Имитационное моделирование в задачах проектирования электронных средств

Доктор военных наук
профессор Боев В. Д.

Моделирование электронных схем

Лекция 1

Цель занятия

1. Изучить состав базового набора элементов схемных моделей.
2. Ознакомить с сущностью схемного моделирования.

Учебные вопросы

1. Базовый набор элементов схемных моделей.
2. Схемное моделирование.

Введение

Целью моделирования электронной схемы является получение ее математической модели и последующий анализ работоспособности электронного устройства на ЭВМ.

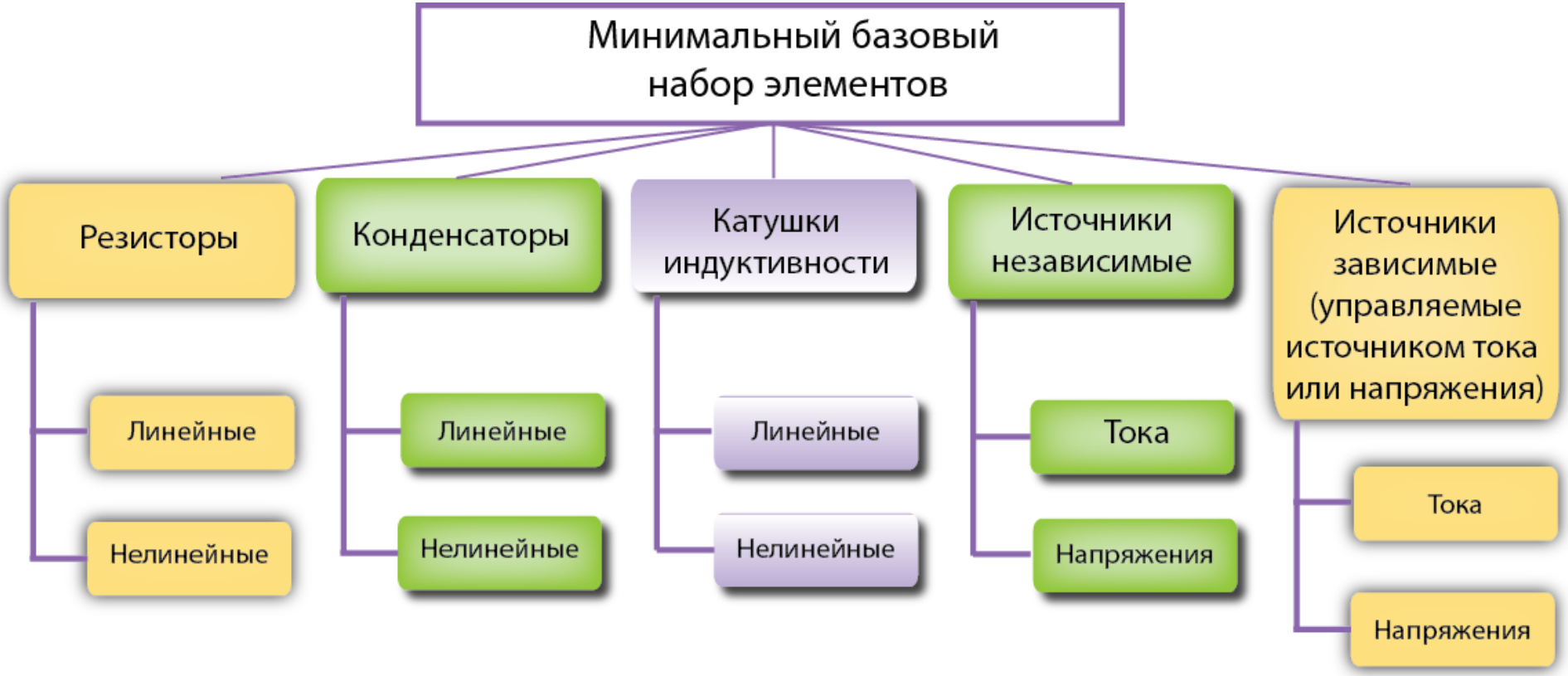
Методы математического моделирования цепей предполагают составление модели в виде системы алгебраических или дифференциальных уравнений.

Необходимым этапом в процессе получения математической модели электронного устройства является разработка схемных моделей отдельных компонентов и составление на их базе эквивалентной схемы для всего устройства в целом.

Уровни абстракции и модели

Уровень абстрагирования	Объекты исследования, проектирования	Математические модели устройств, схем	Математические модели компонентов
Системный	Вычислительные системы, радиотехнические системы	Имитационные модели систем массового обслуживания	
Функционально-логический	Устройства и блоки цифровой аппаратуры Устройства и блоки аналоговой аппаратуры	Системы логических уравнений, программы. Системы обыкновенных дифференциальных уравнений, системы интегро-дифференциальных уравнений	Логические уравнения Алгебраические уравнения, интегро-дифференциальные уравнения
Схемотехнический	Радиоэлектронные схемы	Системы ОДУ, системы интегро-дифференциальных уравнений	Алгебраические уравнения, системы уравнений
Компонентный	Элементы ИМС в процессе их функционирования и изготовления, полупроводниковые структуры и компоненты	Уравнения математической физики (ДУ в частных производных)	Уравнения в частных производных
Конструкторский	Печатные платы	Графы, таблицы, матрицы, регрессионные уравнения	Графы, матрицы

1. Базовый набор элементов схемных моделей



1. Базовый набор элементов схемных моделей

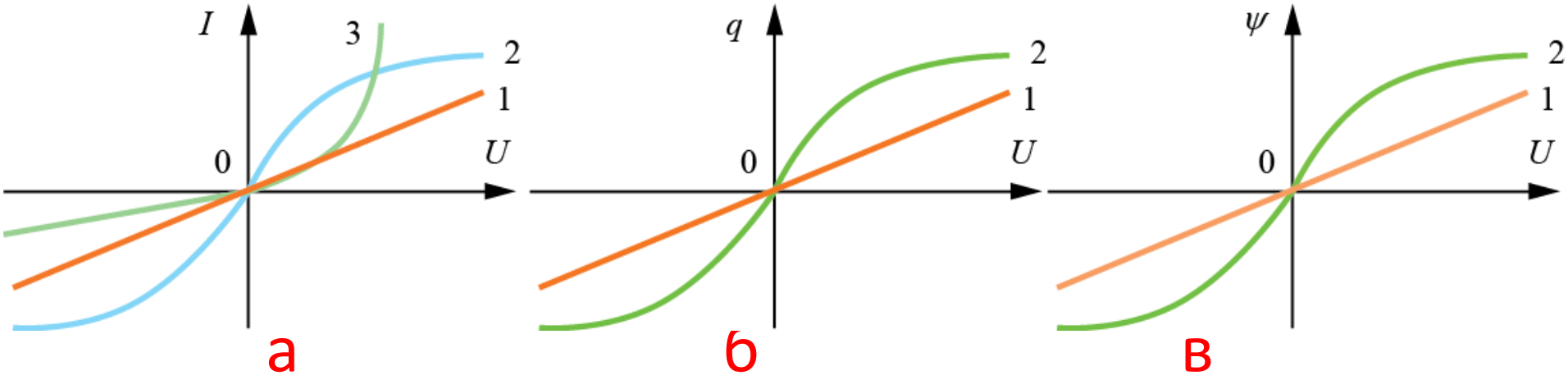


Рис. 2. Характеристики базовых элементов (а) — резистор, (б) — конденсатор, (в) индуктивность

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Нелинейными **называются элементы, параметры которых зависят от величины и (или) направления связанных с этими элементами переменных (напряжения, тока, магнитного потока, заряда, температуры и др.).**

Нелинейные элементы описываются нелинейными характеристиками, которые не имеют строгого аналитического выражения, определяются экспериментально и задаются таблично или графиками.

