ГОУ Лицей среднего (полного) общего образования
при СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Раздел №3.1 – 3.2. **Линейные безынерционные аналоговые элементы и функциональные узлы**

Директор Лицея, проф. Лундин Владимир Зиновьевич
Заместитель директора Шефер Дмитрий Михайлович
Преподаватель ИКТ Баскаков Сергей Алексеевич

Санкт-Петербург 2011

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
по типу функциональной характеристики

Иллюстрации типовых свойств элементов и ФУ

1. Линейность и нелинейность

Линейный элемент (узел, устройство) в отличие от нелинейного подчиняется принципу суперпозиции: «Реакция на сумму воздействий равна сумме реакций на каждое из воздействий в отдельности». $F(x_1 + x_2) = F(x_1) + F(x_2)$

Функциональный узел, составленный из линейных элементов, линеен.

$y = ax + b;\ y = a(x_1 + x_2) + b = a x_1 + a x_2 + b$ - линейная функция

$y = ax^2;\ y = a(x_1 + x_2)^2 = a x_1^2 + a x_2^2 + 2a x_1 x_2$ - нелинейная функция

$y = ax^3;\ y = a(x_1 + x_2)^3 =$ _____?

$y_1(t) = A\sin(\omega_0 t);$

$y_2(t) = A\sin(\omega_0 t + \omega_0 t) = 2A\sin(\omega_0 t)\cos(\omega_0 t) \neq$

$\neq A\sin(\omega_0 t) + A\sin(\omega_0 t)$ - нелинейная функция

Приведите примеры нелинейных функциональных характеристик

_____

_____

_____

_____

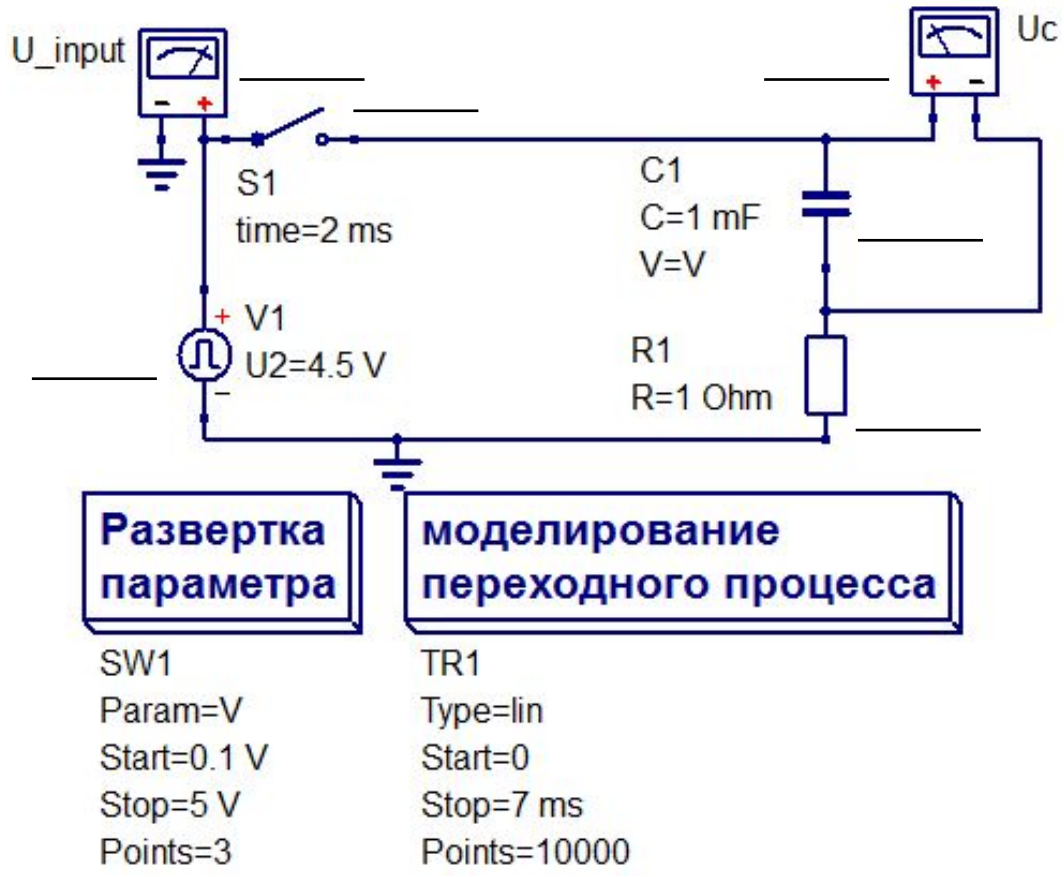
Лекция №1. Идеология авторской образовательной системы Лицея

Лекция №1. Идеология авторской образовательной системы Лицея

2. Безынерционность и инерционность

Реакция инерционных элементов (функциональных узлов, устройств) в отличие от безынерционных определяется не только мгновенным значением входного сигнала, но и значением самой реакции в предыдущие моменты времени.

Примерами функциональных элементов являются конденсаторы и катушки индуктивности.



Источник прямоугольного импульса с амплитудой _____?, подключается к конденсатору C1 с номинальной емкостью 1 мФ через ограничительный резистор R1 с номинальным сопротивлением 1 Ом, напряжение на конденсаторе фиксируется вольтметром Uc.

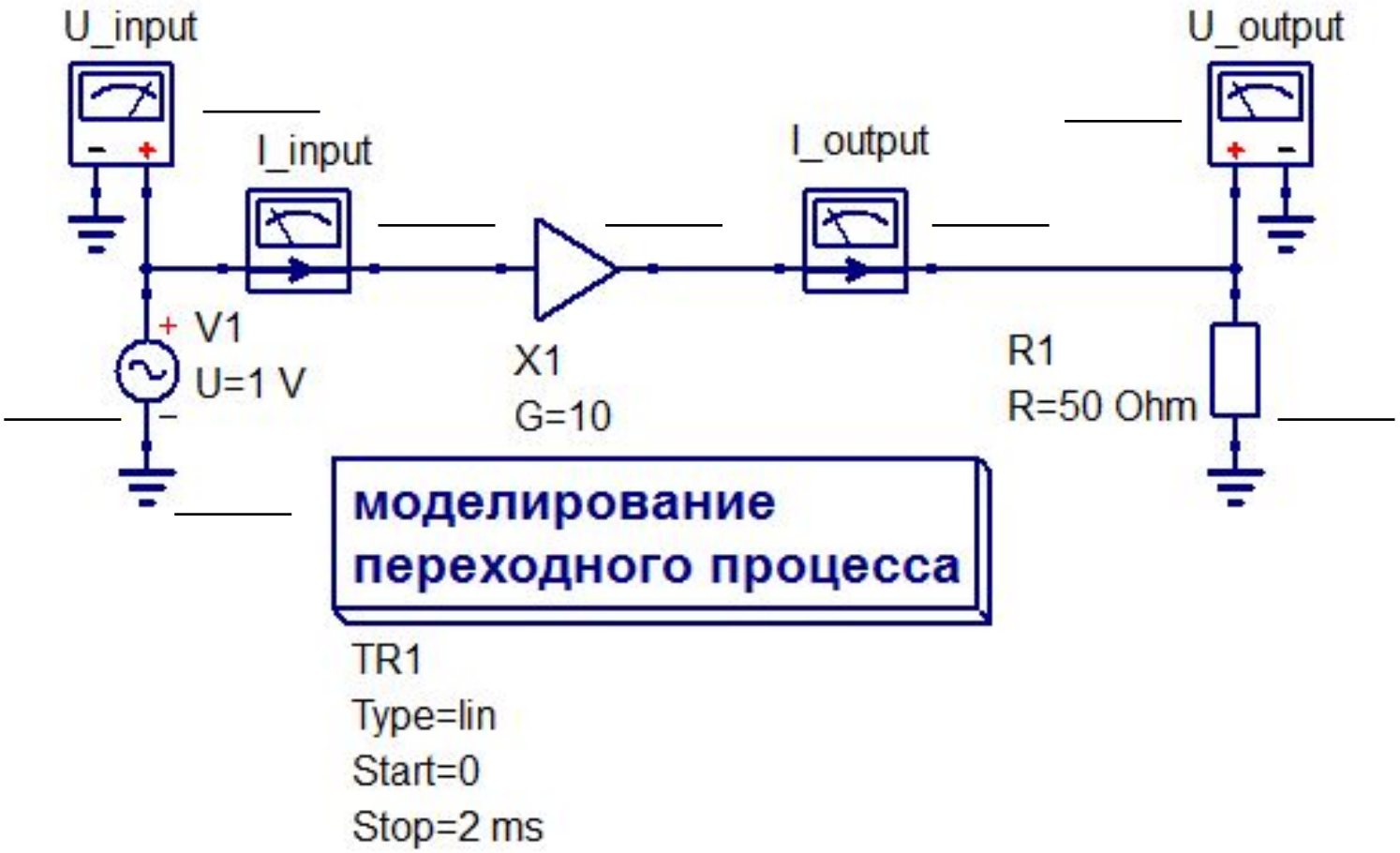
Варьируемым параметром является начальное напряжение на конденсаторе C1 с ___ до ____ В. С целью изменения выходного напряжения в момент замыкания ключа S1.

Напряжения на входе измеряется вольтметром U_input

3. Активность и пассивность

Под активными элементами (функциональными узлами, устройствами) понимаются такие, у которых мощность на выходе больше мощности на входе.

Примерами функциональных узлов являются транзисторы, усилители.



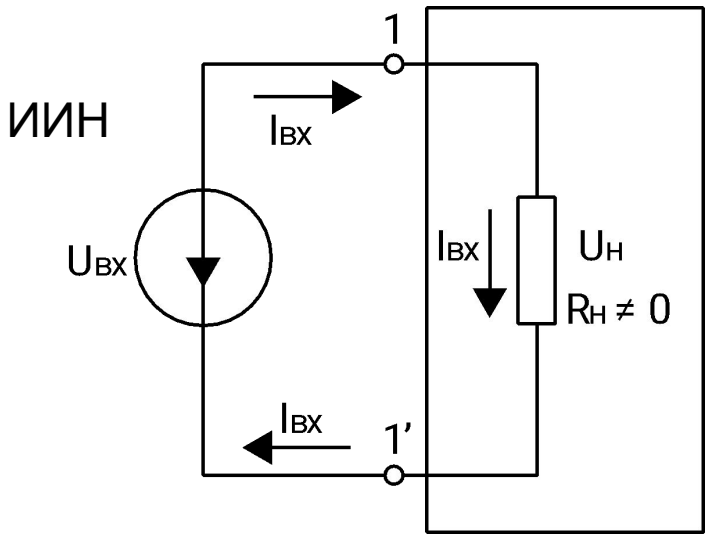
Лекция №1. Идеология авторской образовательной системы Лицея

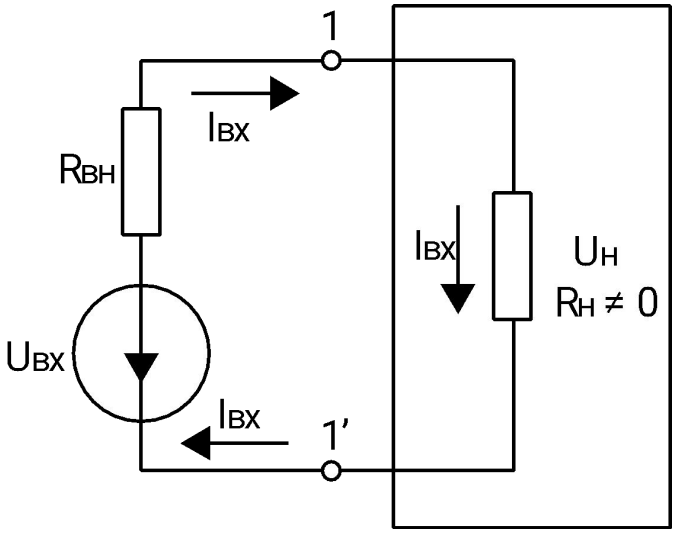
Лекция №1. Идеология авторской образовательной системы Лицея

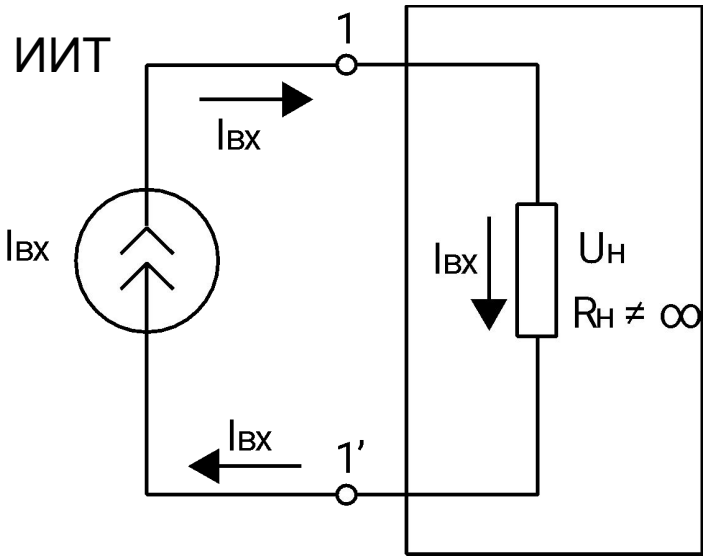
1. Физические модели источников напряжения и тока

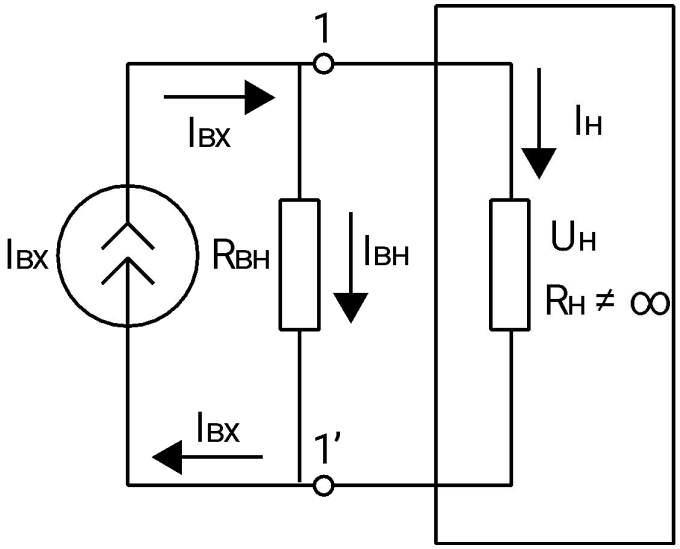
ФИЗИЧЕСКИЕ ОБЪЕТЫ

Гальванические элементы, батареи, аккумуляторы, генераторы гармонических колебаний, выходные зажимы электрической сети и т.д.









2. Математические модели источников напряжения и тока в присутствие нагрузки

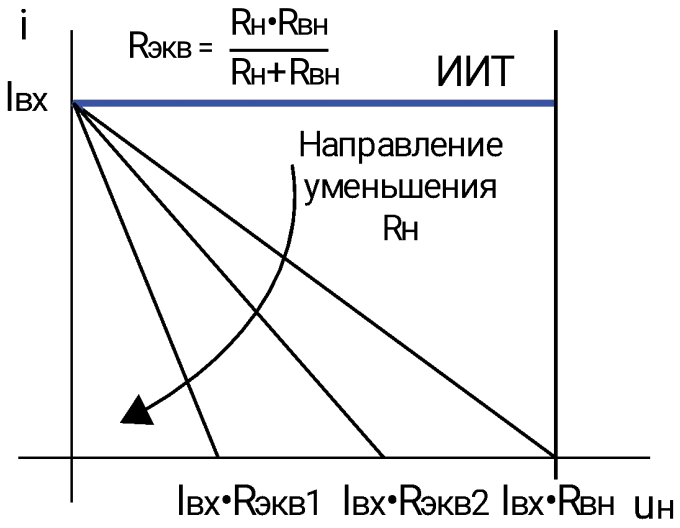


Рис.1.

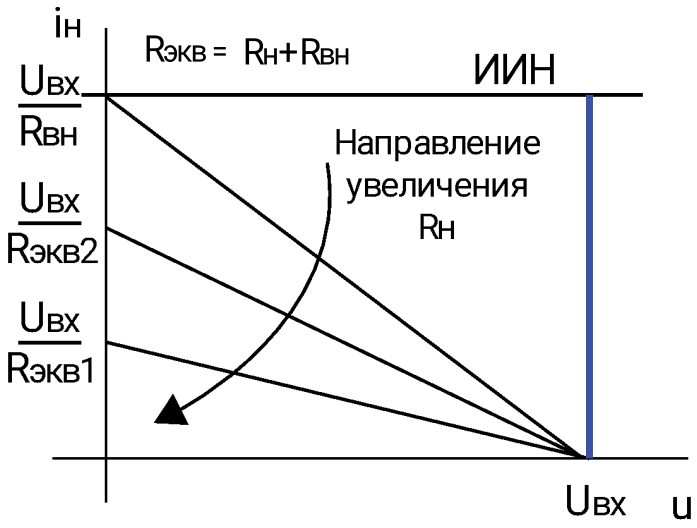


Рис.2.

