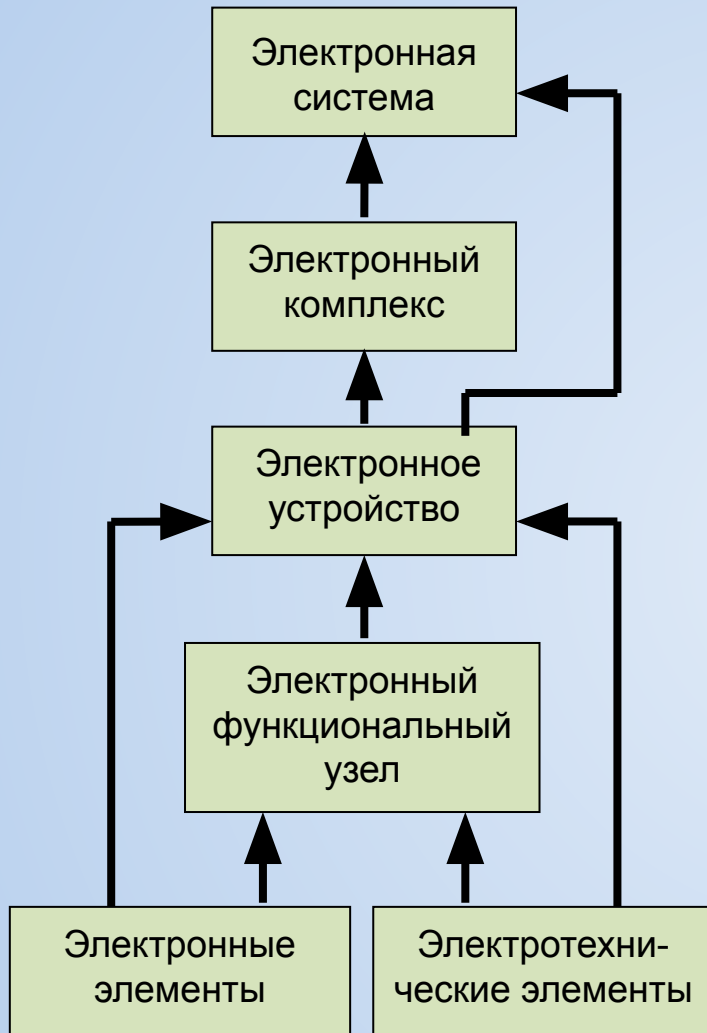
Моделирование базируется на математической теории подобия.

**Математическое (компьютерное) моделирование ЭС** – это построение математических моделей ЭС и физических процессов, протекающих в них, затем решение моделей и принятие решений по результатам расчётов и анализ ЭС, удовлетворяющих требованиям технической задачи.

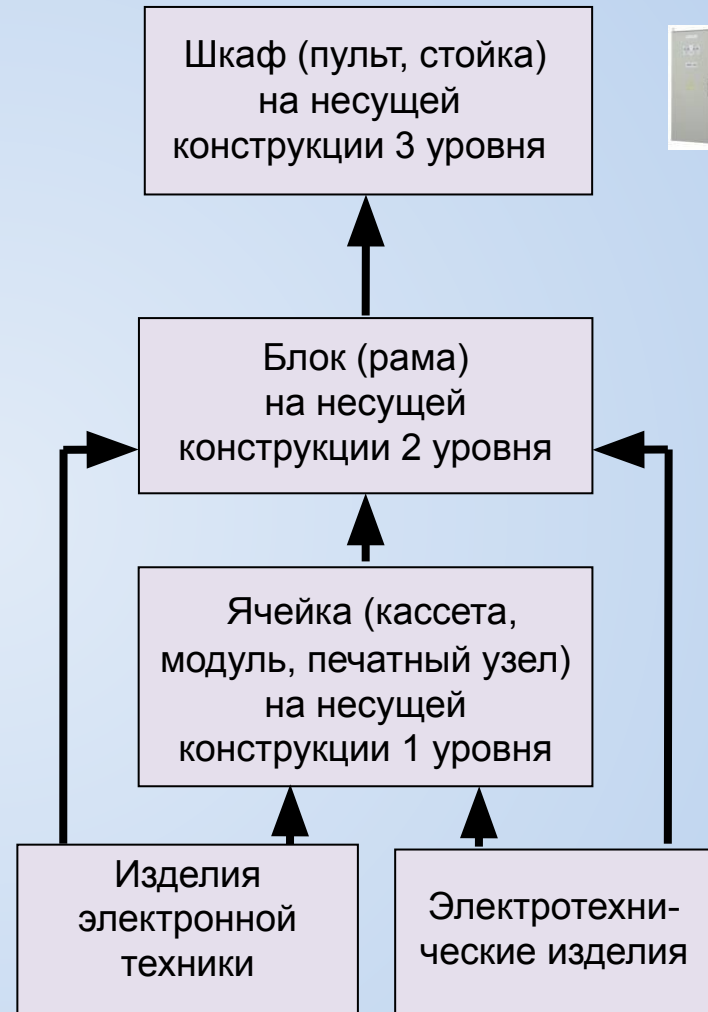




# Уровни разукрупнения электронных средств по ГОСТ Р 52003-2003



**Уровни разукрупнения ЭС по функциональной сложности (изображается в виде принципиальной**



**Уровни разукрупнения ЭС по конструктивной сложности (материальный объект)**



# Уровни разукрупнения электронных средств

Несущие элементы предназначены для крепления элементов конструкции в ячейках, блоках, устройствах ЭС. В зависимости от функциональной сложности изделия **несущими конструкциями** могут быть:

1. Шасси.
2. Каркасы оснований.
3. Печатные платы.
4. Рамки, теплоотводящие основания.