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Независимый источник напряжения **является двухполюсным прибором, напряжение на зажимах которого *v*(*t*) в каждый момент времени задано априори и поэтому не зависит от тока между выходными зажимами.**

Независимый источник тока **является двухполюсным прибором, ток через зажимы которого *i*(*t*) в любой момент времени может быть задан априори и, таким образом, не зависит от напряжения на зажимах.**

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Элементы базового набора являются идеальными источниками без потерь:

- **источник напряжения – идеальный источник ЭДС с нулевым внутренним сопротивлением;**
- **идеальный источник тока имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление, шунтирующее ветвь, продуцирующую независимый от внешней нагрузки ток.**

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Управляемый (***зависимый***) **источник является двухполюсным прибором, напряжение (ток) на клеммах которого в любой момент времени пропорциональны напряжению между заданными узлами цепи или току выделенной ветви в линейном варианте или являются их некоторой функцией в нелинейном случае.**

1. Базовый набор элементов схемных моделей

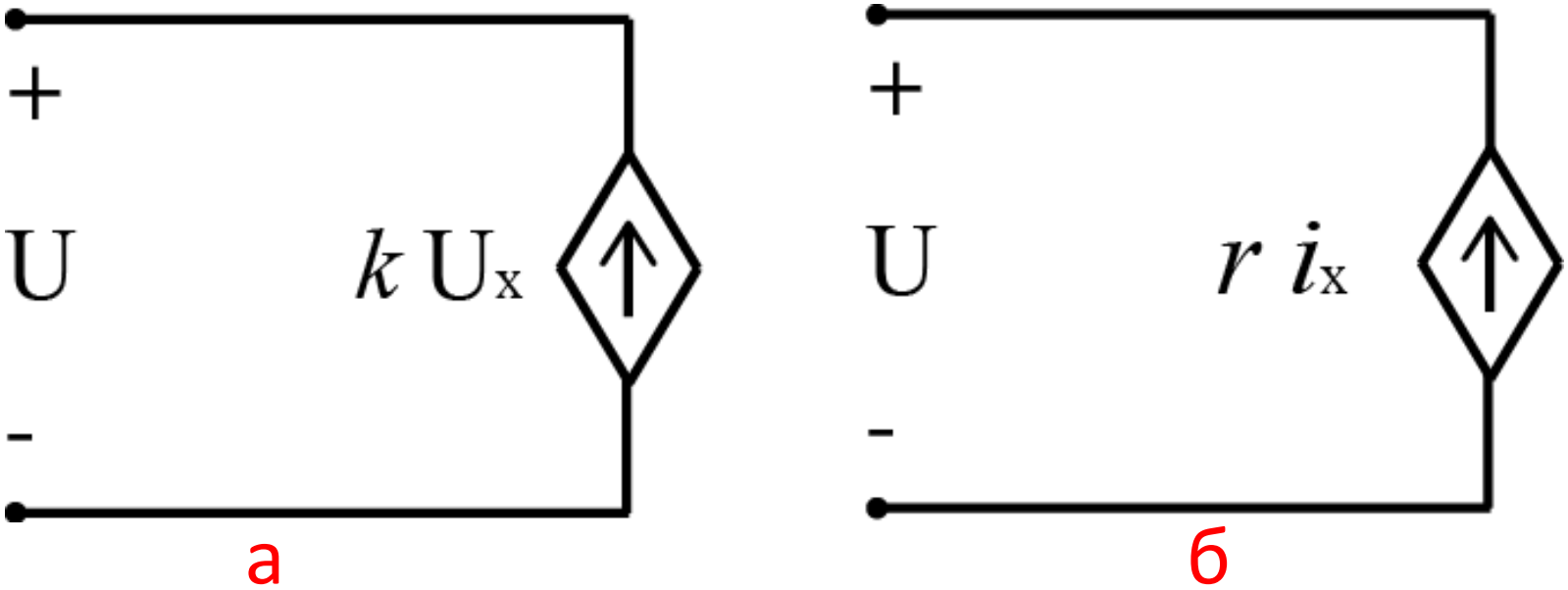


Рис. 3. Управляемые напряжением (а) и током (б) источники напряжения. Крутизна управления *r* имеет размерность сопротивления, *k*-безразмерный коэффициент

