

Дисциплина:  
**Электротехника и электроника**

Лектор: **Валерий Петрович Довгун**  
доктор технических наук, профессор

# **АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ:**

Лекции, практические задания,  
лабораторные работы

---

## **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА:**

1. Расчетно-графическое задание.
2. Подготовка к выполнению и защите лабораторных работ.
3. Самостоятельное изучение отдельных разделов курса.

# ИТОГОВАЯ АТТЕСТАЦИЯ

---

**Третий семестр: зачет.**

**Четвертый семестр: экзамен.**

# Рекомендуемая литература

---

1. Новожилов, О. П. Электротехника и электроника: учебник / О. П. Новожилов. – М.: Гардарики, 2008. – 653 с.
2. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 1 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 270 с.
3. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.

# Электрические величины и единицы их измерения

---

Ток в проводящей среде – явление упорядоченного движения электрических зарядов под действием электрического поля.

Мгновенное значение тока равно скорости изменения заряда во времени:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}.$$

Единица измерения тока в системе СИ – ампер (А).



Андре-Мари Ампер  
1775 - 1836

# Электрические величины и единицы их измерения

---

*Напряжение* (разность потенциалов) между двумя точками цепи определяется количеством энергии, затрачиваемой на перемещение заряда из одной точки в другую:

$$u = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{dw}{dq}$$

Единица измерения напряжения в системе СИ – вольт (В).



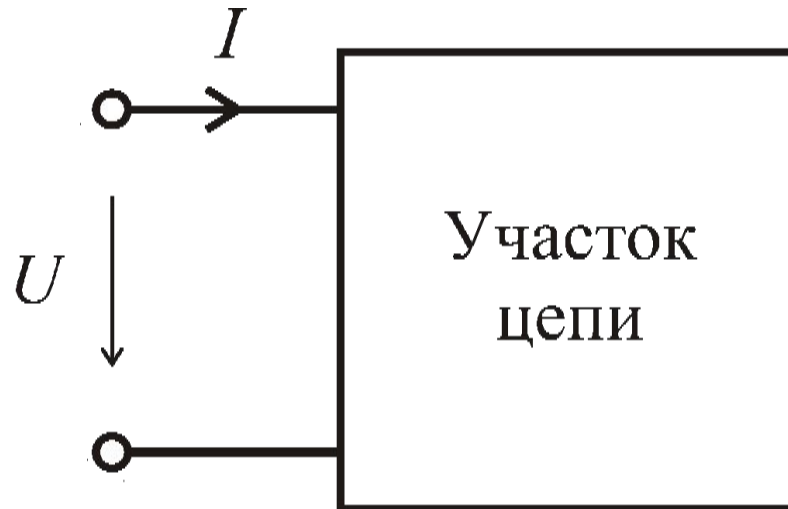
Алессандро Вольта  
1745 – 1827

# Электрические величины и единицы их измерения

---

Положительное направление тока выбирают произвольно и показывают стрелкой на выводах элемента или участка цепи.

Для однозначного определения напряжения между двумя выводами участка цепи одному из выводов приписывают положительную полярность, которую отмечают стрелкой, направленной от вывода.



# Электрические величины и единицы их измерения

---

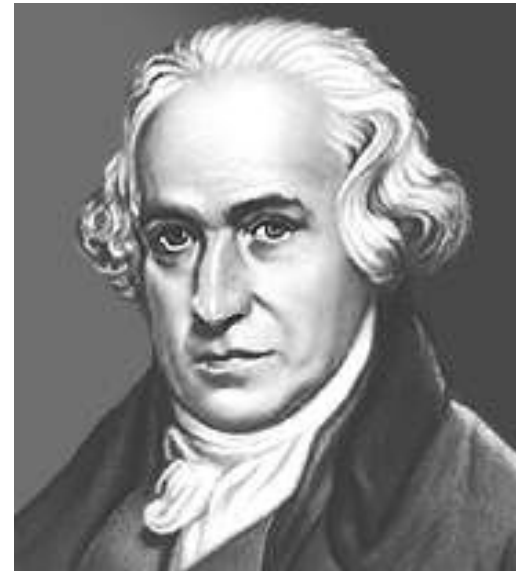
Энергия, затрачиваемая на перемещение заряда

$$w = \int_0^q u dq = \int_{-\infty}^t u i dt$$

Мгновенная мощность участка цепи:

$$p = \frac{dw}{dt} = ui .$$

Мощность измеряется в ваттах (Вт).