Наличие двух видов классификации уровней разукрупнения свидетельствует о том, что в любом ЭС как готовом изделии различают две непосредственно взаимосвязанные части: электрическую схему и конструкцию.



# Классификация ЭС по условиям эксплуатации

Условия эксплуатации задают климатическими и механическими факторами воздействия.

**Климатические** включают требования по теплоустойчивости и теплопрочности, по морозоустойчивости и морозостойкости, брызго- и водовоздействию, повышенным и пониженным атмосферным давлениям.

**Механические** воздействия задают диапазоном частот вибрации, величиной ускорения, скорости, перемещения на элементы конструкции при вибрациях и ударах.

Проектируемая аппаратура должна быть устойчивой и прочной.

Под **устойчивостью** понимают способность аппаратуры функционировать в заданных пределах воздействий.

Под **прочностью** понимают способность аппаратуры выдержать возмущающее воздействие, не разрушаясь и продолжать функционировать после снятия возмущающих нагрузок.

Технические требования на разработку задаются стандартом, в котором ЭС квалифицированы **по группам условий эксплуатации**:

1. Наземная стационарная (в отапливаемых и не отапливаемых помещениях).
2. Наземная возимая (колёсного, гусеничного хода).
3. Носимая (предназначена для эксплуатации на открытом воздухе, в руках оператора. Она должна быть брызго- и влагозащищённой).
4. Корабельная (судовая) – может быть на верхней палубе и внутри кают.
5. Бортовая (размётанная, размётанная, космическая)

# Классификация ЭС по конструктивным функциональным признакам

В настоящее время существует большое число ЭС и их конструкций, которые можно классифицировать по:

1) **функциональному назначению системы**, например: самолётный метеонавигационный радиолокатор, ЭВМ управления робототехническим комплексом;

2) **функциональному назначению отдельных устройств**, например: пульт станка с ЧПУ, индикатор радиолокационной станции,

3) **частотному диапазону сигналов**, например: низкочастотные – блок питания, устройство автоматики; высокочастотные – блок усиления видеосигнала, блок гетеродина устройства связи; сверхвысокочастотные – малошумящий усилитель, усилитель мощности;

4) **по конструктивной сложности**, например: интегральная схема, плата, блок, шкаф, пульт, стойка;

5) **типу производства**, например: единичное, серийное, массовое.

Классификация по функциональному назначению часто является доминирующей, т.к. **объект установки ЭС в решающей степени определяет специфику конструкции** (защита от дестабилизирующих факторов, масса, форма, энергопотребление, стоимость, надёжность).

# Схема иерархического моделирования тепловых и механических процессов



# Коэффициент нагрузки электронных компонентов

**Реальная интенсивность отказов** электронного компонента зависит от: коэффициента нагрузки  $K_H$ , например,

- для резистора

$$K_H = P / P_M,$$

где:  $P$  – реально рассеиваемая резистором мощность;

$P_M$  – максимально допустимая рассеиваемая резистором мощность;

- для конденсатора

$$K_H = U / U_M,$$

где:  $U$  – напряжение, приложенное к конденсатору;

$U_M$  – максимально допустимое напряжение, прикладываемое к конденсатору.

Обычно рекомендуется  $K_H = 0,7 \div 0,8$ .

Чем меньше коэффициент нагрузки электронного компонента, тем больше надежность.

**Надежность** - это свойство ЭС сохранять во времени в установленных пределах значения всех требуемых характеристик, параметров и показателей при заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.



# История развития конструкций и вычислительной техники

## Платы и комплектующие



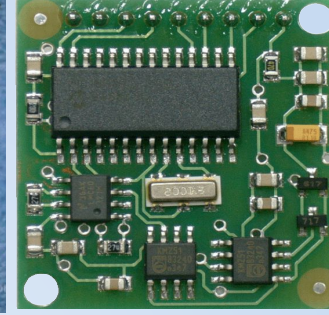
1 поколение



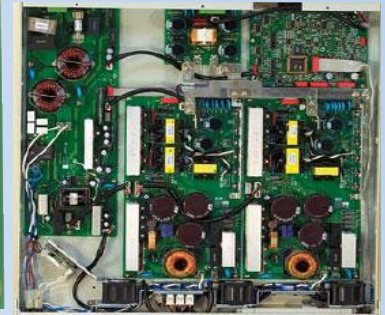
2 поколение



3 поколение

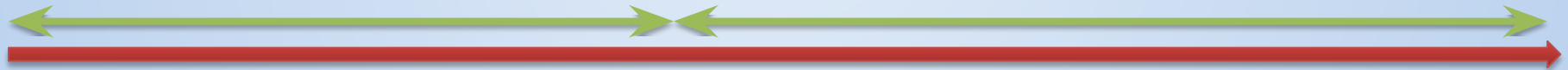


4 поколение



Макетирование  
(физическое  
моделирование)

Моделирование физических  
процессов (математическое  
моделирование)



20-50 г.г.