1. Базовый набор элементов схемных моделей

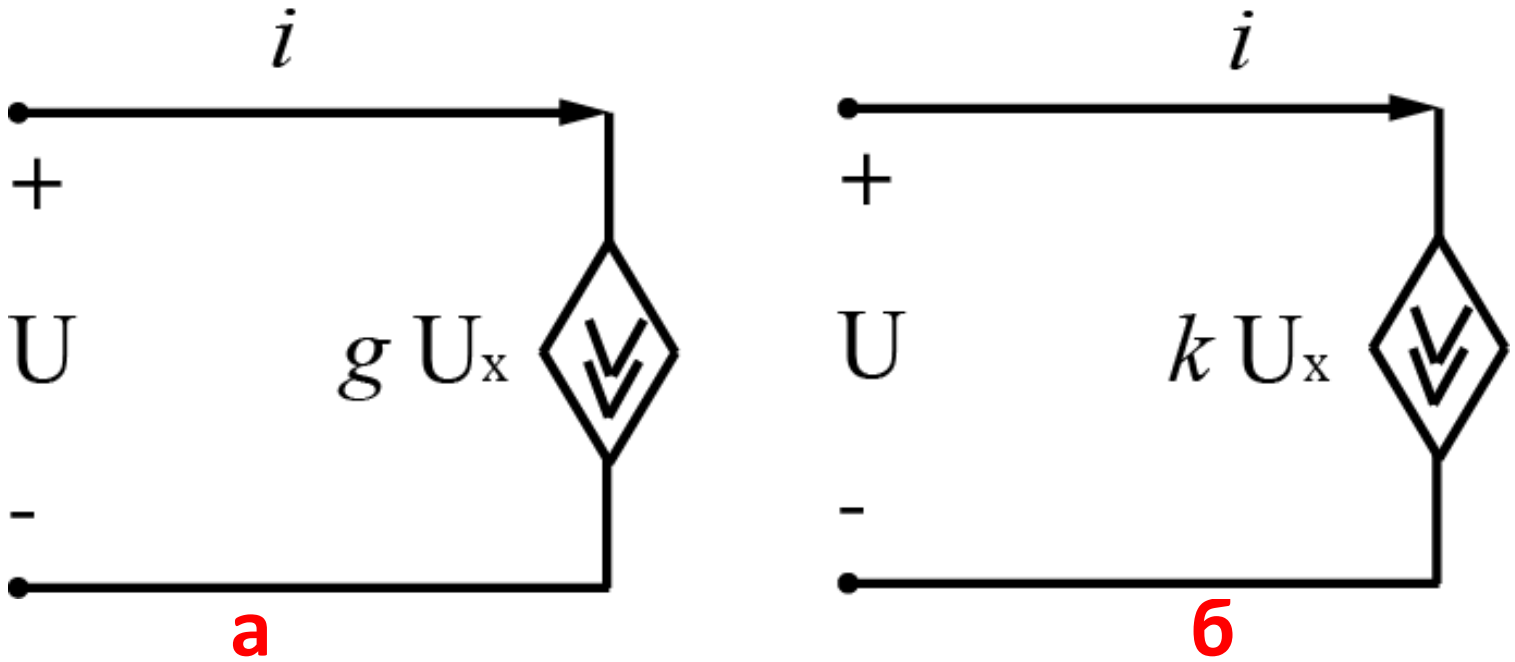


Рис. 4. Управляемые напряжением (а) и током (б) источники тока. Крутизна управления g имеет размерность проводимости, k-безразмерный коэффициент

1. Базовый набор элементов схемных моделей

В процессе математического моделирования электронных цепей возникает необходимость сведения реальных независимых источников к одному типу. При моделировании, например, с использованием метода узловых потенциалов цепь должна содержать только источники тока. Поэтому имеющиеся в цепи источники напряжения пересчитываются в эквивалентные им источники тока.

1. Базовый набор элементов схемных моделей

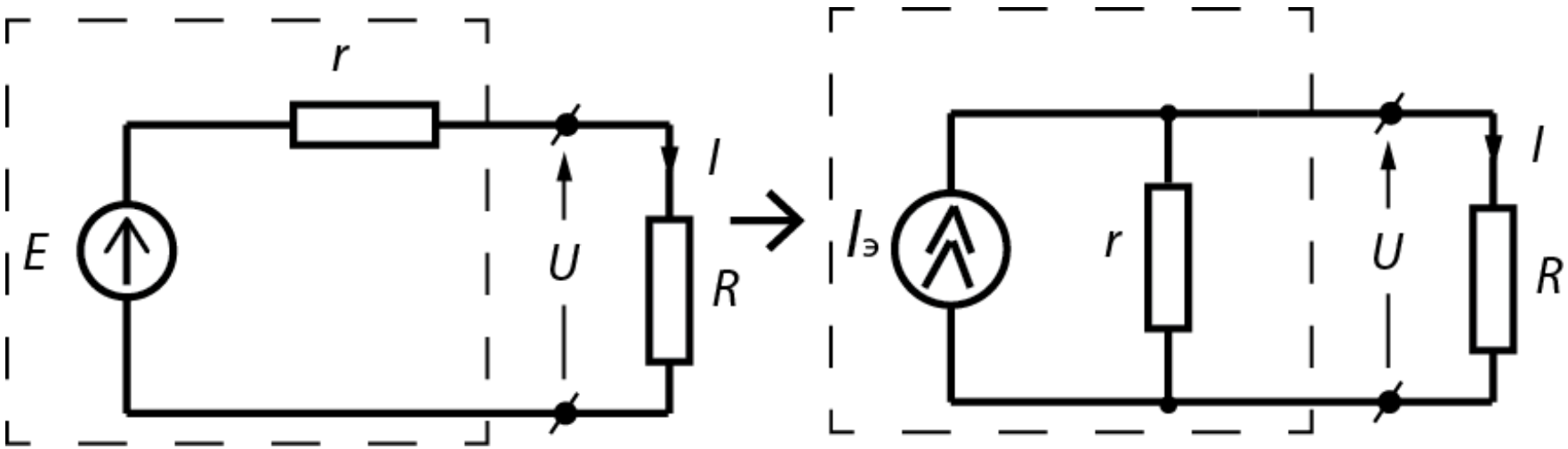


Рис. 5. Замена источника напряжения эквивалентным ему источником тока.

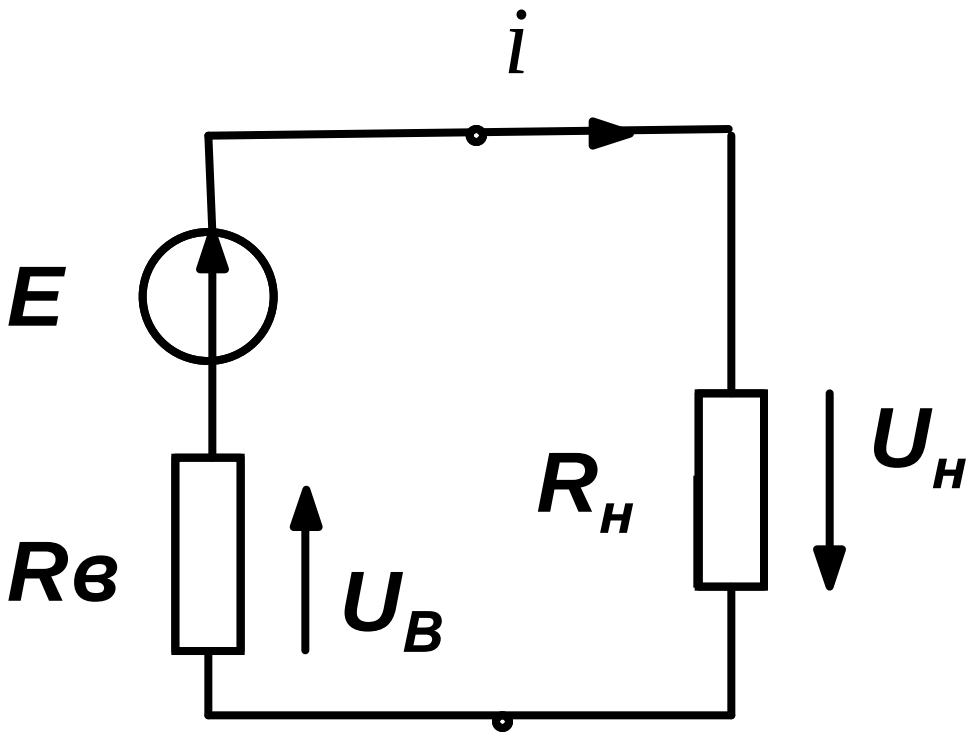
$$I_э = gE, \;\; g = 1/r$$

1. Базовый набор элементов схемных моделей

В случае идеальных источников без потерь можно в принципе получить бесконечно большую отдаваемую ими мощность при КПД, равным единице. В реальных источниках дела обстоят иначе. Рассмотрим практически важный вопрос об использовании энергии источника тока.