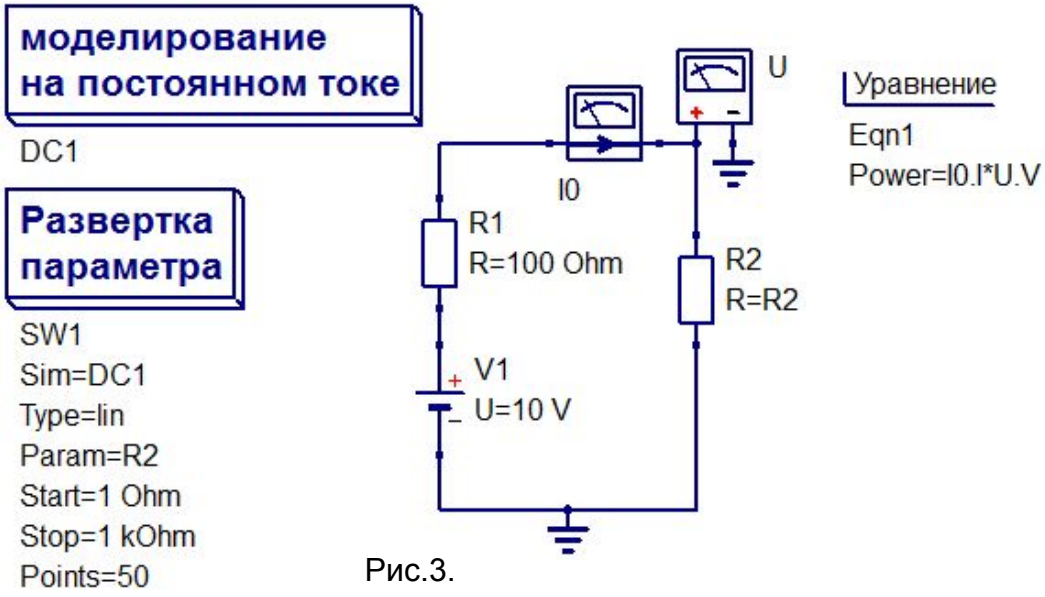


Рис.3.

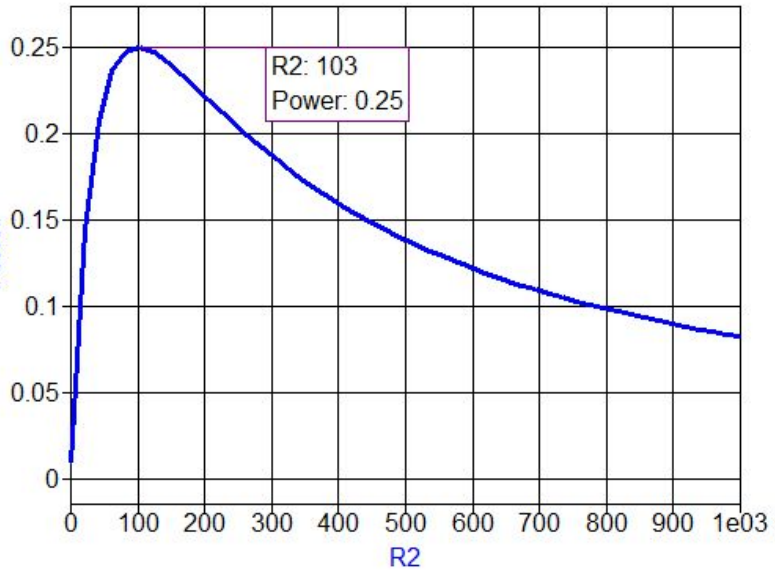
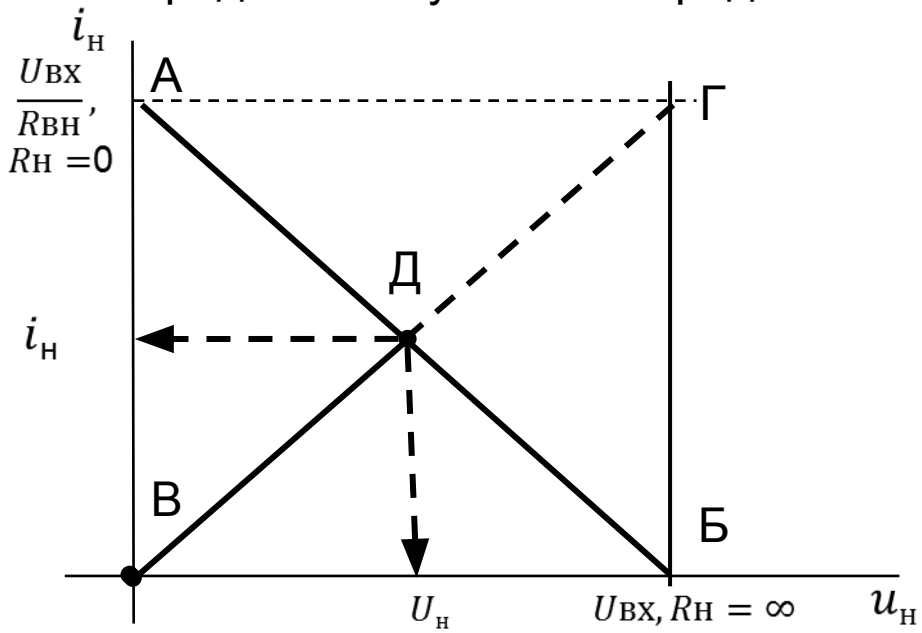
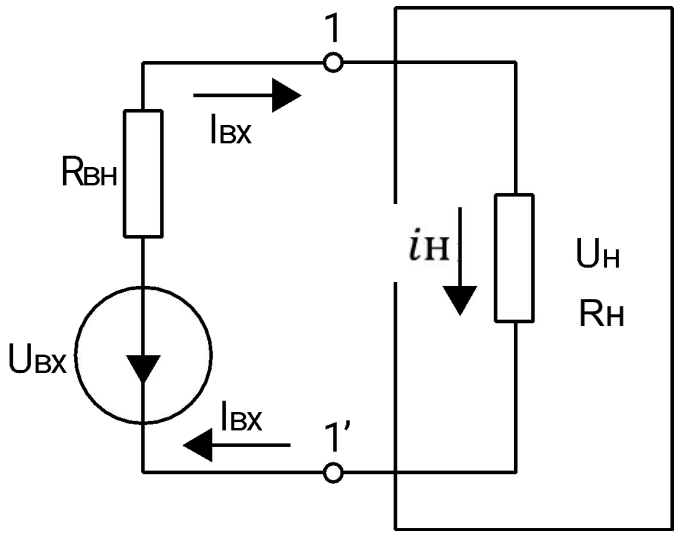


Рис.4.

2. К определению условий передачи мощности в нагрузку (источник напряжения)





Построение вольт-амперной характеристики реального источника напряжения (прямая линия)

1. Если $R_Н = 0$, то $i_Н = i_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{R_{ВН}}$, $U_Н = 0$ (координата точки А)
2. Если $R_Н = \infty$, то $i_Н = 0$ и $U_Н = U_{ВХ}$ (координата точки Б)

Построение вольт-амперной характеристики элемента $R_Н$

1. По закону Ома $i = \frac{U}{R}$ прямая линия ВГ (напряжение пропорционально току)

Полученный результат представляет собой совместное графическое решение системы двух уравнений

$$\begin{cases} i_Н = i_{ВХ} = \dfrac{U_{ВХ}}{R_{ВН} + R_Н} \\ U_Н = i_Н \cdot R_Н \end{cases}$$

3. Аналитический вывод условия максимальной передачи мощности

Согласно схеме реального источника напряжения ток $I_{вх}$, протекающий через $R_{вн}$ и $R_н$ равен:

$$I_{вх} = \frac{U_{вх}}{R_{вн} + R_н} \quad (1)$$

Напряжение на нагрузке $U_н$ в свою очередь определяется как:

$$U_н = I \cdot R_н = \frac{U_{вх}}{R_{вн} + R_н} \cdot R_н \quad (2).$$

Тогда мощность, выделяющаяся на нагрузке равна:

$$P_н = I \cdot U_н = \frac{U_{вх}}{R_{вн} + R_н} \cdot \frac{U_{вх}}{R_{вн} + R_н} \cdot R_н = \frac{{U_{вх}}^2 \cdot R_н}{(R_{вн} + R_н)^2} \quad (3)$$

При обозначении сопротивления нагрузки через внутреннее сопротивление как $R_н = k \cdot R_{вн}$, мощность на нагрузке $P_н$ приобретает вид:

$$P_н = \frac{{U_{вх}}^2}{R_{вн}} \cdot \frac{k}{(1+k)^2} \quad (4),$$

позволяющий через коэффициент k найти условие максимальной мощности.

Если k равно *0.98*, то $\frac{k}{(1+k)^2}$ равно 0.249, если k равно *1.01* то $\frac{k}{(1+k)^2}$ равно 0.242.

Так как смещение отношения сопротивлений k влево и вправо приводит к уменьшению мощности рассеиваемой в нагрузке, можно предположить, что максимальная мощность выделяется при k равном 1.

Лекция №1. Идеология авторской образовательной системы Лицея

Лекция №1. Идеология авторской образовательной системы Лицея

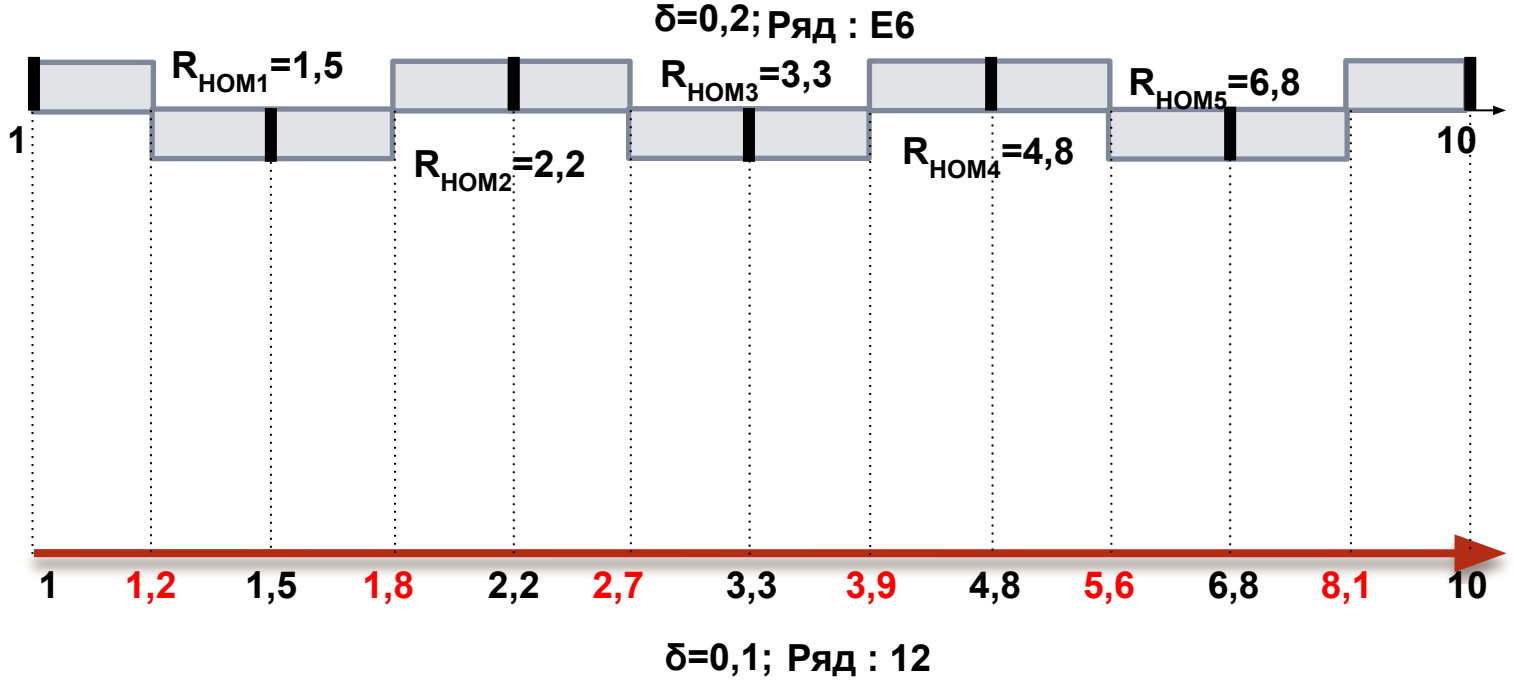
Резисторы: определение, назначение, основные параметры, конструкции

Рези́стор (англ. *resistor*, от лат. *resisto* — сопротивляюсь) – элемент, основным свойством которого является перевод электрической энергии в тепловую. Идеальный резистор – безынерционный линейный элемент, основным параметром которого является сопротивление ***R***, которое согласно закону Ома: ***u(t)=R*i(t)*** представляет собой коэффициент пропорциональности между током, протекающим через резистор, и возникающим на резисторе напряжением ***U.***
Основное назначение резистора: деление и сложение напряжений и токов, формирование режима работы нелинейных активных элементов, обеспечение выделения в нагрузке максимальной мощности.

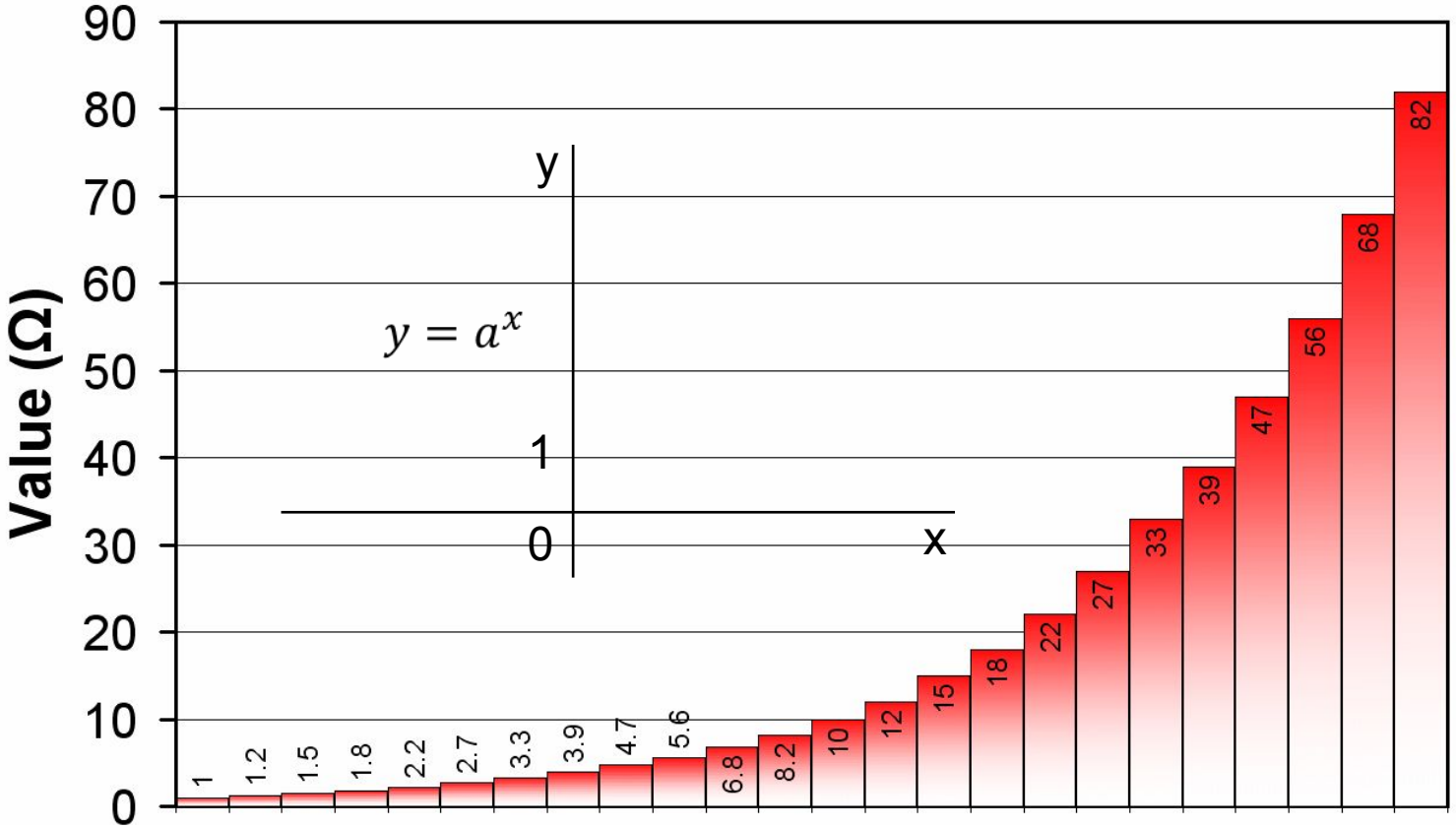
Основные параметры резисторов:
Номинальное сопротивление (***Rном***), разброс номиналов(**δ**), номинальная рассеиваемая мощность (***Рном***), температурный коэффициент сопротивления (***ткс***), надежность резистора: вероятность отказа (***Ротк***), вероятность безотказной работы (***Рбр***), интенсивность отказов (***λ***)

Номинальное сопротивление

Номиналы сопротивлений промышленно выпускаемых резисторов не являются произвольными. Существуют специальные ряды номиналов, представляющие собой множества значений от 1 до 10 (декада). Номинал резистора определённого ряда является произвольным значением из соответствующего множества, зависящего от допуска на относительную погрешность отклонения от номинала (**δ**).