50-60 г.г.

60-70 г.г.

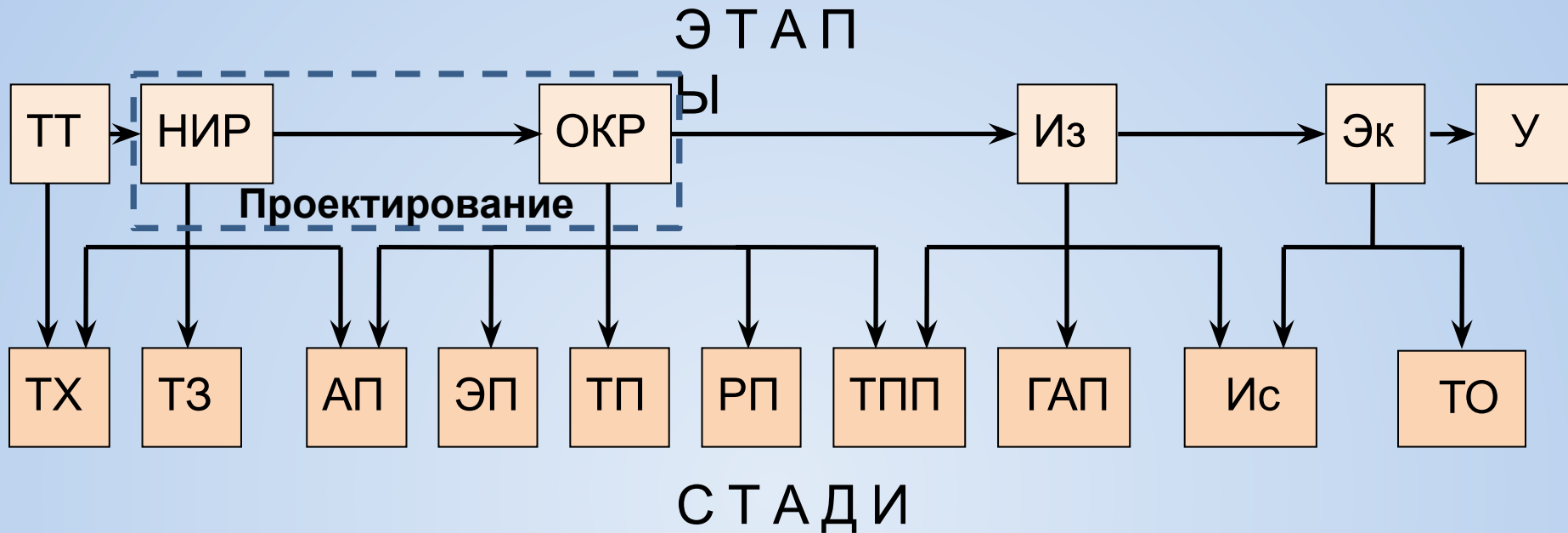
70-80 г.г.

90 г.г. – наст. вр.



## Вычислительная техника

# Жизненный цикл электронного средства



**ЭТАПЫ** жизненного цикла электронного средства (с т. зр. содержания решаемых задач):

**ТТ** — технические требования; **НИР** — научно-исследовательские работы; **ОКР** — опытно-конструкторские работы, **Из** — изготовление; **Эк** — эксплуатация; **У** — утилизация.

**СТАДИИ** жизненного цикла электронного средства (с т. зр. последовательности выполнения):

**ТХ** — технические характеристики; **ТЗ** — техническое задание; **АП** — аванпроект (техническое предложение); **ЭП** — эскизное проектирование; **ТП** — техническое проектирование; **РП** — рабочее проектирование; **ТПП** — технологическая подготовка производства; **ГАП** — гибкое автоматизированное производство; **Ис** — эксплуатация; **ТО** — техническое обслуживание.



# Проектирование электронных средств

**Целью проектирования** является разработка такой схемы и конструкции, которые обеспечивают выполнение заданных требований и наилучшие показатели качества.