1. Базовый набор элементов схемных моделей

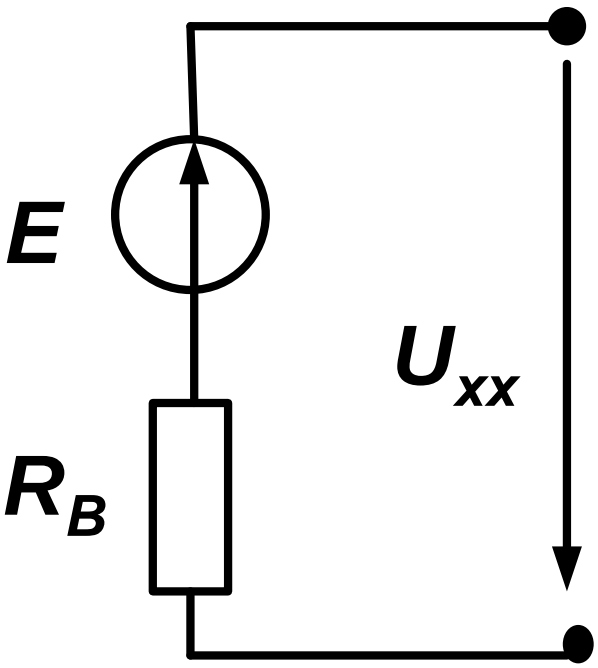
Номинальный режим работы источника



$$P_{н} = U_{н} i = R_{н} i^{2} = E^{2} \frac{R_{н}}{\left(R_{н} + R_{в}\right)^{2}}.$$

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Режим холостого хода источника (ХХ)



$$R_{н} \to \infty;$$

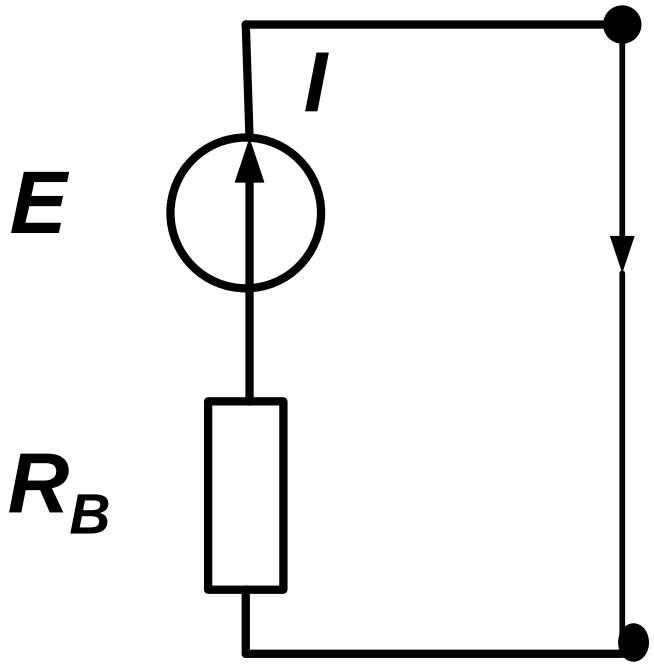
$$I = 0;$$

$$U_{xx} = E;$$

$$P_{н} = 0.$$

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Режим короткого замыкания источника



$$R_н = 0,$$

$$I = E / R_в \to \max,$$

$$U_н = 0;$$

$$P_н = 0.$$

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Расчет мощности, передаваемой в нагрузку:

- $P_H = I^2 R_H = E^2 R_H / (R_H + R_B)^2$
- *ХХ:* $I = 0$, $P_H = 0$
- *КЗ:* $R_H = 0$, $I = E / R_B$, $P_H = 0$
- ***Определим максимум функции:***

$$\frac{\partial}{\partial R_H}\left(\frac{R_H}{\left(R_H + R_B\right)^2}\right) = 0.$$

Решение $R_H = R_B$, $P_H = E^2/4R_B$

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Мощность, выделяемая во внешней цепи, достигает наибольшего значения, если сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника.

При этом ток в цепи равен $E / 2R_{\text{в}}$ **, т. е. половине тока короткого замыкания, а наибольшее возможное значение мощности есть**

$$P_{\text{нmax}} = E^2 / 4R_{\text{в}}.$$

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Расчет к.п.д. источника

- В общем виде:

$$\eta = P_Н/P_И = R_Н\, E^2(R_В + R_Н)/\, E^2(R_В + R_Н)^2 =$$
$$= R_Н\,/(R_Н + R_В) = 1/(1+R_В/\, R_Н).$$

- При КЗ $\eta = 0$.
- В согласованном режиме ($R_В = R_Н$)

$\eta = 0{,}5$ или 50%.

- В номинальном режиме $\eta > 0{,}5$ ($R_В < R_Н$).

1. Базовый набор элементов схемных моделей

Полезная мощность $P_{н} = Ei - R_{в} i^2$, **т.е. с изменением тока меняется во внешней цепи по параболе.**

Зависимость КПД от силы тока:

$$\eta = \frac{P_{н}}{P} = \frac{Ei - R_{в} i^2}{Ei} = 1 - \frac{R_{в} i}{E}.$$

КПД = max в случае разомкнутой цепи и затем уменьшается по линейному закону, обращаясь в нуль при КЗ.