Установление связи между номинальной величиной сопротивления и допусками (разбросами)



Нетрудно заметить, что номиналы резисторов представляют собой геометрическую прогрессию. Прогрессия вытекает из условия равенства относительных отклонений разбросов влево и вправо относительно номинальных значений.

$$R_{ном}1 \cdot (1+\delta) = R_{ном}2 \cdot (1-\delta)$$
$$R_{ном}2 \cdot (1+\delta) = R_{ном}3 \cdot (1-\delta)$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$R_{ном}N-1 \cdot (1+\delta) = R_{ном}N \cdot (1-\delta)$$

Таким образом,

$$\frac{R_{ном}N}{R_{ном}0} = \left(\frac{1+\delta}{1-\delta}\right)^N = 10$$

Это делает возможным путем решения показательного уравнения определить, как количество номиналов в декаде, так и их величины. Воспользуемся для решения пакетом Scilab для трех величин разброса δ=0.2, δ=0.1, δ=0.05 (определена как счетчик цикла d). Результатом поиска функцией fsolve корней уравнения, определенного с помощью deff, является количество номиналов в декаде

```
-->for d=[0.2 0.1 0.05]                          Цикл для δ=[0.2 0.1 0.05]
-->deff('[y]=f(x,d)','y=((1+d)/(1-d)).^x-10')    Определяем функцию
-->fsolve(0,f)                                   Находим корень
-->end                                           Конец цикла
 ans  =    5.6788736                             Ответы для δ=0,2
 ans  =   11.474446                              δ= 0,1
 ans  =   23.00665                               δ= 0,05
```

Надёжность изделия

Надежность - свойство изделия сохранять значения установленных **параметров функционирования в определённых пределах, соответствующих заданным режимам** и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортировки. В понятие надежность входят такие свойства как: безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость

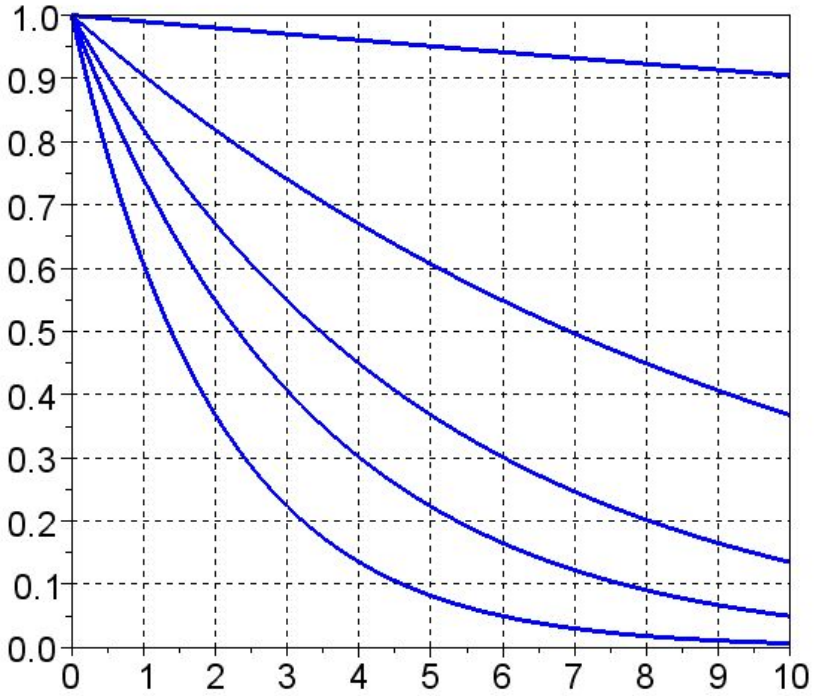
Основное понятие, используемое в теории надёжности, — понятие отказа, т. е. утраты работоспособности, наступающей либо внезапно (либо постепенно). Для оценки надежности при внезапных отказах используются количественные параметры:

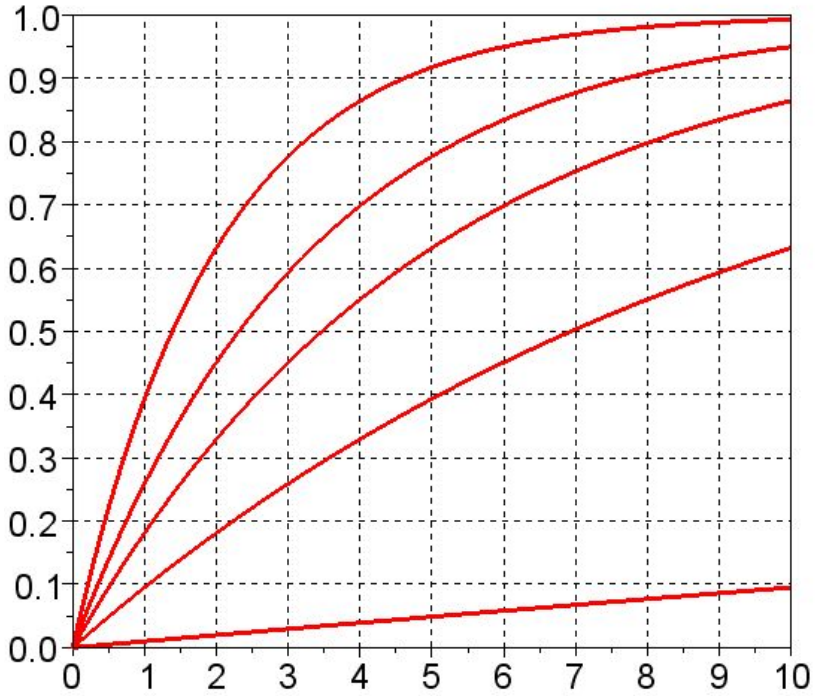
1. Интенсивность отказов λ - отношение числа отказавших объектов (образцов аппаратуры, изделий, деталей, механизмов, устройств, узлов и т. п.) в единицу времени к среднему числу объектов, исправно работающих в данный отрезок времени при условии, что отказавшие объекты не восстанавливаются и не заменяются исправными:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{[N - n(t)]\Delta t}\left[\frac{1}{\text{час}}\right],$$

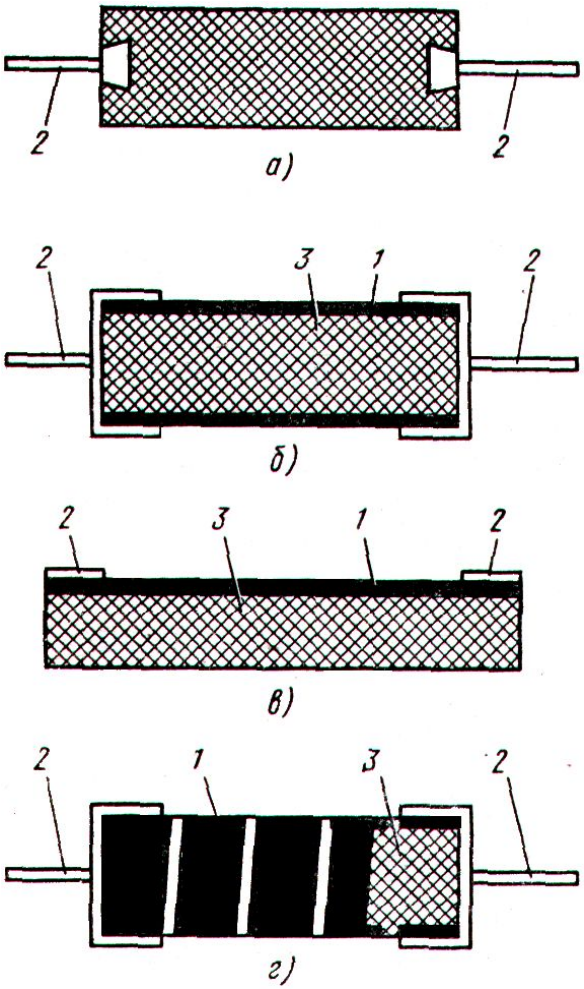
где N — общее число рассматриваемых изделий;
n(t) — число отказавших образцов в интервале времени от Δt — интервал времени;
где N — число исправно работающих образцов в начале интервала Δt;

Вероятности безотказной работы $P_{бр} = e^{-\lambda t}$ и отказа $P_{отк} = 1 - e^{-\lambda t}$ при λ = 0,01; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5





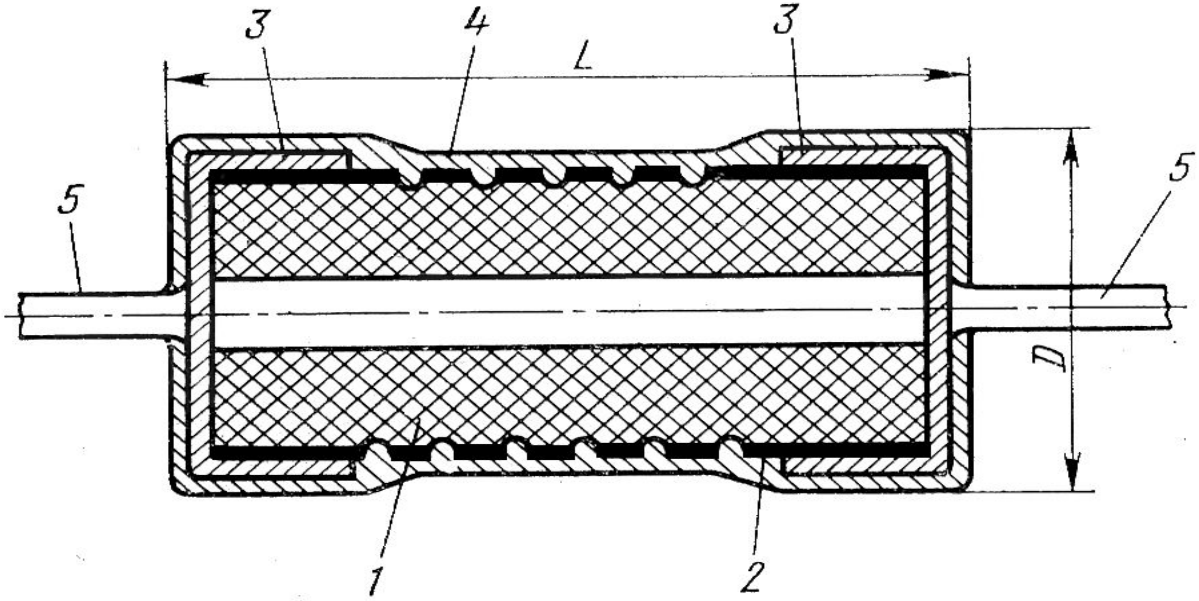
КОНСТРУКЦИИ РЕЗИСТОРЫ ПОСТОЯННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ



а. объемный (цилиндрический) с выводами
б. цилиндрический с пленочным поверхностным резистивным слоем
в. плоский с пленочным поверхностным резистивным слоем
г. цилиндрический со спиральным резистивным слоем на керамической базовой детали и с выводами

1. резистивный слой
2. вывод
3. несущий фрагмент конструкции

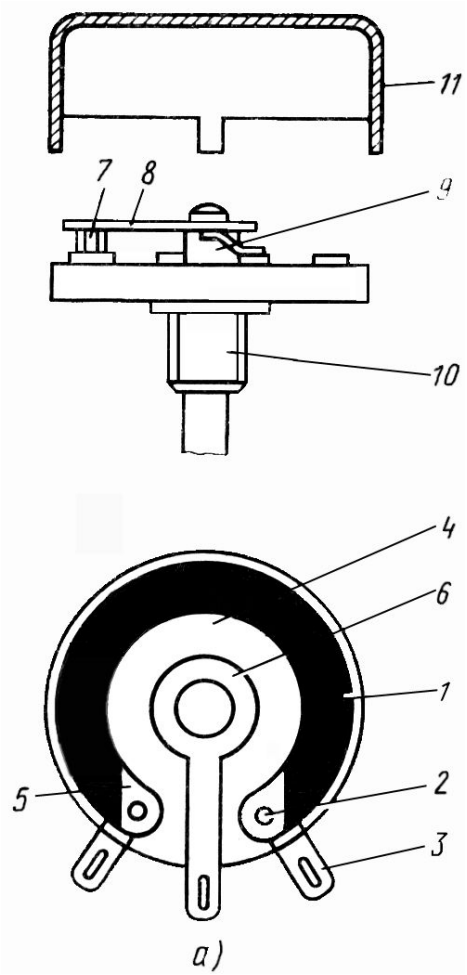
Конструкция резисторов типа МЛТ



1. керамическое основание («трубка»)
2. проводящий элемент
3. контактный узел
4. защитное покрытие
5. выводы

Конструкция пленочных резисторов переменного сопротивления

1. проводящий элемент
2. заклепка
3. вывод
4. основание
5. резистивный элемент в виде скобы с пленочным проводящим элементом
6. контактный вывод
7. контактная щетка
8. основание (поводок) контактной щетки
9. ось
10. резьбовая втулка (для крепления резистора)
11. защитный кожух

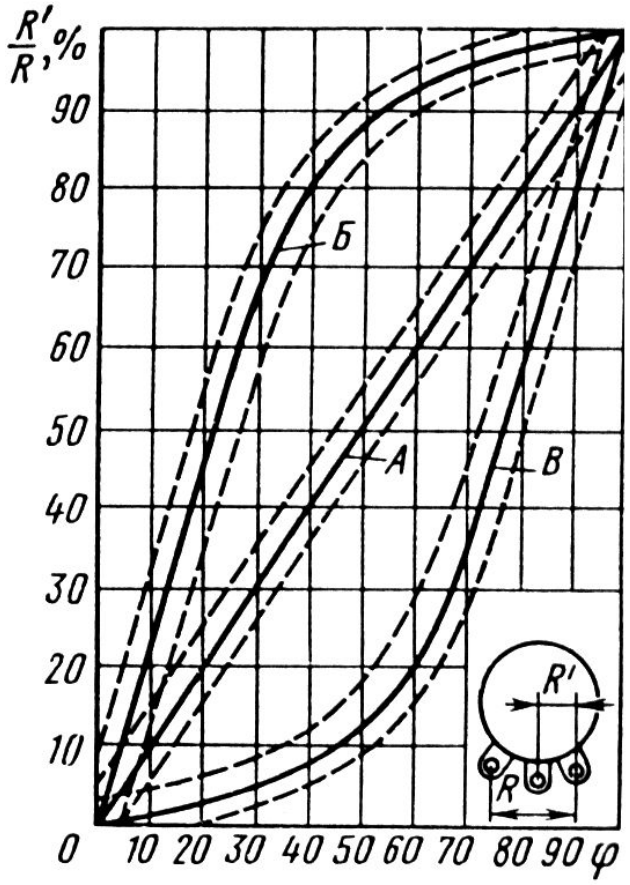


Функциональные характеристики переменных резисторов

А. линейная

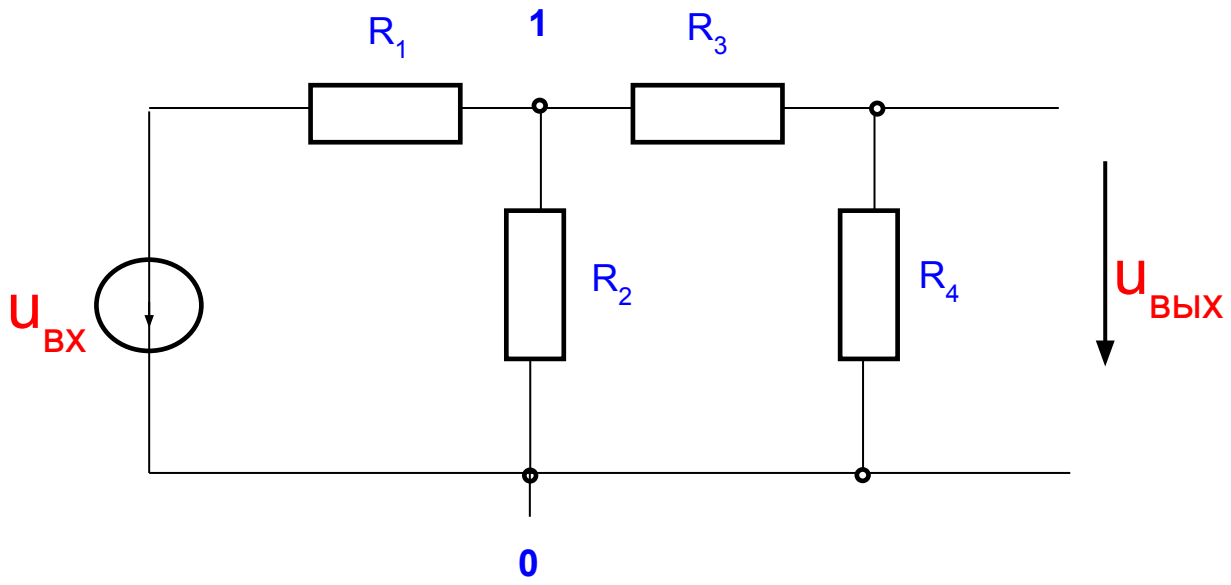
Б. логарифмическая

В. обратно – логарифмическая (пунктир обозначает области допустимых значений)



РАСЧЕТ ФУ НА ЛИНЕЙНЫХ БЕЗЫНЕРЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Основные понятия электрической цепи: топология, узлы, ветви контура, законы Кирхгофа



Узел: точка, в которой «объединяются» более двух двухполюсников

- узлы (_____).
- Ветвь: двухполюсник, включенный между двумя узлами.
- Контур: замкнутая совокупность ветвей, в которой ни один узел не встречается дважды контура (_____).
- Независимые контура: те, которые не могут быть получены из совокупности других контуров в анализируемой схеме.
- Независимые узлы: те, в которых объединяются разные совокупности ветвей.