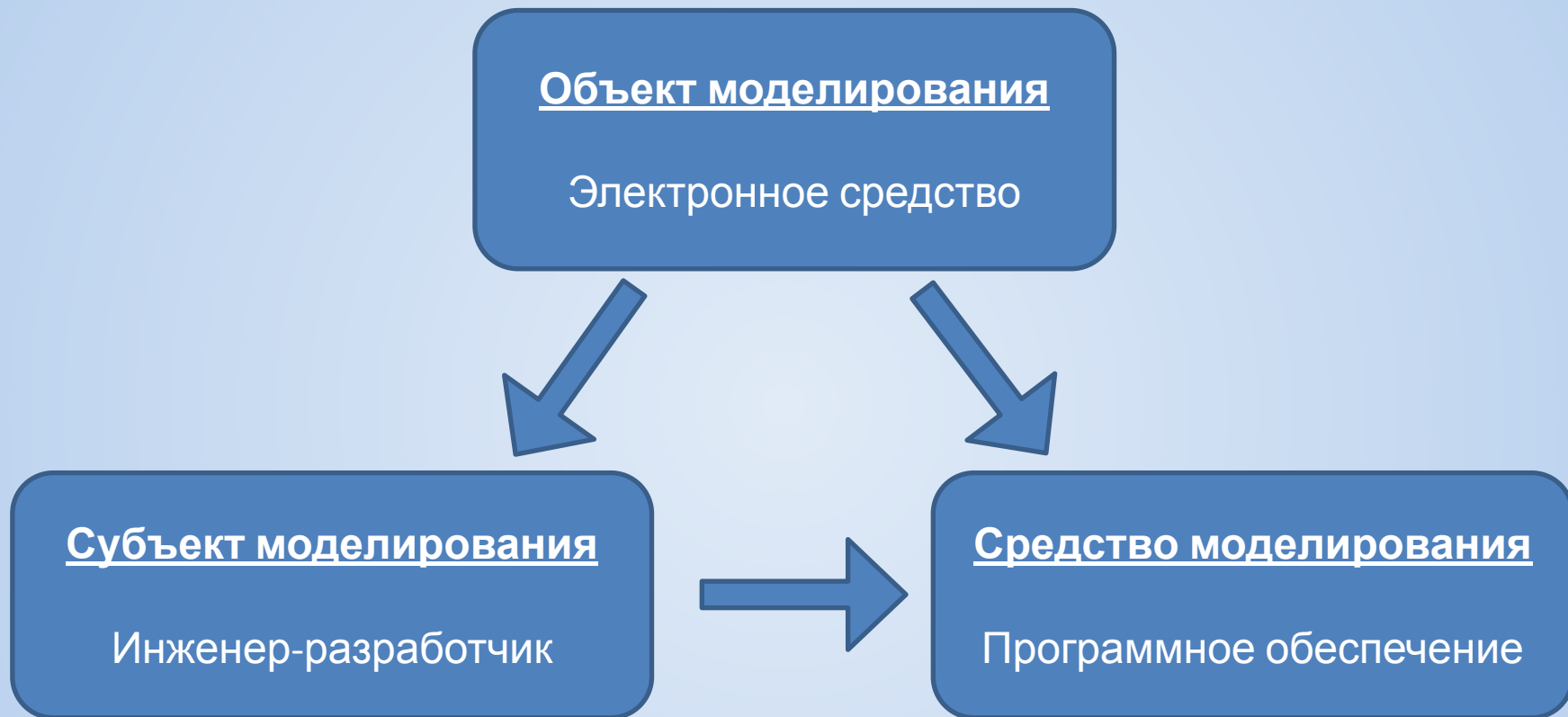
Проектирование электронных средств (ЭС) с точки зрения содержания решаемых задач разбивают на следующие этапы:

- системотехническое проектирование (ТЗ, АП),
- схемотехническое проектирование (АП, ЭП),
- конструкторское проектирование (ЭП, ТП) ,
- технологическое проектирование (ТПП),
- изготовление и испытание опытных образцов.

При формировании **ТЗ** решаются и оформляются в соответствующих документах, следующие вопросы:

- перечисление функций, выполняемых устройством;
- разработка структурной схемы устройства;
- оформление условий работоспособности устройства;
- оформление требований к выходным параметрам;
- определение характеристик отдельных узлов;
- разработка алгоритмов выполняемых операций.

# Основные понятия процесса моделирования



# Системы автоматизированного проектирования в радиоэлектронике

**САПР** - программные продукты и технические средства для автоматизации проектных работ, включая в себя моделирование в рамках жизненного цикла электронных средств (ЭС) .

**Основная цель создания САПР** — повышение эффективности труда инженеров, включая:

- сокращение трудоемкости проектирования и планирования;
- сокращение сроков проектирования;
- сокращение себестоимости проектирования и изготовления, уменьшение затрат на эксплуатацию;
- повышение качества, надёжности и технико-экономического уровня результатов проектирования;
- сокращение затрат на натурное моделирование и испытания.

**Достижение этих целей обеспечивается путем:**

- информационной поддержки и автоматизации процесса принятия решений;
- использования технологий параллельного моделирования на многопроцессорных вычислительных комплексах;
- унификации моделей физических процессов с целью их совместного использования для учёта взаимного влияния при эксплуатации ЭС и систем;
- хранения проектных решений, данных и наработок для их использования в последующих сеансах моделирования;
- замены натуральных испытаний и макетирования математическим моделированием;

# Основные термины

Отечественному термину **САПР** (система автоматизации проектирования) в мировой практике соответствует составная аббревиатура «**CAD/CAM/CAE**», часто дополняемая еще «**PDM/PLM**». Каждая из ее частей обозначает определенную систему моделирования, анализа и расчета характеристик, а также

**CAD** (Computer Aided Design -

система конструкторского проектирования)

**CAM** (Computer Aided

Manufacturing -

система технологической подготовки производства)

**CAE** (Computer Aided

Engineering -

система инженерного анализа)

**PDM** (Product Data

Management -

система управления

PLM (Product Life Cycle

Management -

система управления

жизненным циклом изделий)

# Примеры САПР

**CAD (Computer Aided Design, система автоматизированного черчения)** — программное обеспечение для трехмерного (3D) моделирования и визуализации, а также создания чертежей изделий и деталей, конструкторской и/или технологической документации;

**CAD уровня печатных узлов, ячеек, модулей**, обеспечивающие ввод схемы, разводку и производство печатных плат:

- Altium Designer (P-CAD);
  - Cadence Allegro/OrCAD PCB Editor;
  - OrCAD Layout;
  - Mentor Graphics PADS
- и др.