1. Базовый набор элементов схемных моделей

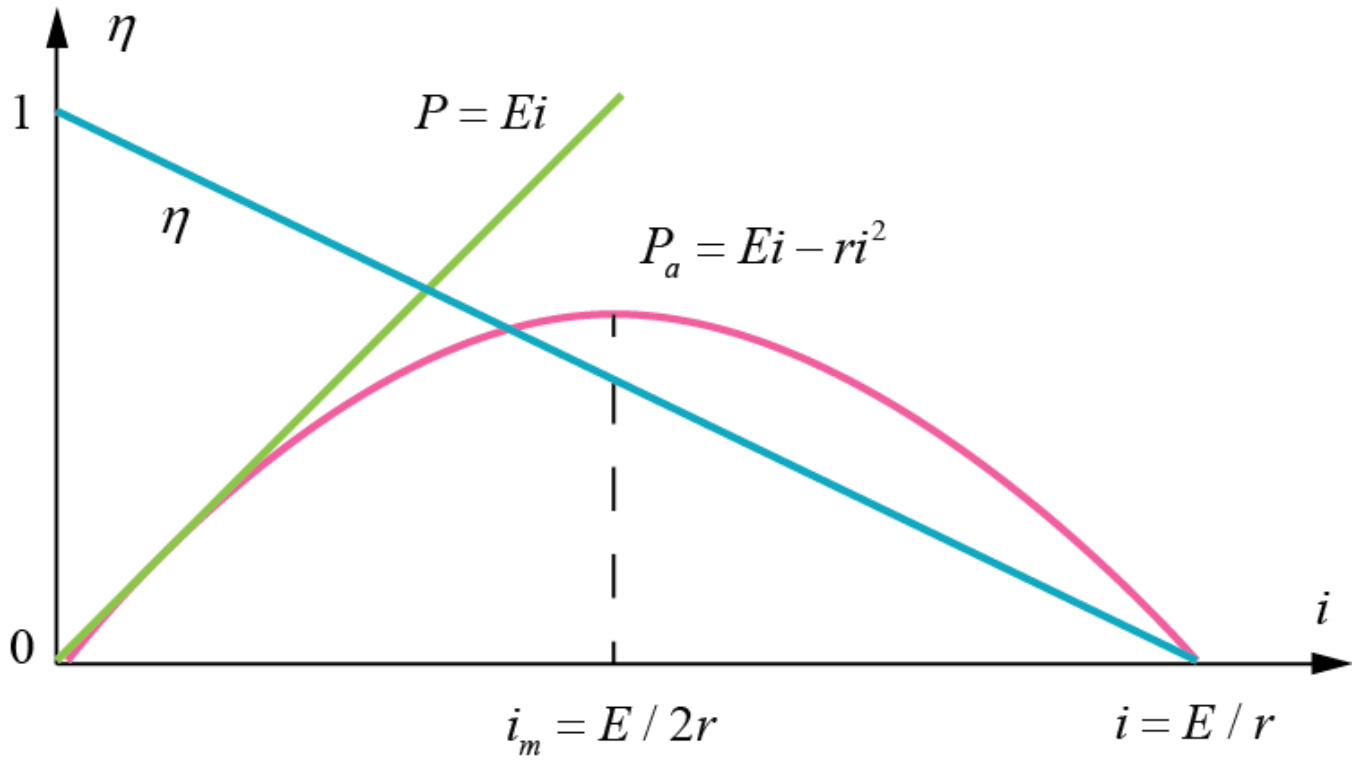
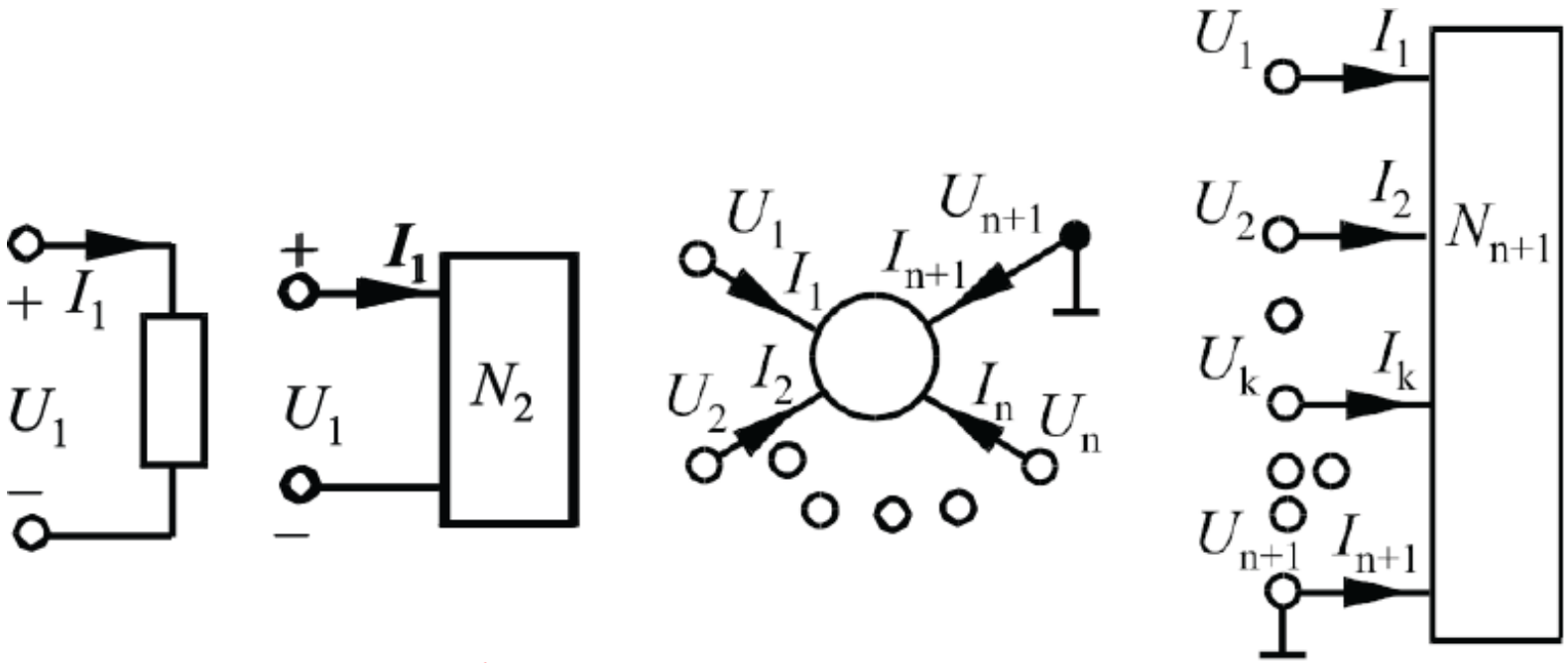


Рис. 6. Зависимость мощности источника *P*, мощности во внешней цепи P_a и КПД η источника от силы тока

2. Схемное моделирование



а б в г

Рис. 7. Приборы с двумя (а) и (*n*+1) выводами (в) и синтезированные схемы с двумя (б) и (*n*+1) выводами (г)