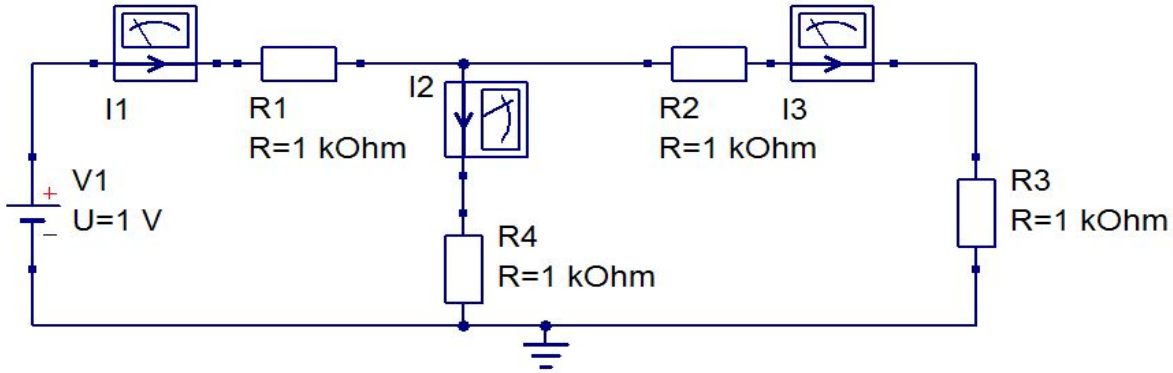
Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

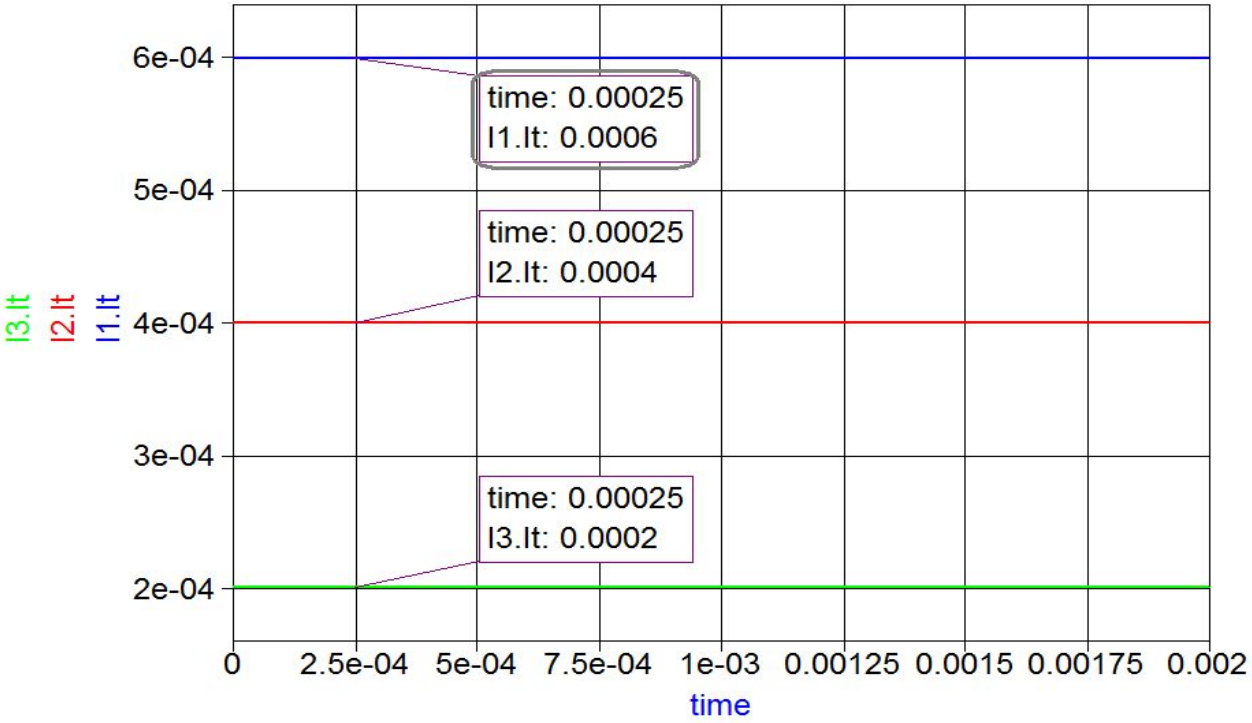
Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма напряжений в замкнутом контуре равна нулю.

Правила анализа схем с помощью законов Кирхгофа:

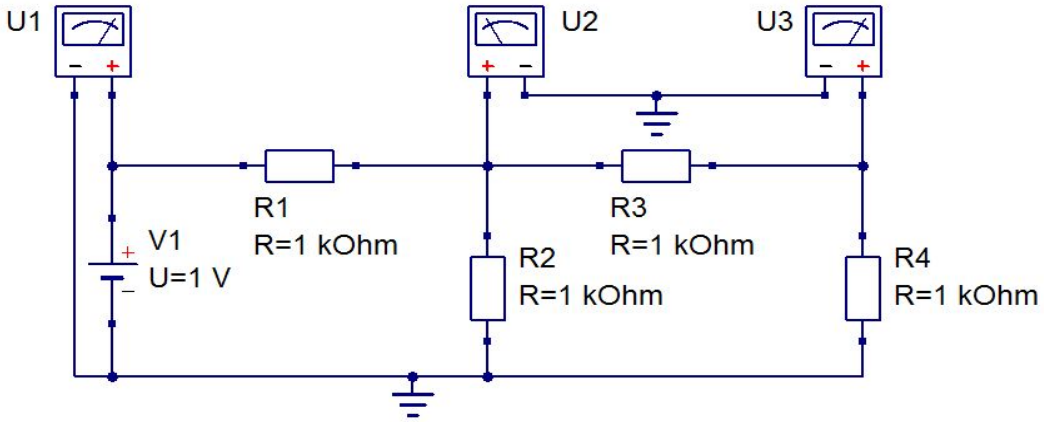
- Выделить и обозначить независимые узлы (_____).
- Выделить и обозначить независимые контура (_____).
- Задаться направлениями токов в ветвях и направлениями обхода контуров.
- Выбрать метод анализа (“существует много способов исполнения песни стаи, и каждый способ хорош по-своему” – Акела [Киплинг «Маугли»]).

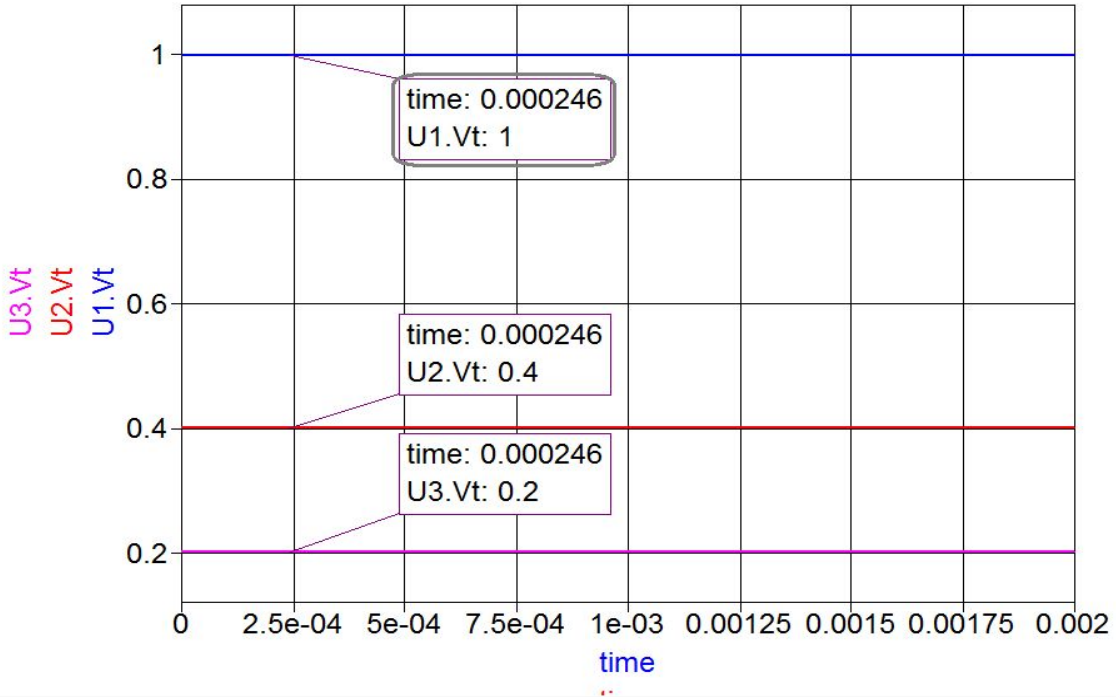
Пример №1 Резистивный делитель напряжения (определение токов в ветвях, источник постоянного напряжения)



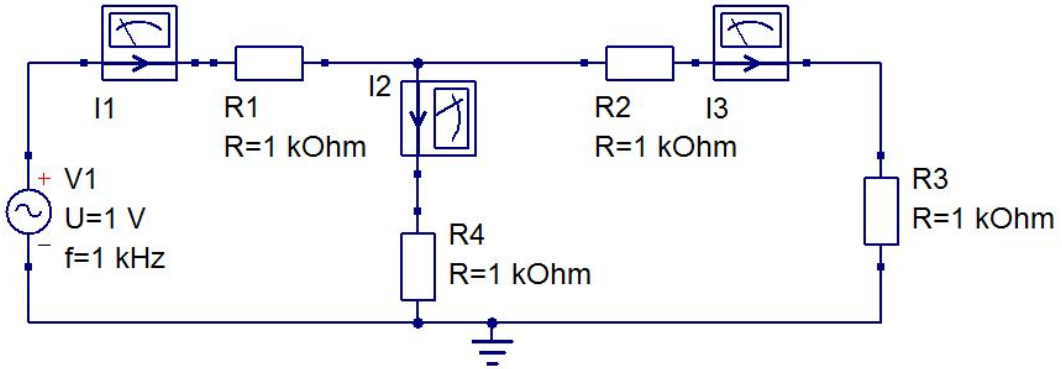


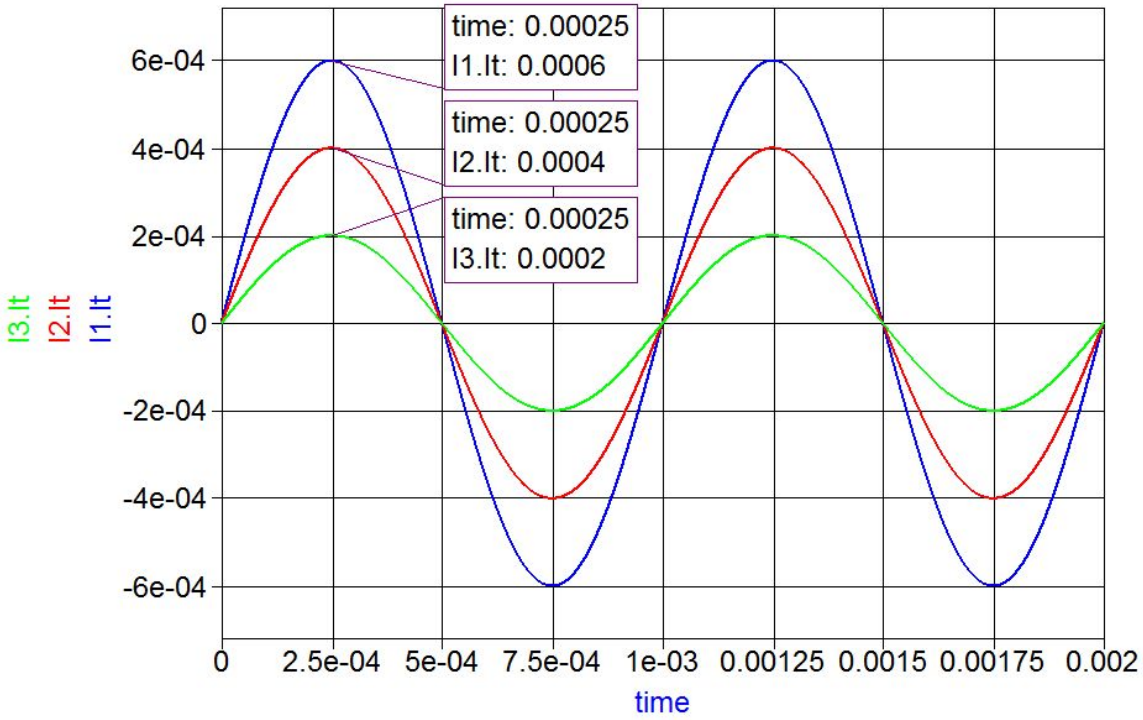
Пример №1 Резистивный делитель напряжения (определение напряжений в узлах, источник постоянного напряжения)



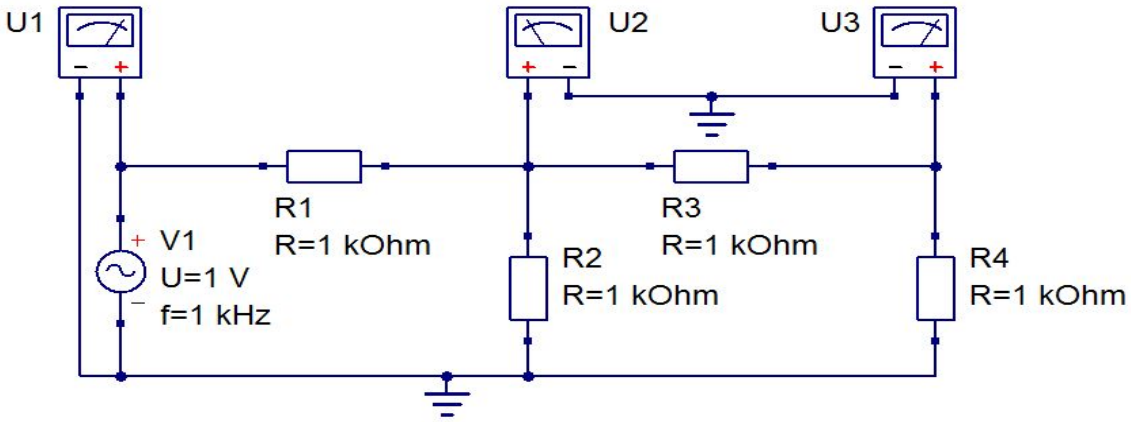


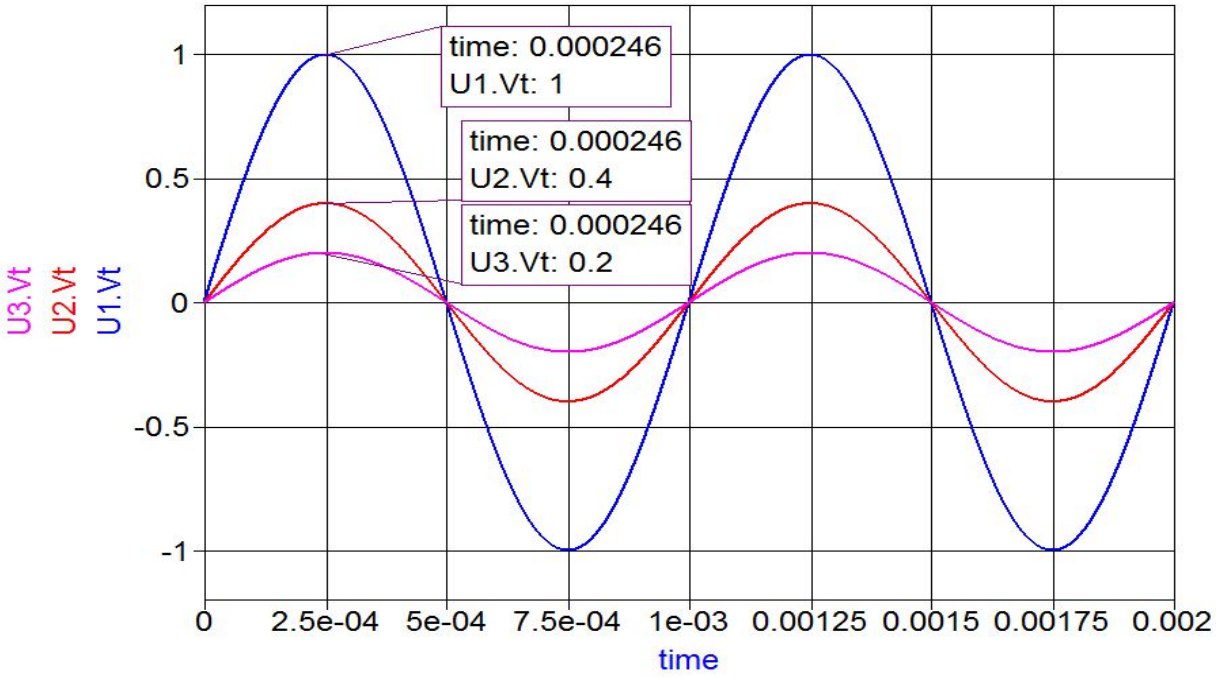
Пример №1 Резистивный делитель напряжения (определение токов в ветвях, источник переменного напряжения)