**CAD объемных конструкций**, обеспечивающие разработку и выпуск конструкторской документации:

- AutoCAD;
  - Pro/ENGINEER;
  - T-FLEX CAD;
  - Solid Works
- и др.

# Примеры САПР

**CAE (Computer Aided Engineering, системы инженерного анализа)** — самостоятельные и интегрированные программы для инженерных расчетов в области электронной инженерии. Такие системы для общих и специализированных расчетов позволяют анализировать механические, тепловые, электрические и иные физические процессы, протекающие в ЭС, осуществлять симуляцию различных динамических нагрузок на электронные компоненты и на материалы несущих конструкций.

**Программы схемотехнического моделирования,**  
обеспечивающие ввод схемы и ее электрическое моделирование:

- Proteus;
- OrCAD PSpice;
- NI Multisim;
- Micro-CAP;
- LTspice/SwitcherCAD;
- Altium Designer;
- AutoCAD Electrical;
- Allegro Cadence  
и др.

**Программы моделирования тепловых процессов в ЭС:**

- АСОНИКА-Т , АСОНИКА-ТМ;
- Sauna;
- BETA Soft-Board;
- ANSYS Icepak;
- Flotherm и др.



# Примеры САПР

## САЕ (Продолжение)

### Программы моделирования механических процессов в ЭС:

- АСОНИКА-В;
  - АСОНИКА-М;
  - АСОНИКА-ТМ;
  - ANSYS;
  - COSMOS
- и др.

### Программа расчёта и обеспечения электромагнитной совместимости в ЭС:

- АСОНИКА-ЭМС;
  - ELCUT;
  - CST Microwave Studio
- и др.

### Программа построения и выпуска карт рабочих режимов электронных компонентов ЭС:

- АСОНИКА-Р.

### Программа комплексного моделирования электрических, тепловых, гидроаэродинамических и механических характеристик ЭС верхних уровней иерархии (шкафов, стоек, блоков), в том числе в нетиповом исполнении:

- АСОНИКА-П.

# Примеры САПР

**CAM (Computer Aided Manufacturing, система технологической подготовки производства)** – программа для автоматического и полуавтоматического создания и редактирования управляющих программ для станков с числовым программным управлением в соответствии с созданной моделью ЭС.

## Связь CAD/CAM/CAE

используется в качестве входных данных в системах CAM и на основе которой в системах CAE формируется

Многие системы автоматизированного проектирования совмещают в себе решение задач, относящихся к различным аспектам проектирования:

**CAD/CAM** (T-FLEX CAD),

**CAD/CAE** (OrCAD, Altium Designer),

**CAD/CAE/CAM** (CADdy, CATIA/CADAM Solutions, Unigraphics).

Такие системы называют **комплексными**, или интегрированными.

# Примеры САПР

**PDM (Product Data Management, системы управления инженерными данными)** — программное обеспечение для ведения документооборота, создания и управления архивами чертежей. Обеспечивают хранение полученных результатов моделирования и управление порядком проведения различных видов моделирования, внесение в документацию изменений, сохранение истории этих изменений и т.п.

**PLM (Product Lifecycle Management, технология управления жизненным циклом изделий)** — организационно-техническая система, обеспечивающая управление всей информацией об изделии и связанных с ним процессах на протяжении всего его жизненного цикла от проектирования до снятия с эксплуатации.

**Интегрированный набор САД, САМ, САЕ со встроенной системой управления инженерными данными**

□ T-FLEX и др.

# Основные требования, предъявляемые к системам EСAD

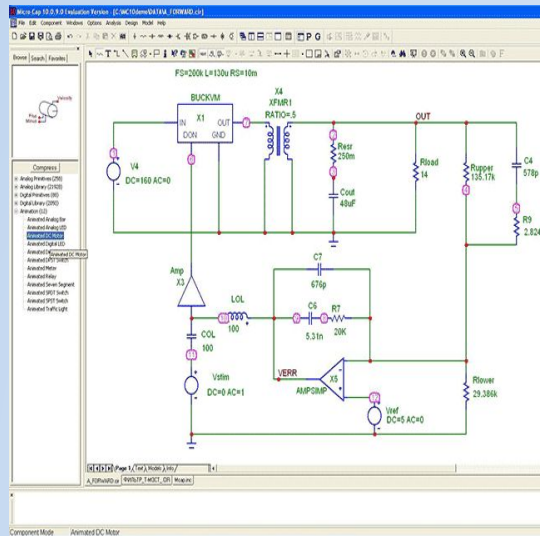
**САПР для ЭС** представляют собой класс систем **EСAD** (Electronic CAD) или **EDA** (Electronic Design Automation) - комплекс программных средств для облегчения разработки ЭС.