2. Схемное моделирование

Рис. 8. Вариант классификации схемных моделей

2. Схемное моделирование

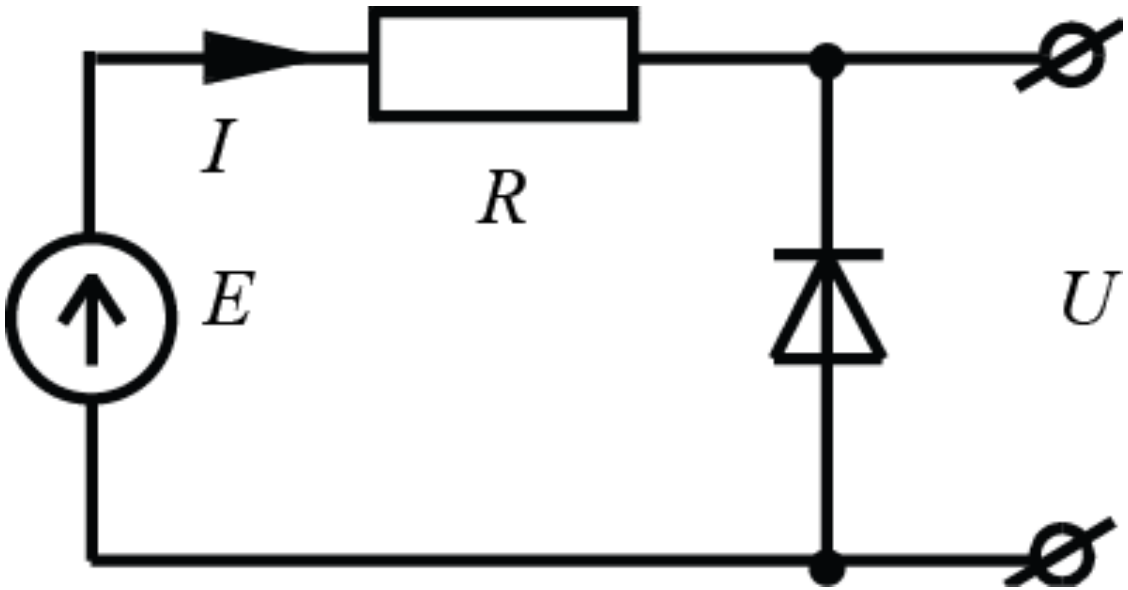


Рис. 9. Схема включения стабилитрона

2. Схемное моделирование

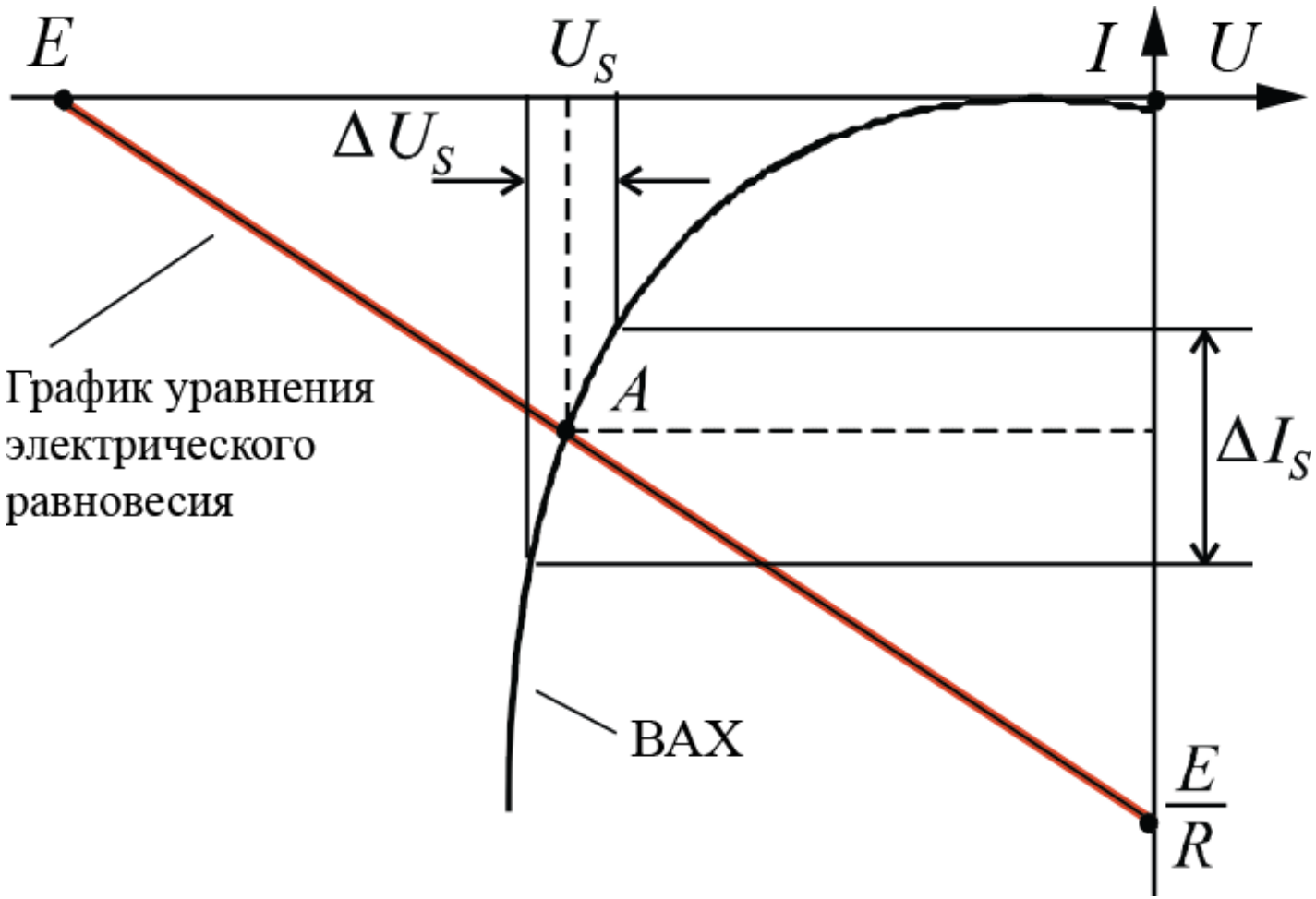


Рис. 10. ВАХ стабилитрона

2. Схемное моделирование

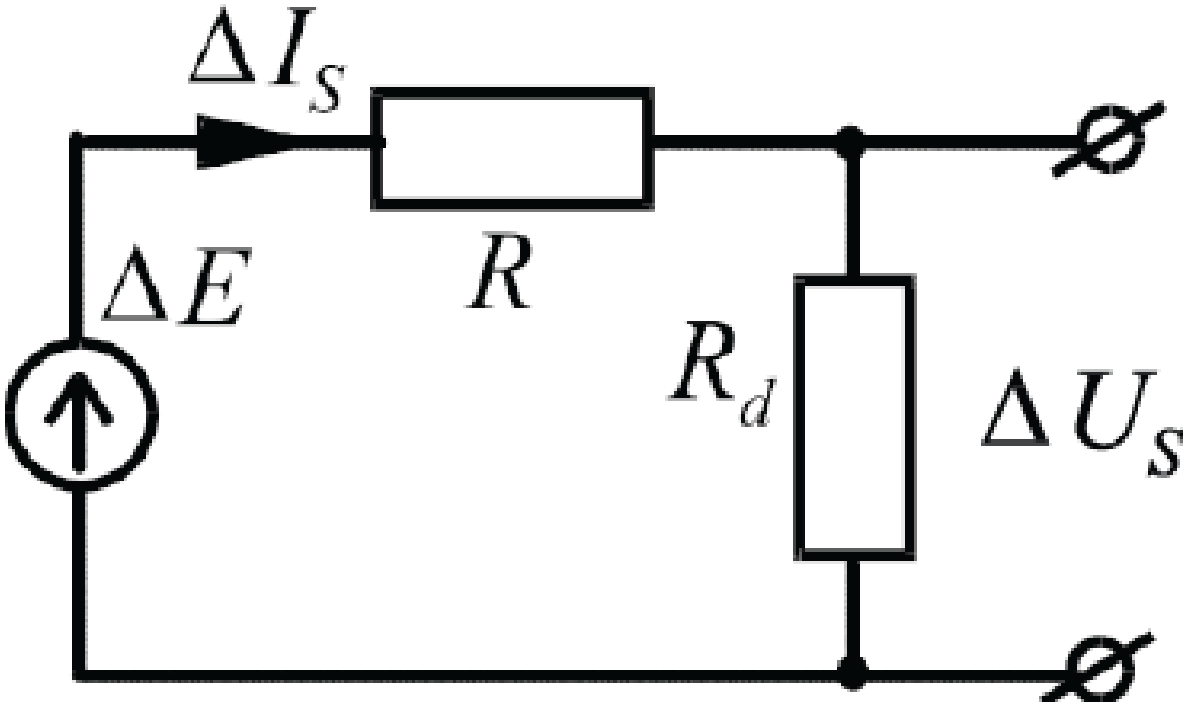