Пример №1 Резистивный делитель напряжения (определение напряжений в узлах, источник переменного напряжения)





Расчет в пакете SciLab

Решение уравнения в матричной форме A*X+B=0

```
A=[1000,1000,0;0,-1000,2000;1000,-1000,-1000]
B=[-1;0;0]
X=linsolve(A,B)
 X  =

    0.0006
    0.0004
    0.0002
```

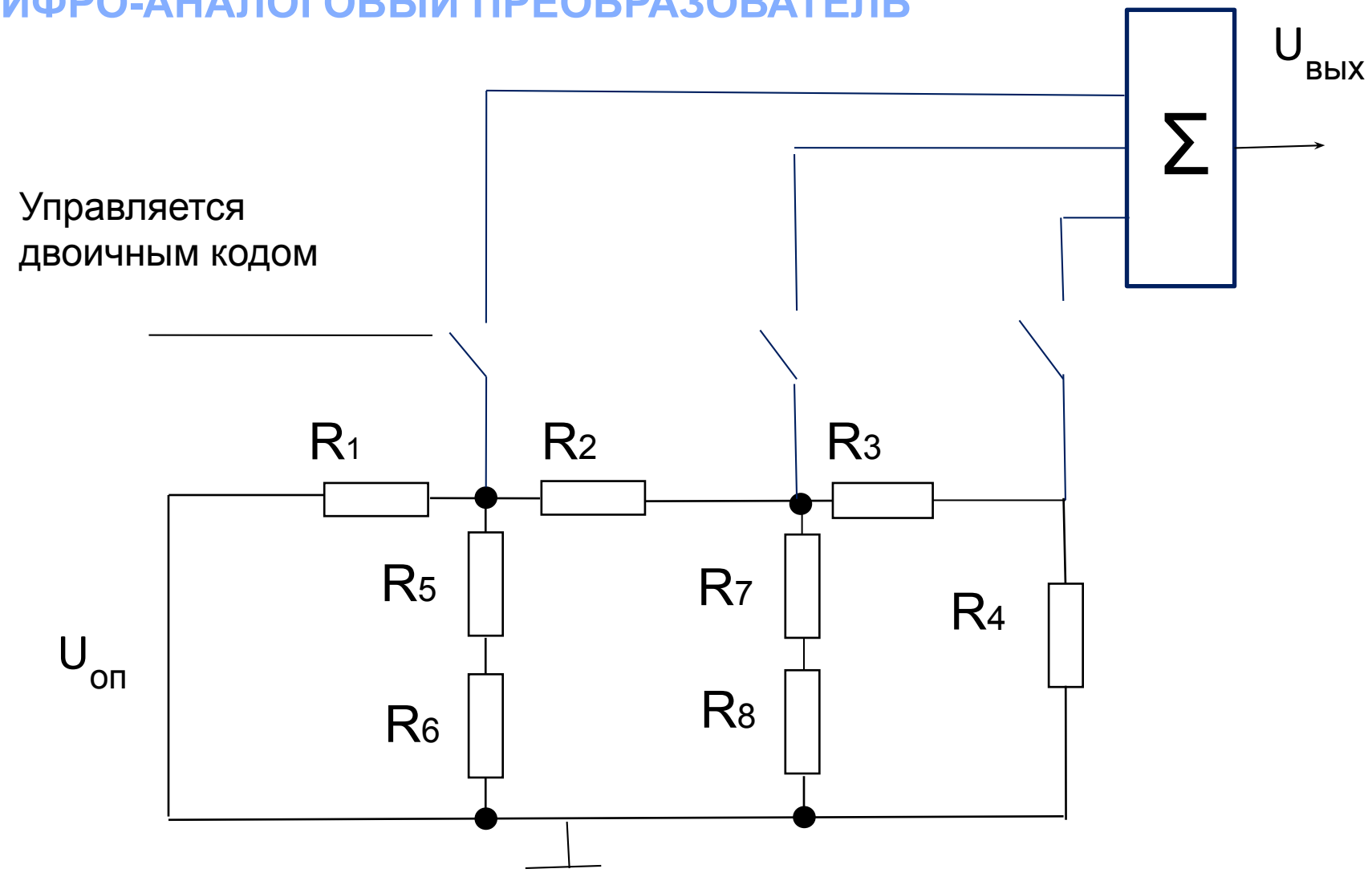
Определяем матрицу A
Определяем матрицу B
Находим решение уравнения

Расчет в пакете SciLab

Решение уравнения в матричной форме A*X+B=0

R=4000	Сопротивление резистора
U0=1	Входное напряжение
A=[R,R,0;0,-R,2*R;R,-R,-R]	Матрица сопротивлений
B=[-U0;0;0]	Матрица напряжений
I=**linsolve**(A,B)	Решение системы ур-ий
U(3)=I(3)*R	Находим напряжения
U(2)=U(3)+I(2)*R	
U(1)=U(2)+I(1)*R	

ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ



КОМПЛЕКСНАЯ РАБОТА №1

«ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗЫНЕРЦИОННЫХ ПАССИВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ СРЕДСТВ СВЯЗИ».

Задание

- **Цель работы**: исследование свойств резистивной матрицы R-2R.
- **Содержание задания**:

1. Изготовить объект исследования, описать его.
2. Составить физическую модель исследуемого функционального узла.
3. Составить математическую модель исследуемого функционального узла.
4. Провести «инженерную» оценку (прогноз) ожидаемых результатов по заданным преподавателем номиналам элементов.
5. Провести моделирование функционального узла с использованием математического пакета Scilab (СПО).
6. Провести моделирование функционального узла с использованием схемотехнических пакетов Qucs (СПО).
7. Провести экспериментальное исследование функционального узла.
8. Сопоставить результаты прогноза, «ручного» расчета, моделирования и эксперимента.

3.Представляемые текстовые и графические материалы:

3.1 Пояснительная записка, оформленная с использованием текстового процессора OpenOffice.

3.2 Графический материал:

Оценки требуемых характеристик исследуемого функционального узла

Результаты моделирования в виде документа пакета Scilab (СПО).

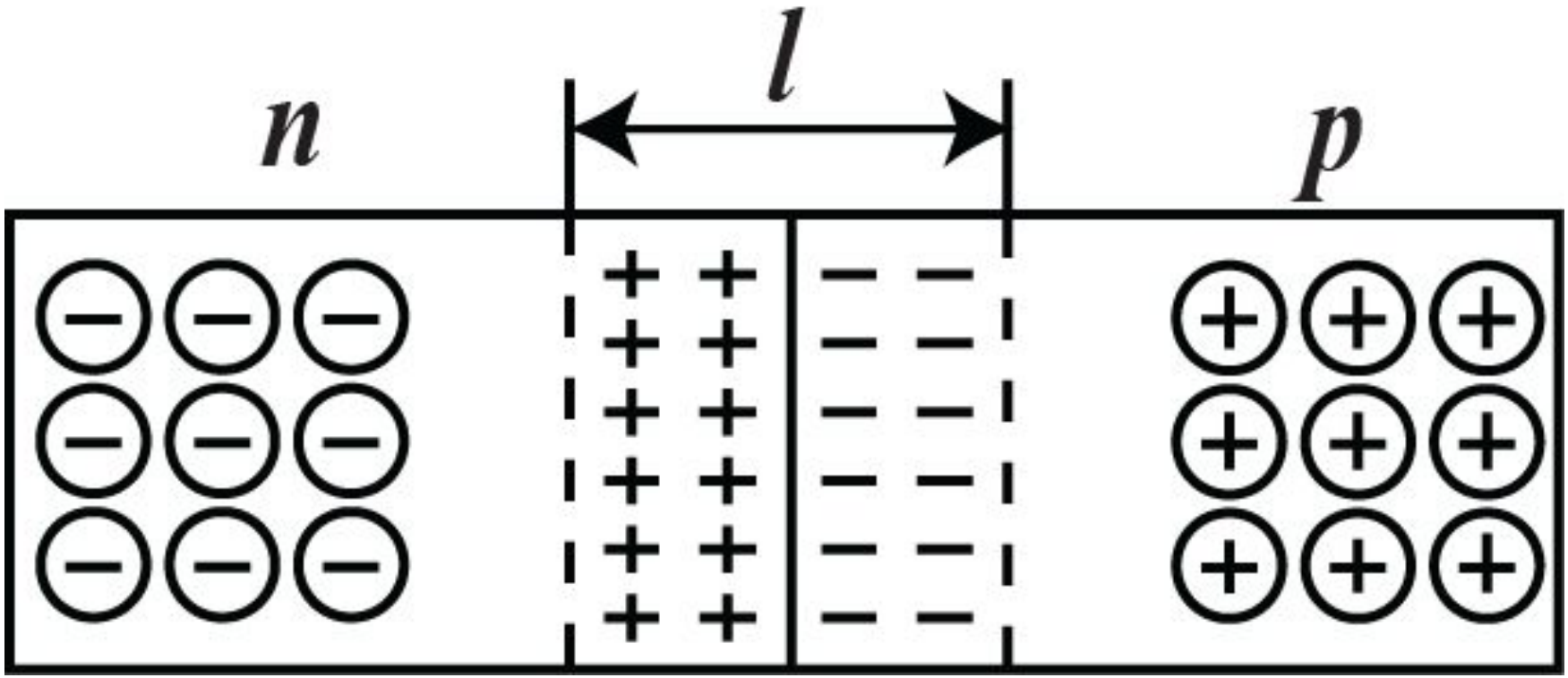
Результаты моделирования в виде документов пакетов Qucs (СПО).

Результаты эксперимента в виде таблиц измерений.

3.3 Аннотация работы (русский и английский).

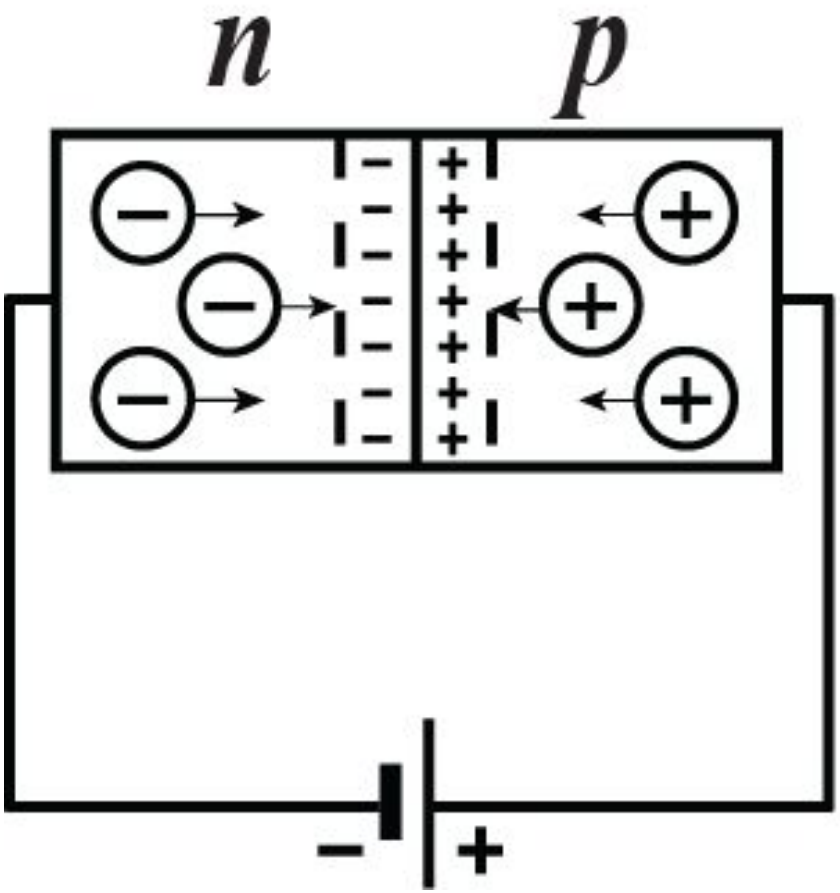
ОПИСАНИЕ РАБОТЫ *P-N* - ПЕРЕХОДА

НЕЛИНЕЙНЫЕ БЕЗЫНЕРЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД)