- ввод в компьютер структурной, функциональной и принципиальной схем с учётом паразитных параметров; ввод конструкций блоков и печатных узлов ЭС;
- решение всего комплекса задач моделирования электрических, тепловых и механических процессов в схемах и конструкциях ЭС;
- проведение исследований при моделировании;
- внесение изменений в принципиальную схему и конструкцию ЭС;
- наличие полной библиотеки элементов и узлов, источников (генераторов) сигналов и шумов, с большим набором параметров и возможностью их легкой модификации;
- наличие справочной базы данных и ГОСТов;
- проведение необходимых расчетов (токов, напряжений, мощности, температур, деформаций, механических напряжений, ускорений);
- возможность импорта и экспорта информации из других информационных систем.

# Примеры программ электрического моделирования

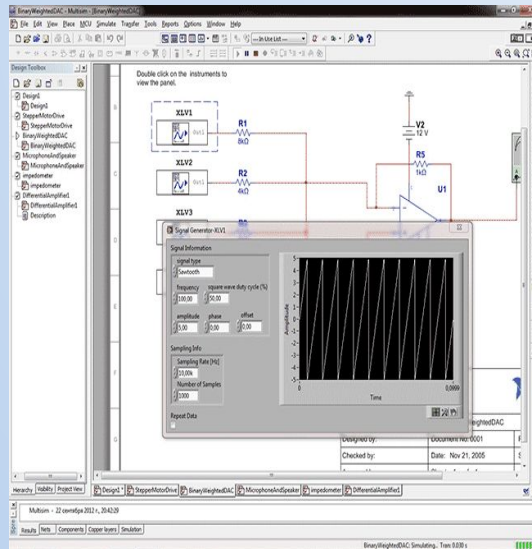
## Micro-Cap

Профессиональная программа аналогового, цифрового и смешанного моделирования и анализа цепей электронных устройств средней степени сложности. В сети можно найти руссификатор. Платная. Есть бесплатная версия с ограничениями



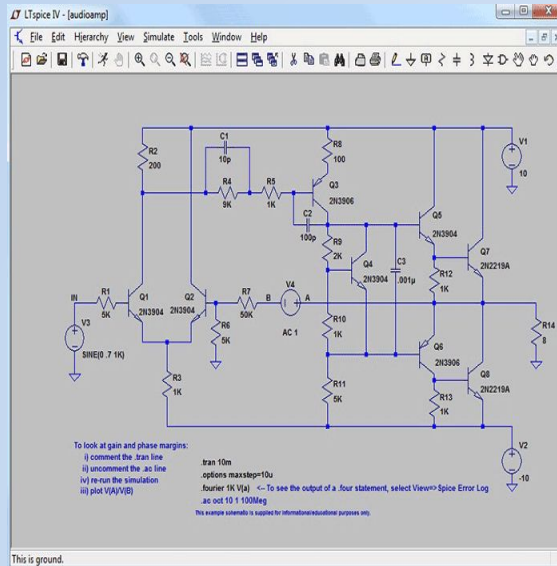
## NI Multisim

Популярное ПО, позволяющее моделировать электронные схемы и разводить печатные платы. Простой наглядный интерфейс, мощные средства графического анализа результатов моделирования, наличие виртуальных измерительных приборов. Библиотека элементов содержит более 2000 SPICE-моделей компонентов всех основных производителей



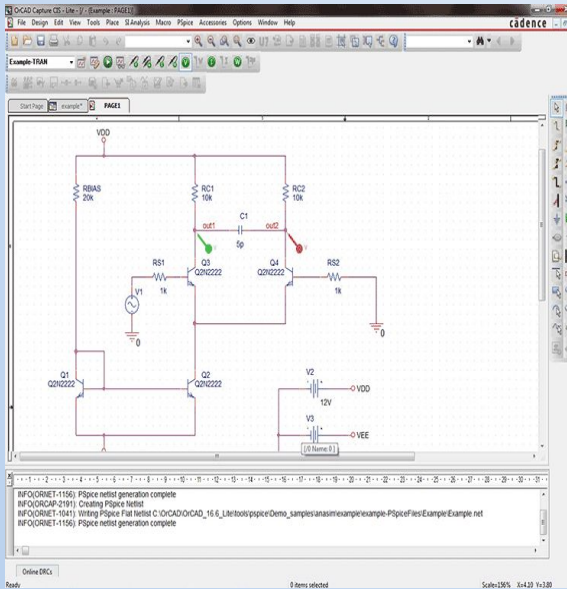


# Примеры программ электрического моделирования



## LTspice/SwitcherCAD

SPICE-симулятор для проведения компьютерного моделирования работы аналоговых и цифровых электрических цепей. Программа бесплатная.