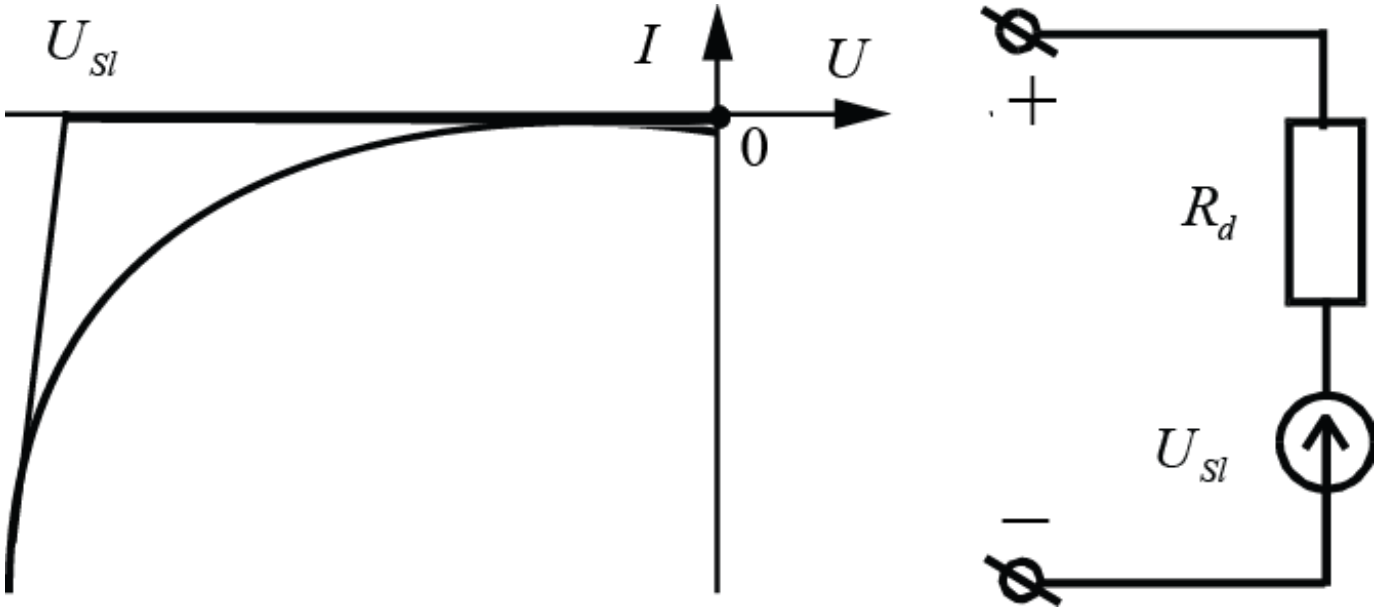


Рис. 11. Линейная модель стабилитрона

2. Схемное моделирование



а б

Рис. 12. ВАХ нелинейной локальной модели стабилитрона (а) и его схемная модель (б)

2. Схемное моделирование

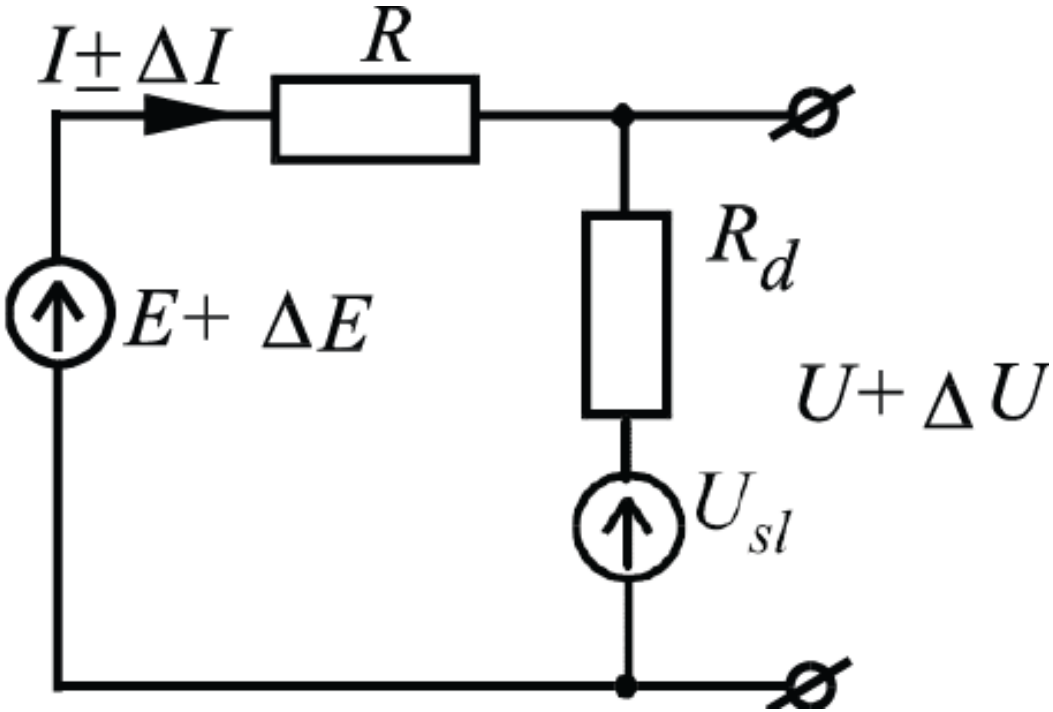


Рис. 13. Эквивалентная схема источника опорного напряжения, полученная с использованием локальной модели