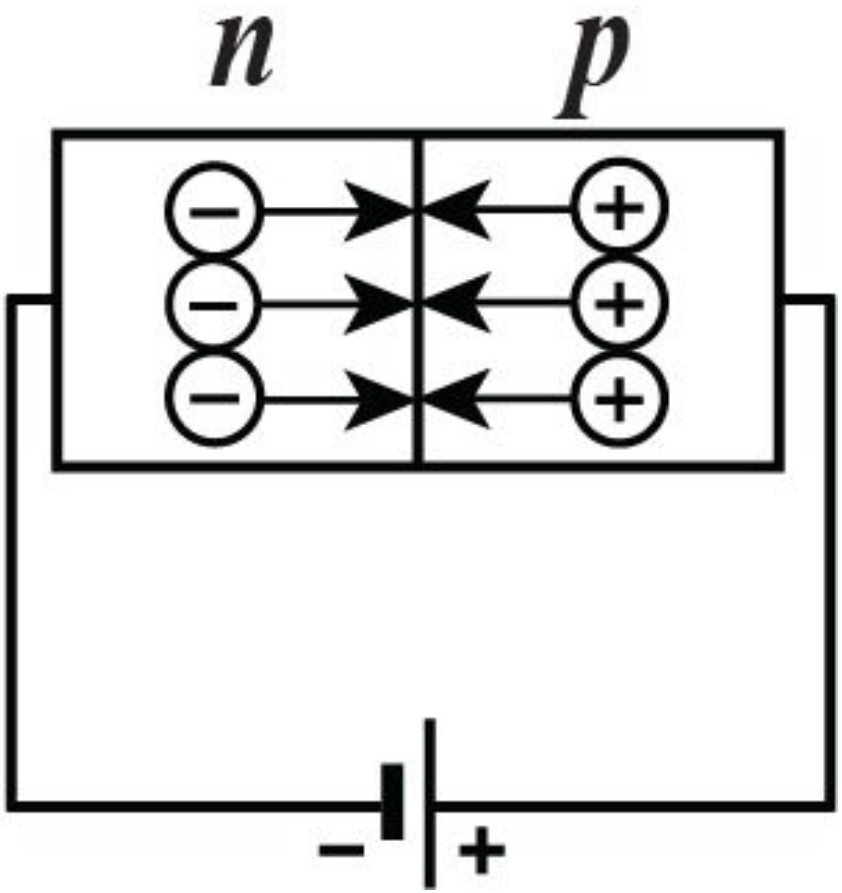


а) Отсутствие внешнего источника

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ *P-N* - ПЕРЕХОДА

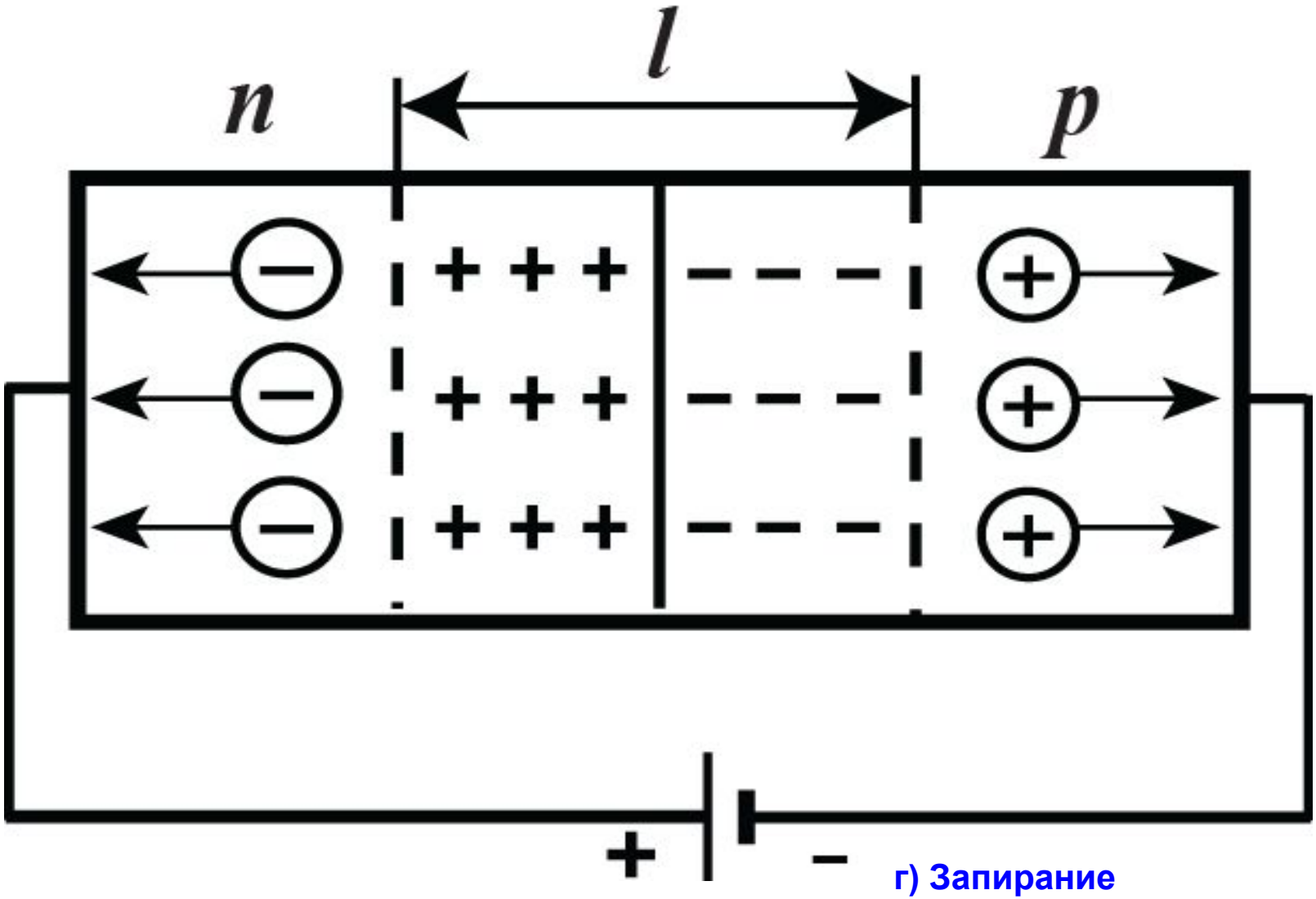


б) Отпирание



в) Насыщение

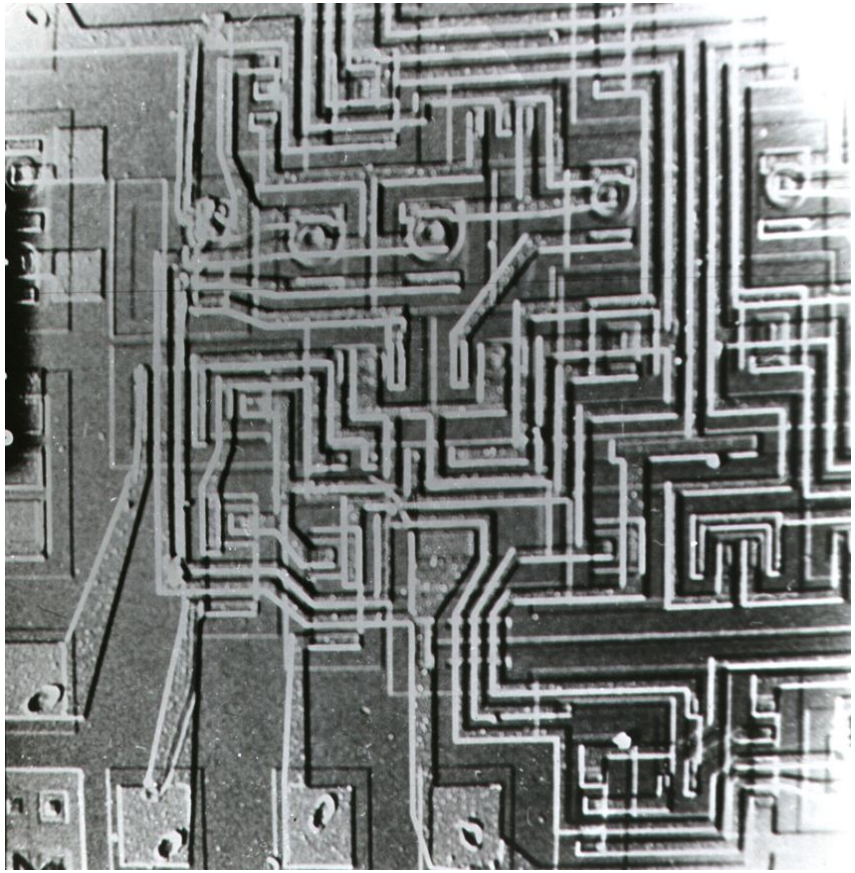
ОПИСАНИЕ РАБОТЫ *P-N* - ПЕРЕХОДА

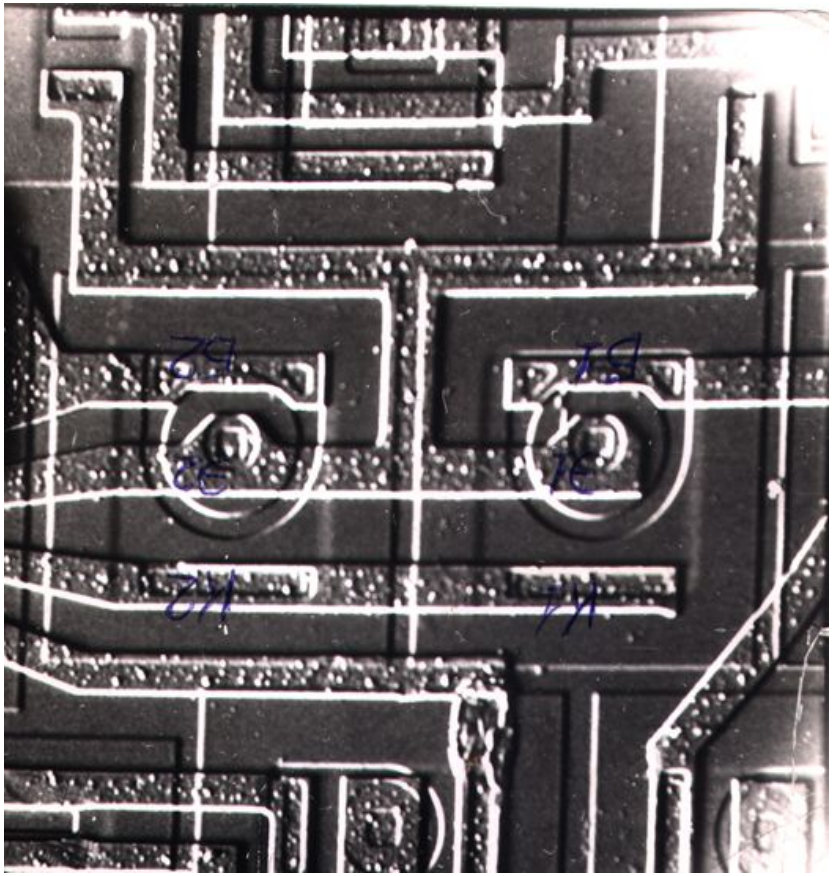


г) Запирание

МИКРОФОТОГРАФИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

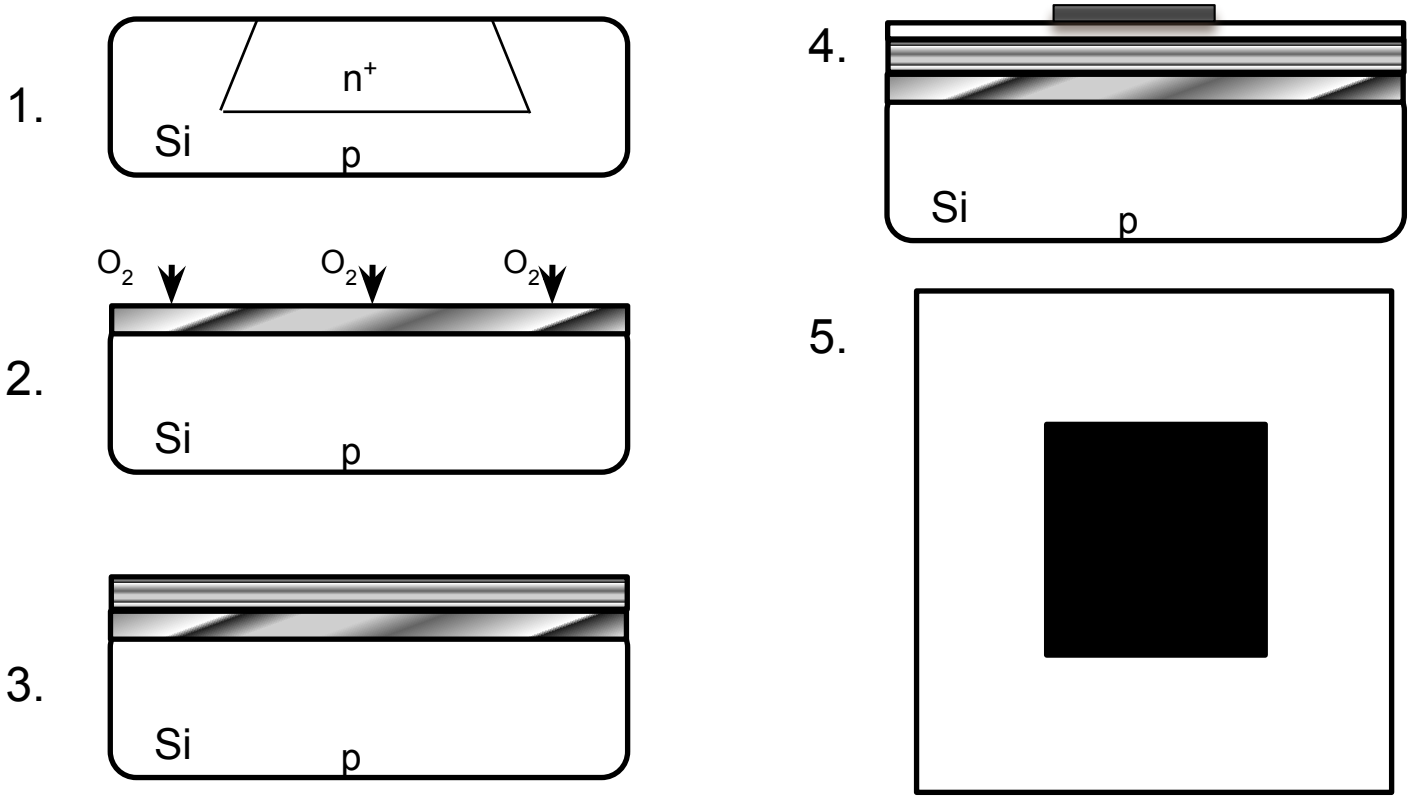
(разное увеличение)





ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАНАРНОГО p-n ПЕРЕХОДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СХЕМЕ

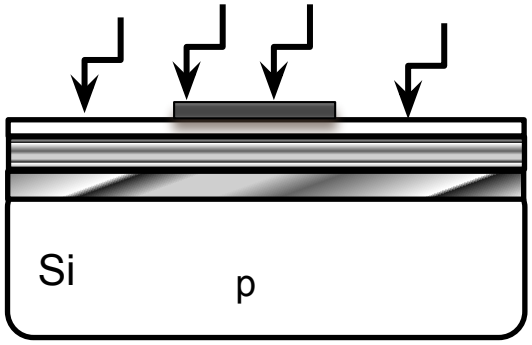
Изготовление планарного p-n перехода - диодная структура (фотолитография)



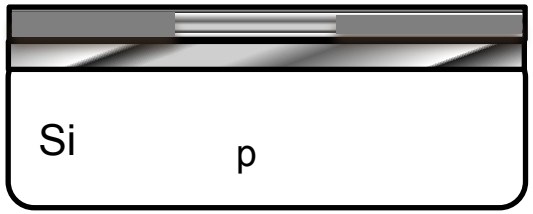
1. Заданная структура 2. Окисление кремния 3. Нанесение фоторезиста
4. Наложение маски 5. Маска

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАНАРНОГО p-n ПЕРЕХОДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СХЕМЕ

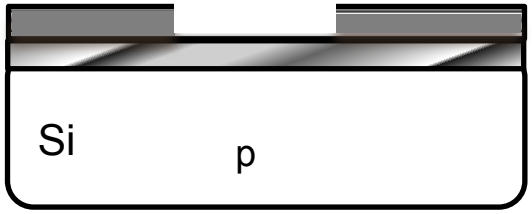
6.



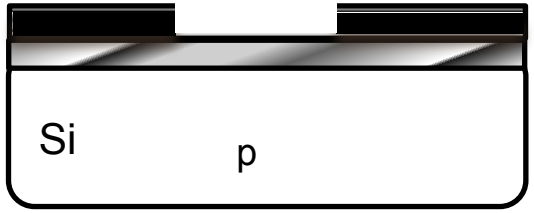
7.



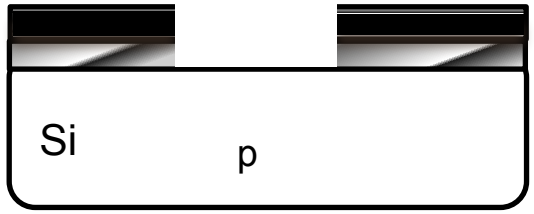
8.



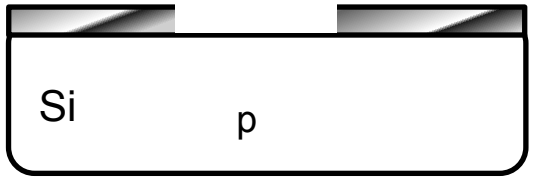
9.



10.



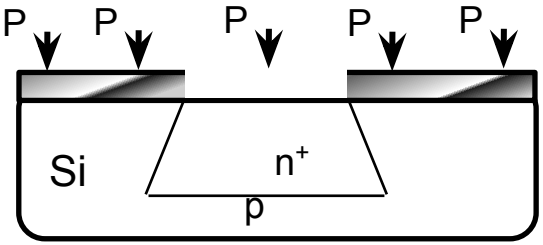
11.



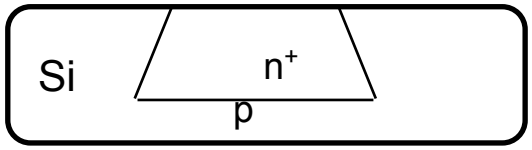
6. Засветка 7. Удаление маски 8. Проявление
9. Задубливание 10. Травление окиси кремния 11. Удаление фоторезиста

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАНАРНОГО p-n ПЕРЕХОДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СХЕМЕ

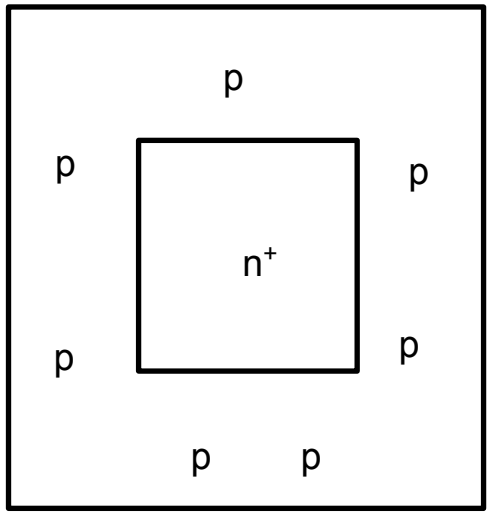
12.



13.