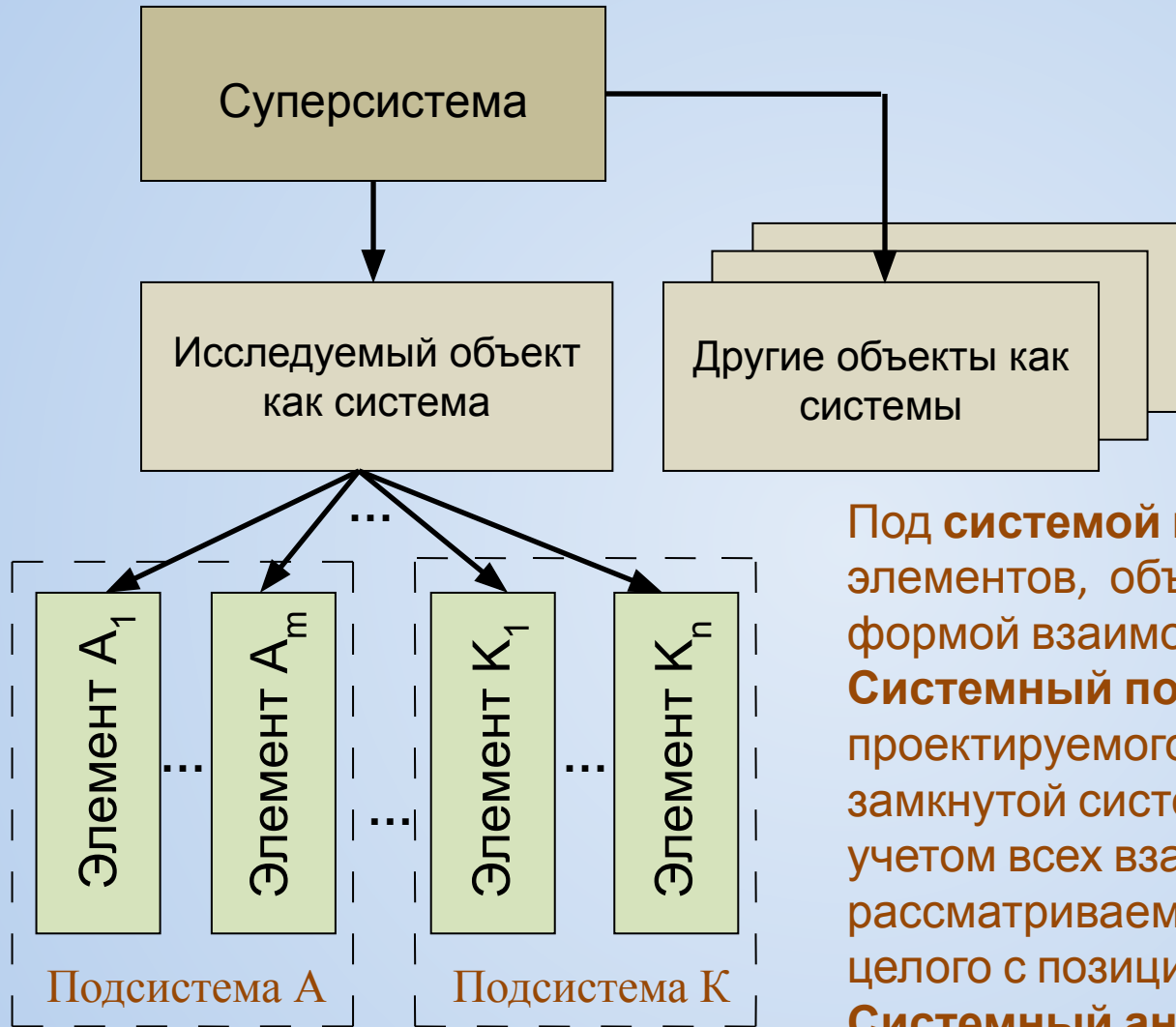


## OrCAD

Одна из лучших программ сквозного проектирования электронной аппаратуры, предоставляющая разработчикам поистине безграничные возможности разработки и моделирования электронных схем и создания печатных плат. Распространение: Shareware (платная), есть демоверсия с ограничениями.



# Иерархия систем при системном подходе при проектировании ЭС



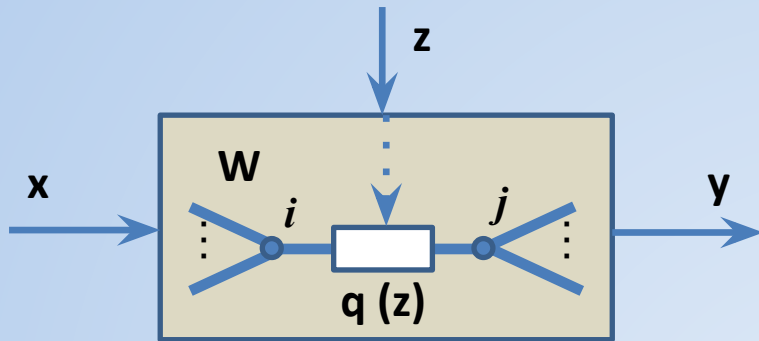
$m, n$  — число элементов в подсистемах А и К

Под **системой** понимается совокупность элементов, объединенных некоторой формой взаимодействия.

**Системный подход** – это представление проектируемого объекта в виде замкнутой системы и комплексное, с учетом всех взаимосвязей, изучение рассматриваемого объекта как единого целого с позиций системного анализа.