2. Схемное моделирование

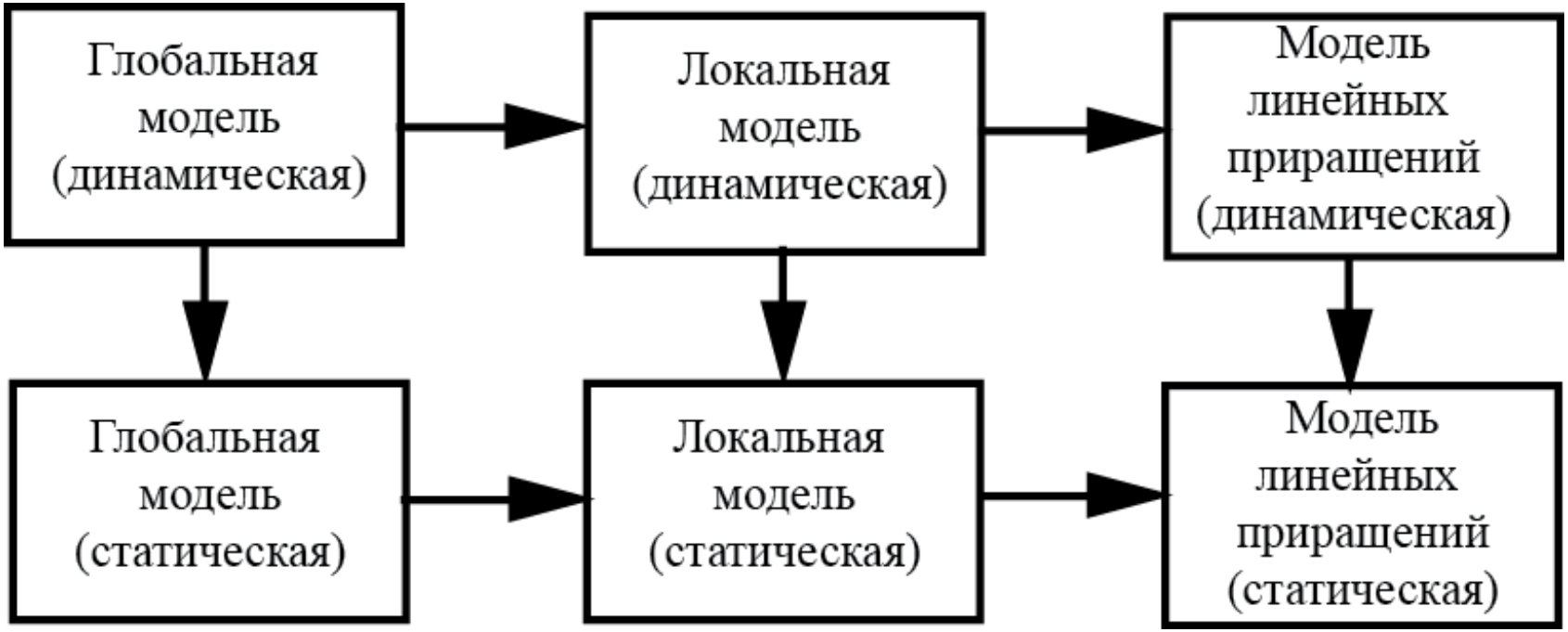


Рис. 14. Иерархия схемных моделей

2. Схемное моделирование

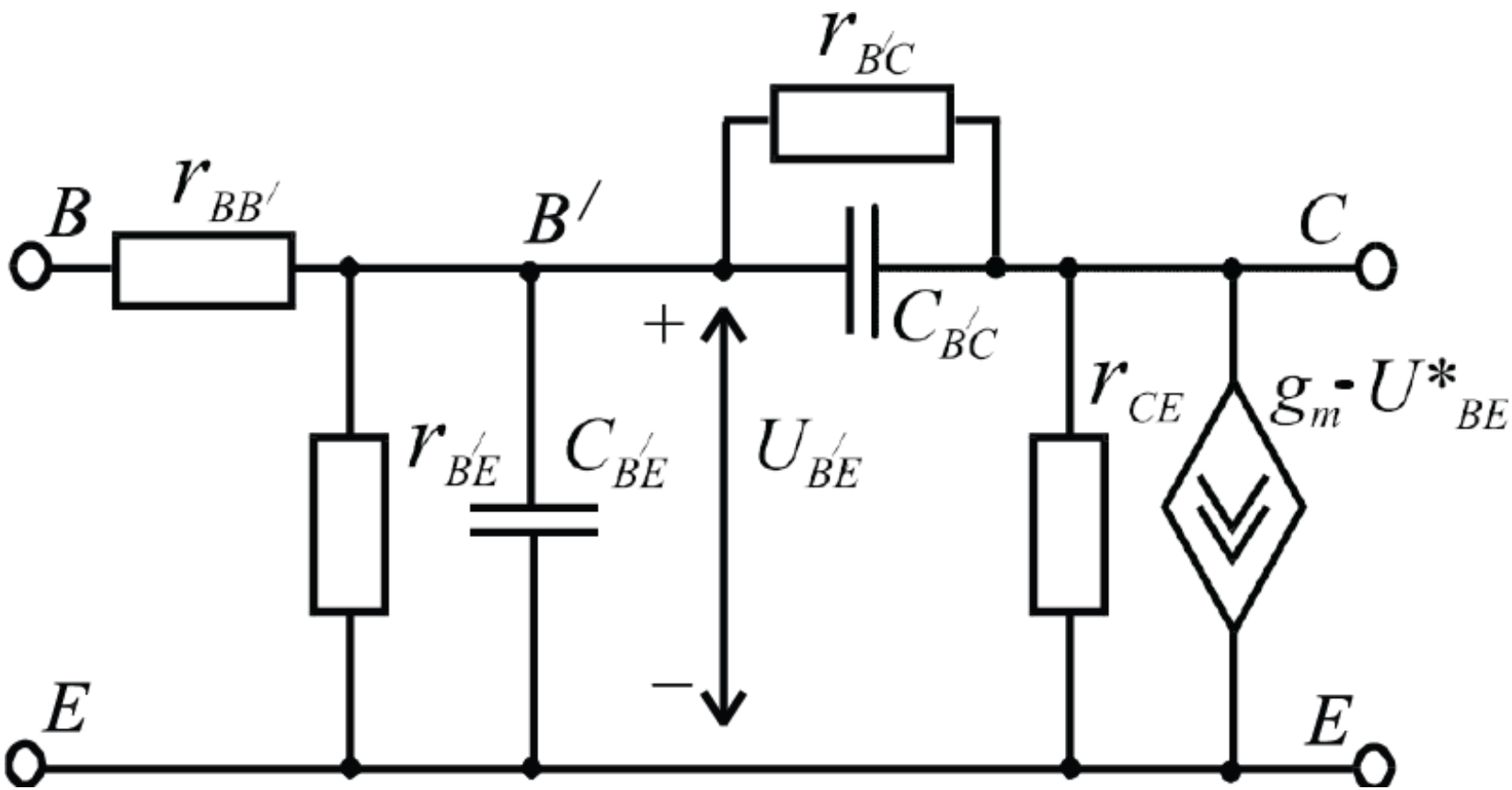


Рис. 15. Модель транзистора

Заключение

Тема следующей лекции:

Направленные графы