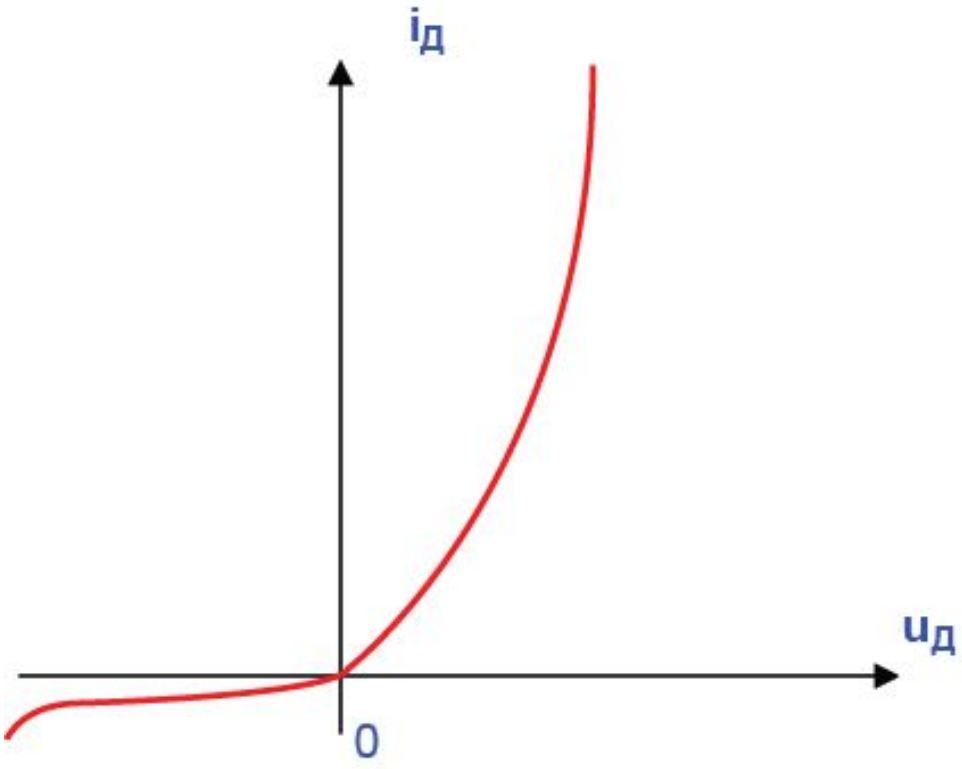


14.



12. Диффузия фосфора (создание n-области)
13. Заданная структура (профиль)
14. Заданная структура (вид сверху)

Вольт-амперная характеристика диода

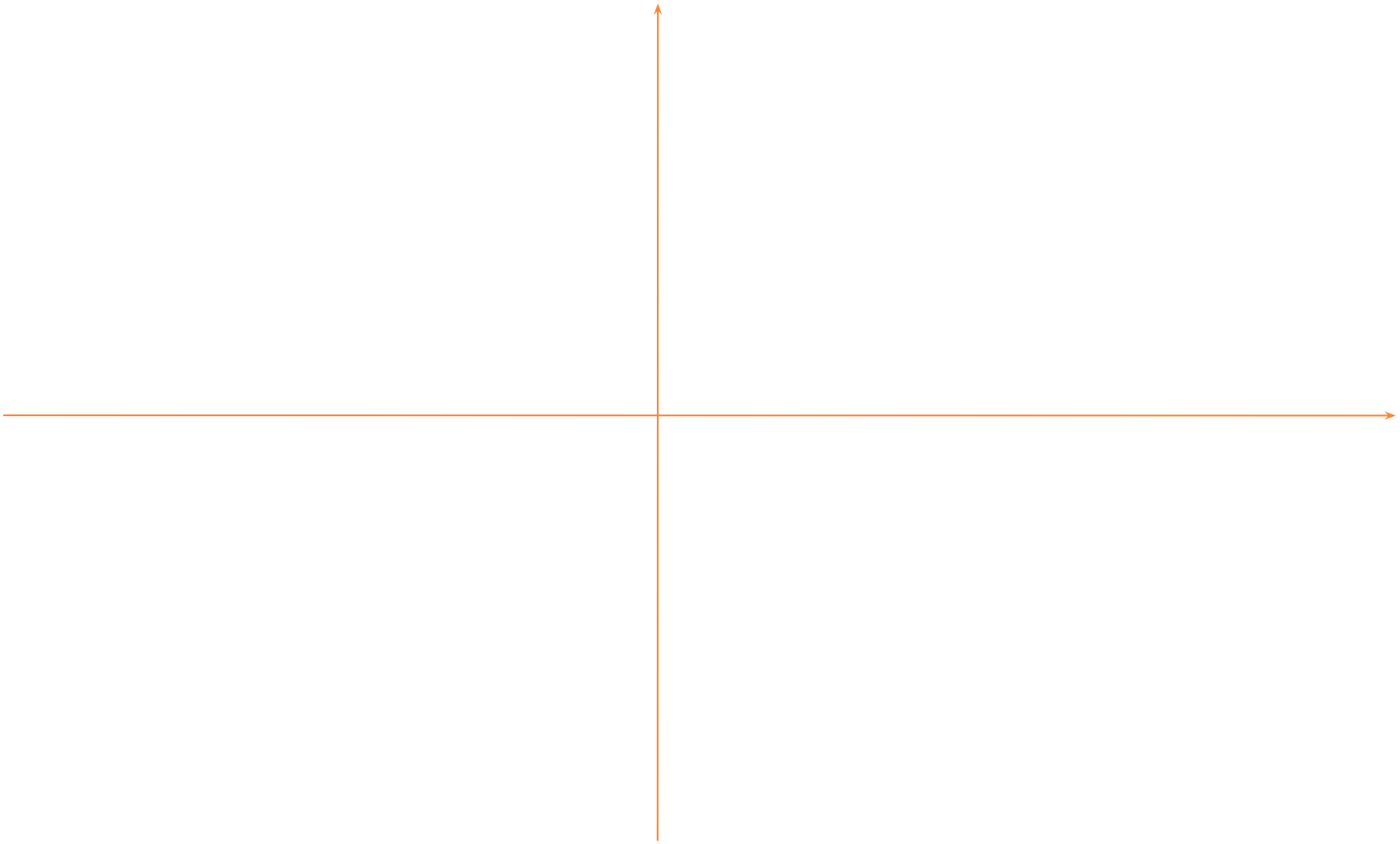


Аналитическая форма записи ВАХ диода: $i_d = I_0(e^{\frac{U_d}{\phi_T}} - 1)$

параметры : I_0 – обратный ток диода (зависит от материала),

φ_T – параметр, определяющий прямой ток (зависит от температуры)

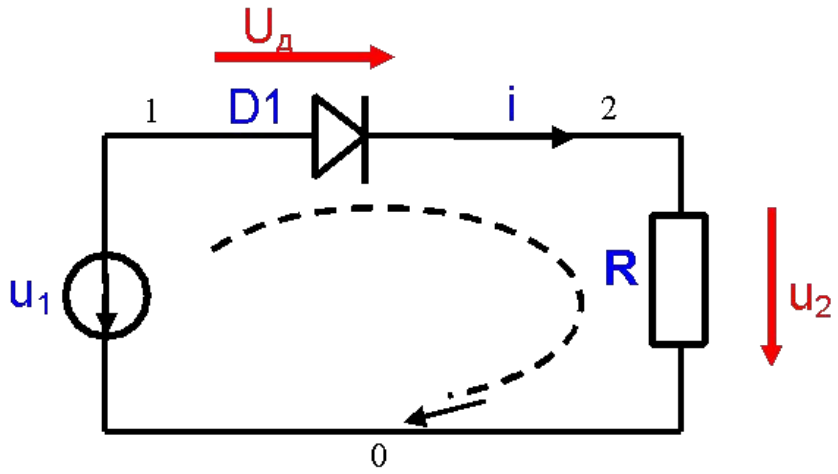
Диоды. Вольт-амперная характеристика (ВАХ), аппроксимация ВАХ



ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУ,
ВКЛЮЧАЮЩИХ В СЕБЯ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (неидеальный диод)

1. Законы Кирхгофа во временной форме сохраняют свою силу.
2. Для безынерционных преобразователей задача определения функциональной характеристики вход – выход приводит к необходимости решения систем нелинейных алгебраических уравнений, для инерционных – систем нелинейных дифференциальных уравнений.

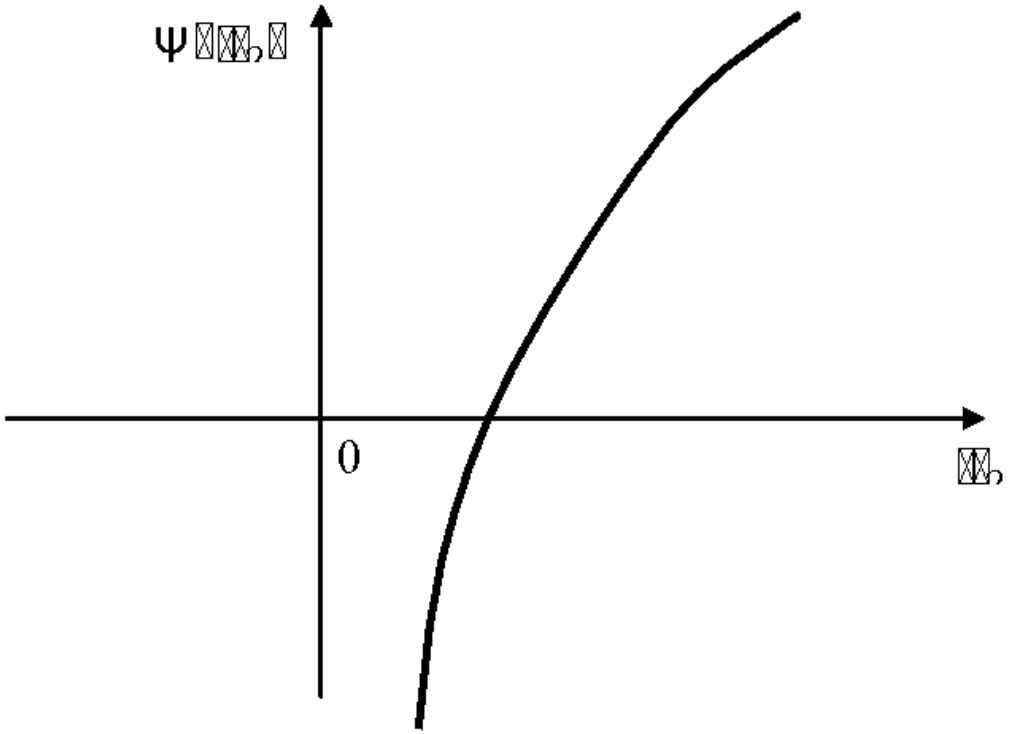
ПРИМЕР 1. Установить взаимосвязь между выходным и входным напряжениями диодного ограничителя вида:



Система уравнений Кирхгофа имеет вид:

Совместное решение системы уравнений приводит к соотношению, несводимому к виду $u_2 = f(u_1)$: $u_1 = \phi_m \ln\left(\frac{u_2}{R \cdot I_0} + 1\right) + u_2$

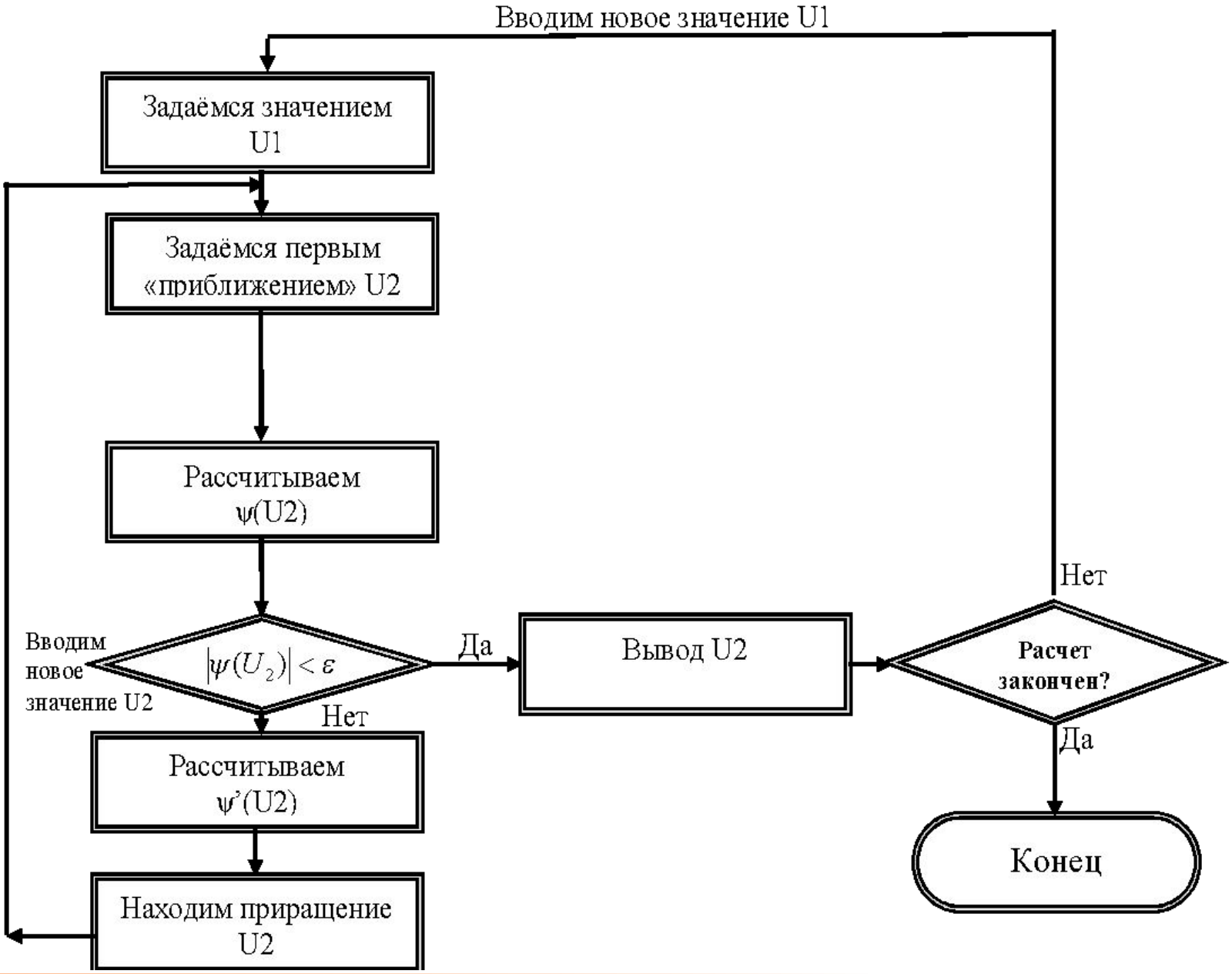
РЕШЕНИЕ. Вводим вспомогательную функцию: $\Psi(u_2) = u_T \ln\left(\frac{u_2}{R \cdot I_0} + 1\right) + u_2 - u_1$ и ищем точку её пересечения с осью u_2 (абсцисс) при фиксированном u_1



Получаем первую пару переменных u_1 и u_2. Расчет повторяется циклически для посторения графика $u_2 = f(u_1)$

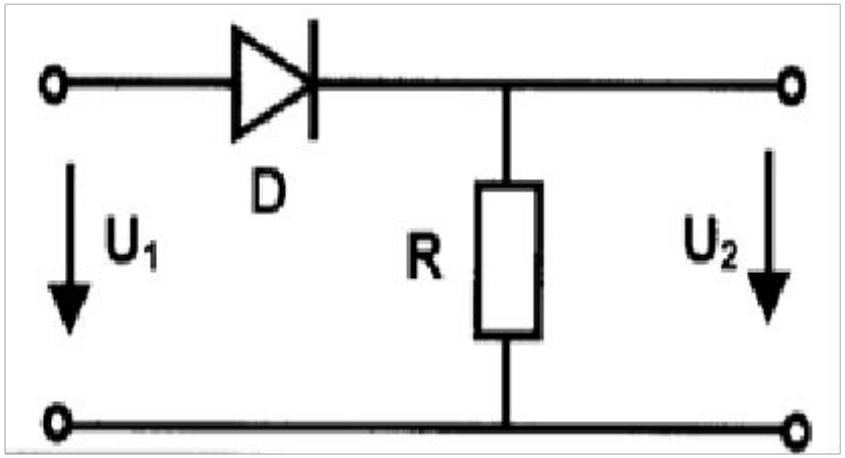
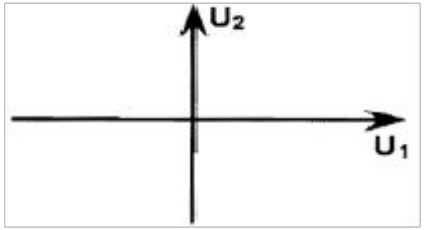
РЕШЕНИЕ 2. (численное).

ГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АЛГОРИТМА ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ

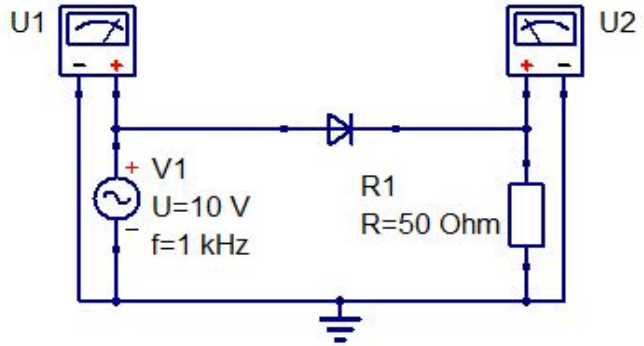

Вводим новое значение U1
Задаёмся значением U1
Задаёмся первым «приближением» U2
Рассчитываем ψ(U2)
Вводим новое значение U2
$|\psi(U_2)| < \varepsilon$
Да
Нет
Вывод U2
Расчет закончен?
Нет
Да
Конец
Рассчитываем ψ'(U2)
Находим приращение U2

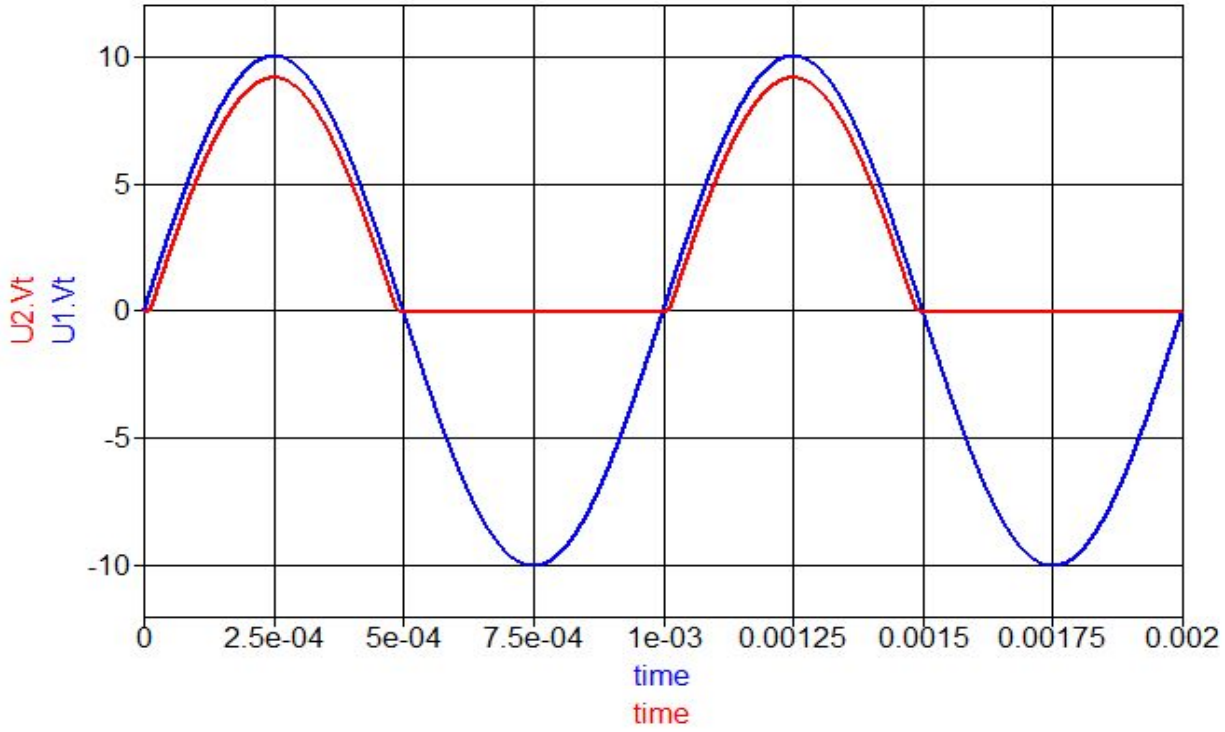
БЕЗЫНЕРЦИОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

№	СХЕМА	Функциональная характеристика U2=f(U1) (амплитудная характеристика)	Назначение
1			

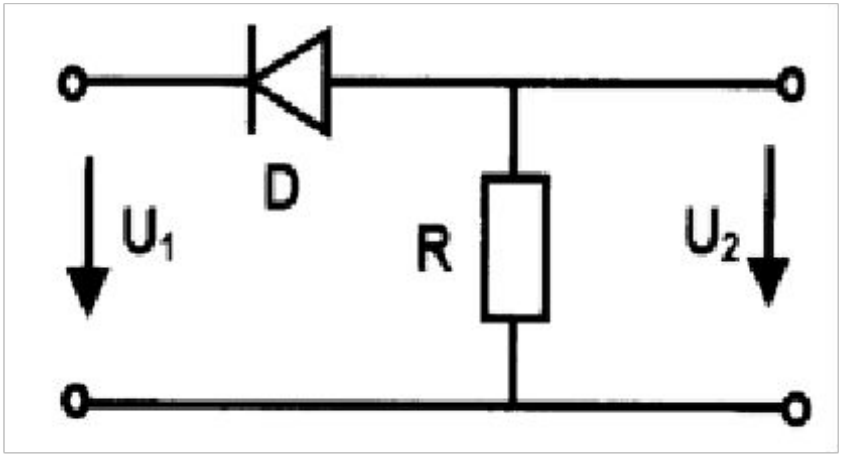
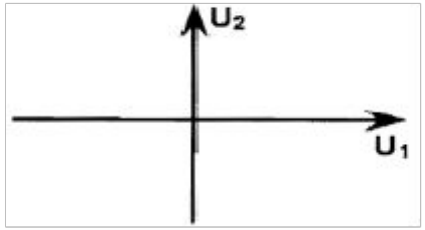
Пример №2 Моделирование диодного ограничителя в СПО (Qucs)





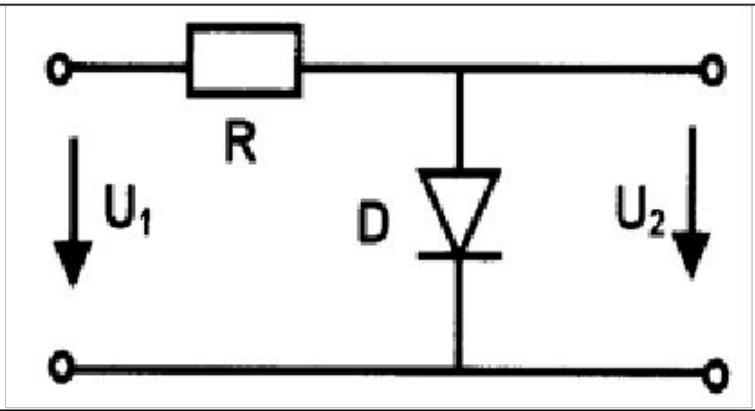
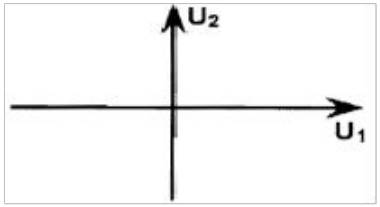
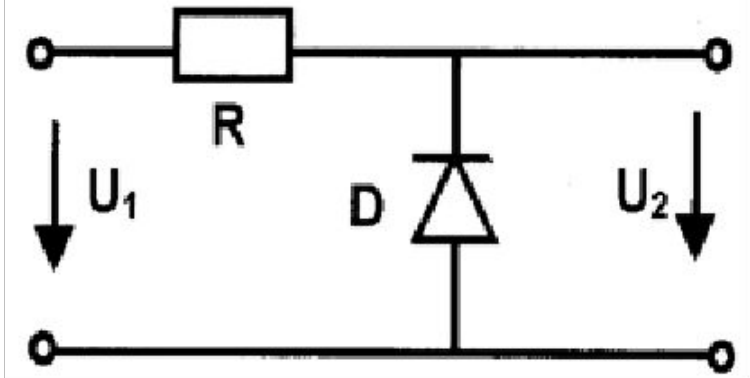
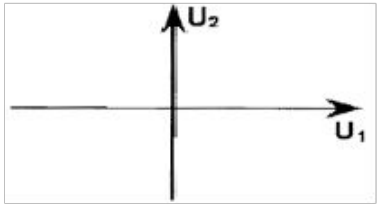
БЕЗЫНЕРЦИОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

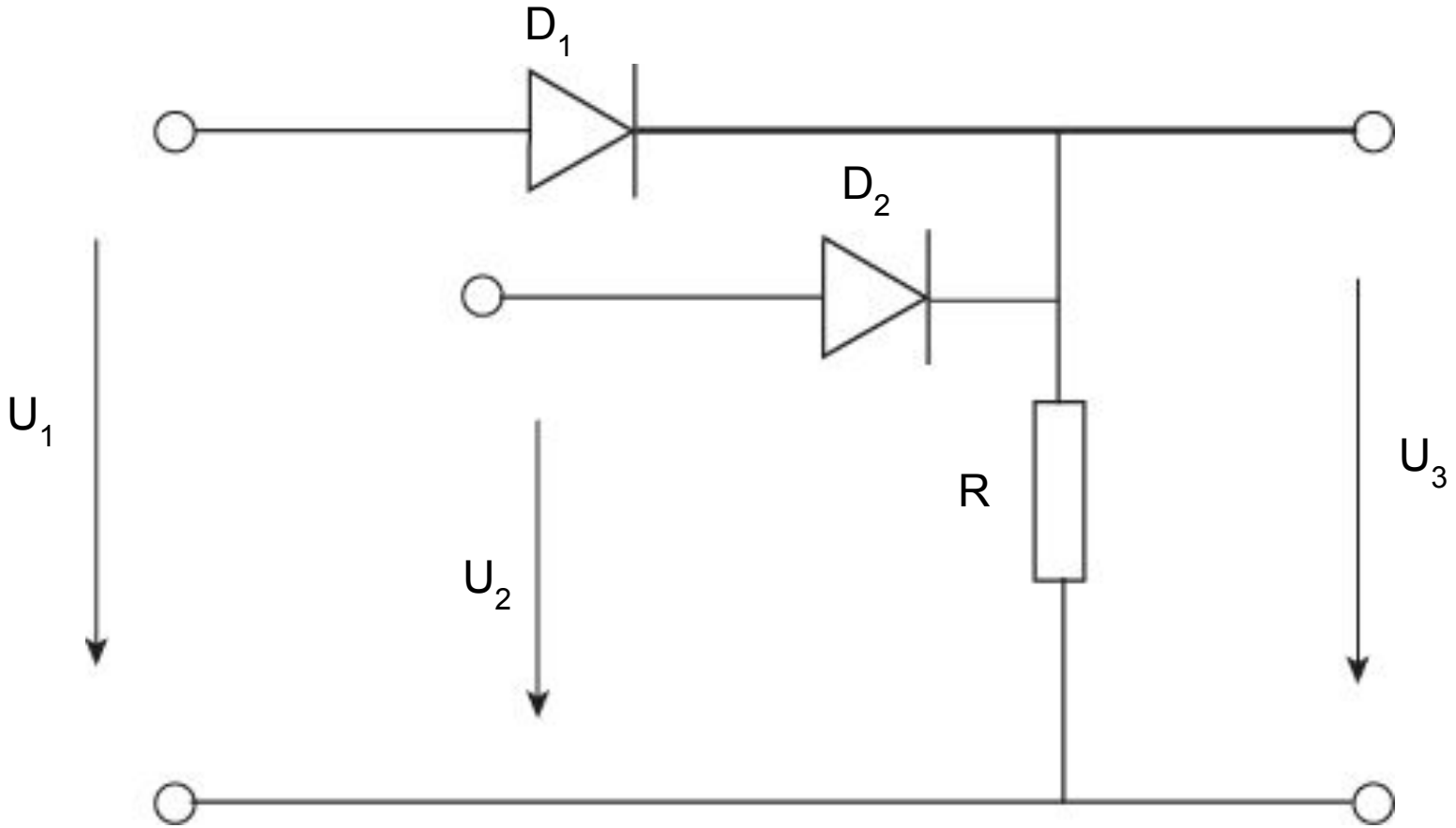
№	СХЕМА	Функциональная характеристика U2=f(U1) (амплитудная характеристика)	Назначение
2			

БЕЗЫНЕРЦИОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

№	СХЕМА	Функциональная характеристика U2=f(U1) (амплитудная характеристика)	Назначение
3			
4			

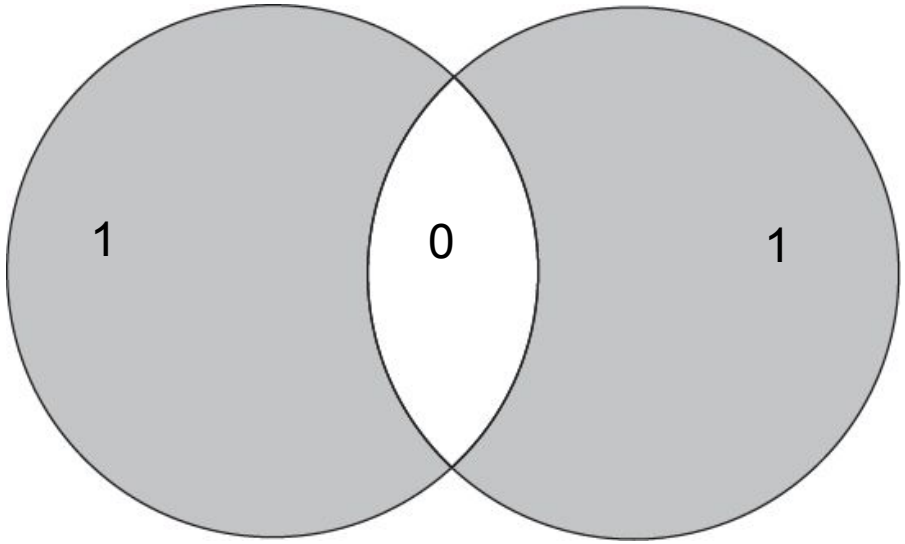
Безынерционные логические элементы

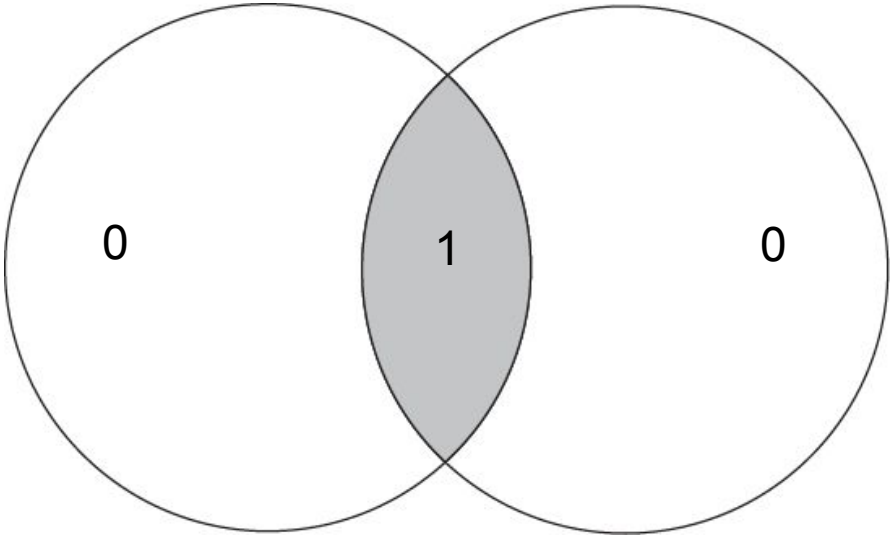


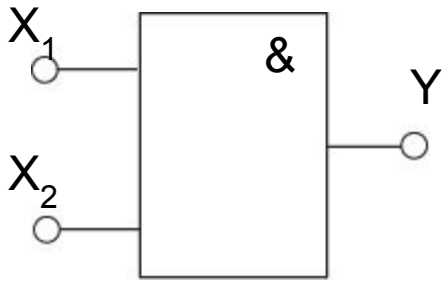
Безынерционные логические элементы

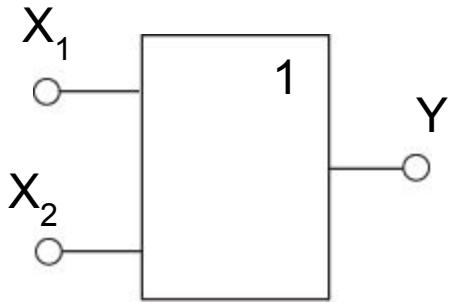
$Вх_1$		$Вх_2$		Вых	
U_1	X_1	U_2	X_2	U_3	Y

Безынерционные логические элементы



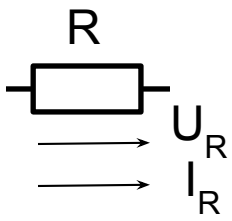




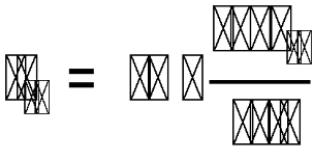


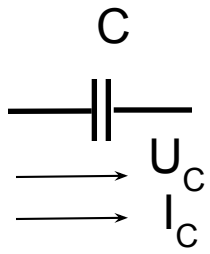
КОМПОНЕНТНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Резистор

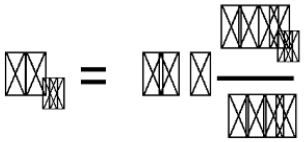


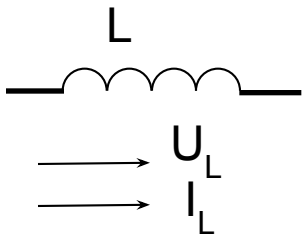
Конденсатор



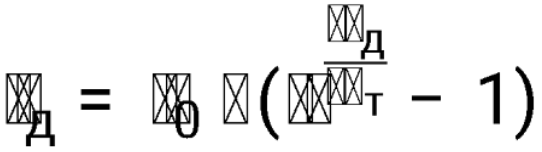


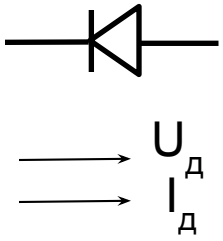
Катушка индуктивности





Диод





Спасибо

за внимание