**Системный анализ** предполагает системный подход и к изучению связей между элементами, между подсистемами и системой.

# Представление ЭС или любого физического процесса в нем как системы



Любой физический процесс, рассматриваемый при создании электронного средства можно формально описать через математический оператор  $\mathbf{W}$ , который связывает вектор выходных характеристик  $\mathbf{y}$  с вектором входных воздействий  $\mathbf{x}$  и вектором внутренних параметров  $\mathbf{q}$ , зависящих от вектора внешних воздействий  $\mathbf{z}$ :

$$\mathbf{y}(\xi) = \mathbf{W}\{\mathbf{x}(\xi), \mathbf{q}(\mathbf{z})\},$$

где  $\xi = t, \omega, s, l$  — независимый аргумент

( $t$  — время,

$\omega$  — круговая частота,

$s$  — операторная переменная преобразования Лапласа,

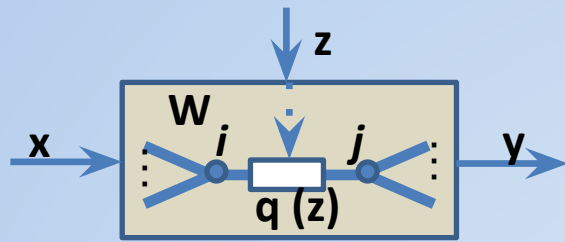
$l = [l_1, l_2, l_3]$  — пространственные координаты).

$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_i \ \dots \ x_M]^T$  — множество входных воздействий, ( $T$  — знак транспонирования вектора),

$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_i \ \dots \ y_N]^T$  — множество выходных характеристик,

$\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_k \ \dots \ q_L]^T$  — множество внутренних параметров,

$\mathbf{z} = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_r \ \dots \ z_P]^T$  — множество внешних факторов.



**Входное воздействие  $x_i$**  – переменная физическая величина, вызывающая появление или динамическое изменение рассматриваемого физического процесса в схеме или конструкции ЭС при неизменных значениях их параметров.

**Выходная характеристика  $y_j$**  – числовая величина или функция аргумента, описывающая характерные свойства объекта проектирования (с точки зрения рассматриваемого процесса).

**Параметр  $q_k$**  – числовая величина, характеризующая определенное физическое свойство элемента или взаимосвязь элементов схемы или конструкции ЭС.

**Внешний фактор  $z_r$**  – физическая величина, которая, имея физическую природу, отличную от рассматриваемого процесса, вызывает изменения параметров схемы или конструкции ЭС независимо от входных воздействий этого процесса.

## Пример: модель электрических процессов

### **Входные воздействия $x$ :**

- синусоидальные источники тока ( $\xi = \omega$ ),
- синусоидальные источники напряжения ( $\xi = \omega$ ),
- источники тока и напряжения, задаваемые в виде функции от времени ( $\xi = t$ )
- источники постоянного тока и напряжения
- и т.д.

### **Выходные характеристики $y$ :**

- мощности рассеивания на электронных компонентах,
- комплексный коэффициент передачи ( $\xi = j\omega$ ),
- амплитудно-фазочастотные характеристики ( $\xi = \omega$ ),
- импульсные и переходные характеристики ( $\xi = t$ ),
- коэффициенты электрической нагрузки электронных компонентов
- и т.д.

### **Внутренние параметры $q$ :**

- проводимость (сопротивление),
- емкость,
- индуктивность,
- коэффициент трансформации,
- коэффициент усиления (передачи)
- и т.д.

### **Внешние воздействующие факторы $z$ :**

- температура окружающей среды,
- механические вибрации и т.д.

## Пример: модель тепловых процессов

### **Входные воздействия $x$ :**

- мощности рассеивания на электронных компонентах,
- температуры окружающей среды и соседних конструкций, определяющие граничные условия (мощности и температуры могут являться функциями от времени ( $\xi = t$ ))
- и т. д.

### **Выходные характеристики $y$ :**

- температуры электронных компонентов;
- коэффициенты тепловой нагрузки электронных компонентов,
- стационарное температурное поле конструкции ( $\xi = l_1, \xi = l_2, \xi = l_3$ ),
- характеристика разогрева и охлаждения ( $\xi = t$ )
- и т.д.

### **Внутренние параметры $q$ :**

- коэффициенты теплопроводности материалов,
- удельные теплоемкости и плотности материалов;
- геометрические параметры электронных компонентов,
- степень черноты поверхностей конструктивных материалов
- и т.д.

### **Внешние воздействующие факторы $z$ :**

- деформационные зазоры от вибраций между

## Пример: модель механических процессов

### **Входные воздействия $x$ :**

- виброускорения в местах крепления в заданном частотном диапазоне ( $\xi = \omega$ ),
- амплитуда и форма ударных воздействий, и линейных ускорений ( $\xi = t$ )
- акустический шум ( $\xi = f$ ).

### **Выходные характеристики $y$ :**

- резонансные частоты конструкции,
- частотная характеристика конструкции ( $\xi = \omega$ ),
- распределение (поле) виброускорений по конструкции ( $\xi = l_1, \xi = l_2, \dots, \xi = l_k$ );
- виброускорения на конструктивных компонентах ( $\xi = \omega$ ),
- отклик (поле по конструкции) на ударное воздействие и линейное ускорение ( $\xi = t$ ),
- Отклик на акустический шум ( $\xi = f$ )

### **Внутренние параметры $q$ :**

- модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов,
- коэффициенты рассеивания энергии в материалах,
- плотности материалов,
- массы и геометрические параметры электронных компонентов
- и т.д.