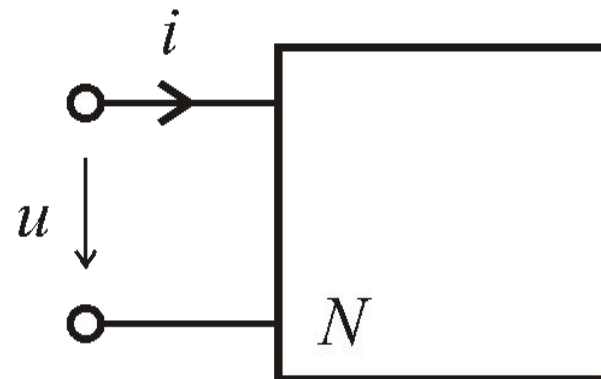


Джеймс Уатт  
1736 – 1819



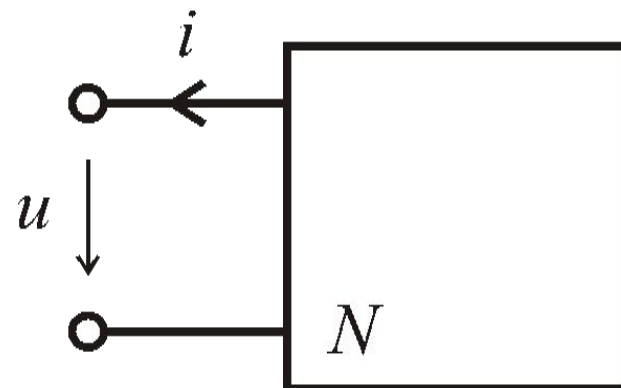
# Электрические величины и единицы их измерения

При совпадении знаков напряжения и тока мощность положительна. Это соответствует потреблению энергии участком цепи.



$$p = ui > 0$$

При несовпадении знаков напряжения и тока мощность отрицательна. Это означает, что участок цепи является источником энергии.



$$p = -ui < 0$$

# Элементы электрических цепей

---

Под элементами в теории цепей понимают не реальные устройства, а их идеализированные модели, обладающие определенными свойствами реальных прототипов.

Таковыми идеализированными элементами являются резистивный, индуктивный и емкостный элементы, а также независимые источники напряжения и тока.

Соединяя между собой идеализированные элементы, мы получим модель, или схему замещения, приближенно отображающую процессы в реальном электронном устройстве.

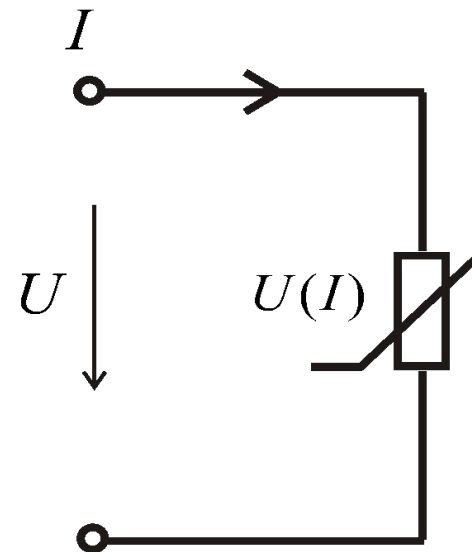
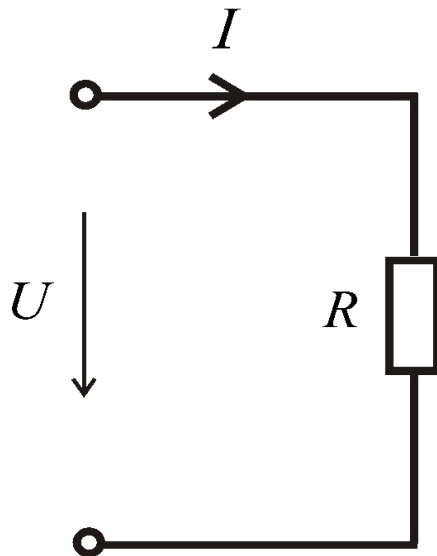
---

# ДВУХПОЛЮСНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

---

*Резистивный элемент* – идеализированный элемент, в котором происходит только необратимое преобразование электромагнитной энергии в тепло и другие виды энергии.

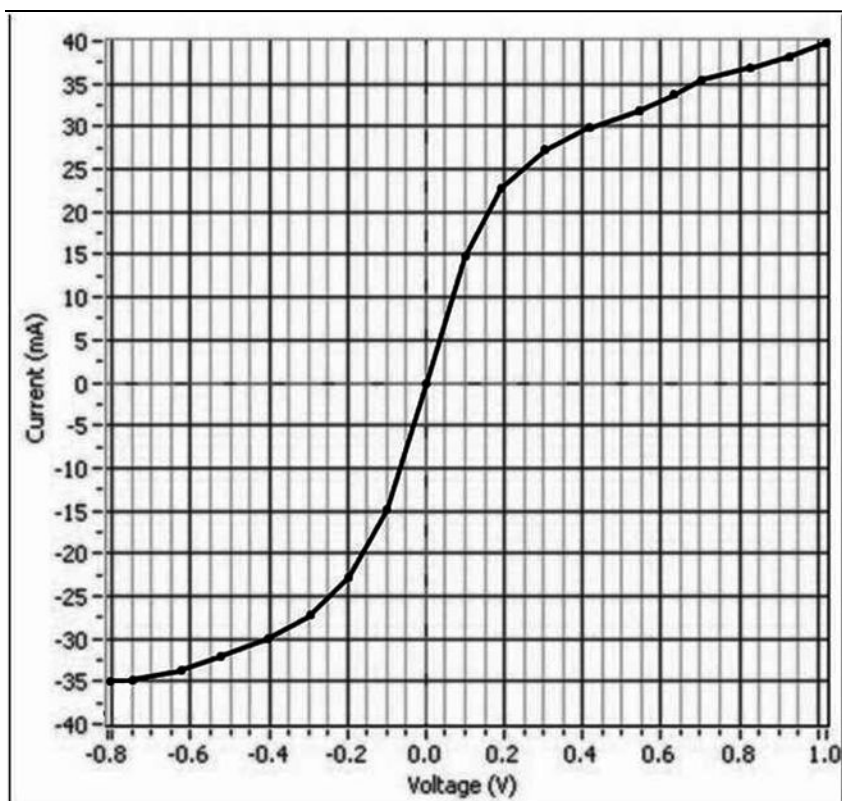
Условное графическое обозначение резистивного элемента:



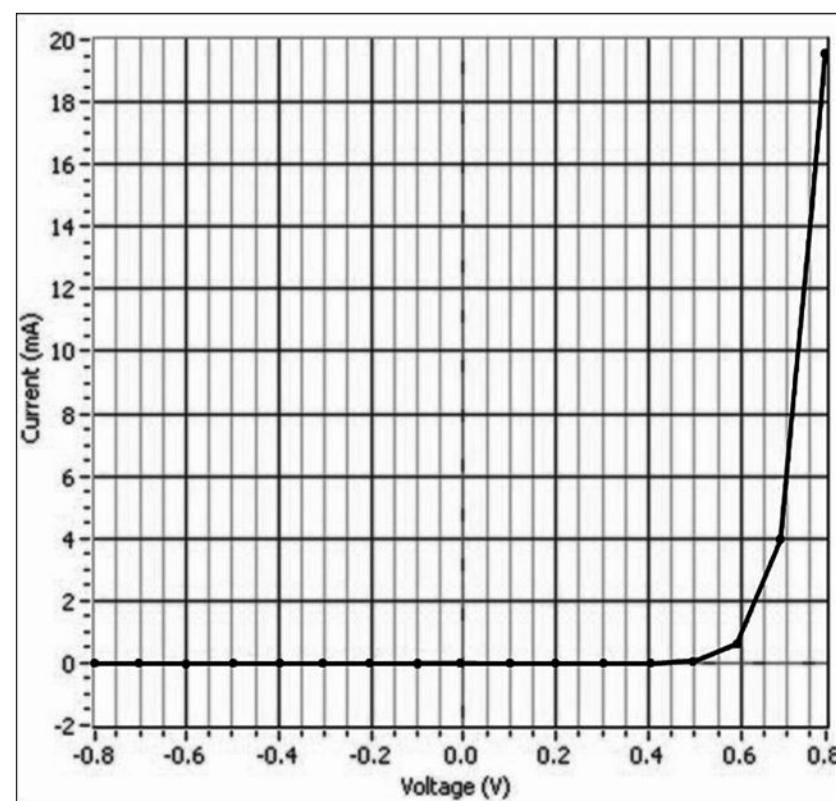
# Резистивный элемент

Вольт-амперные характеристики резистивных элементов.

Лампа накаливания



Полупроводниковый диод



# Резистивный элемент

---

Если ВАХ – прямая, проходящая через начало координат, резистор называют линейным.

Закон Ома:

$$u = Ri .$$

$R$  – сопротивление.

Единица измерения – Ом.



Георг Симон Ом  
1789 – 1854

# Резистивный элемент

---

Закон Ома:

$$i = Gu .$$

$$G = 1/R \text{ - проводимость.}$$

Единица измерения – Сименс.

Мощность, поглощаемая резистором

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}$$



Вернер фон Сименс

# Независимые источники напряжения и тока

---

*Источник напряжения* – двухполюсный элемент, напряжение которого не зависит от тока через него и изменяется по заданному закону.

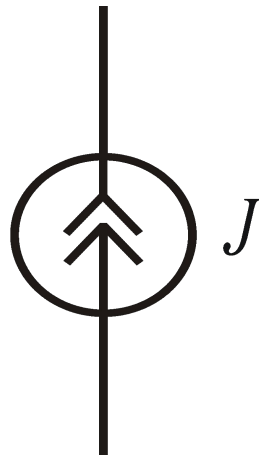


Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю.

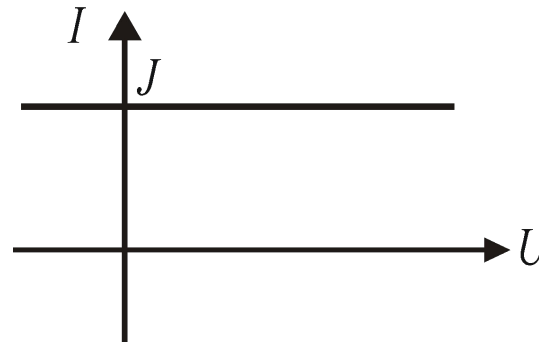
# Независимые источники напряжения и тока

---

*Источник тока* – двухполюсный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах и изменяется в соответствии с заданным законом.



ВАХ источника тока



Внутреннее сопротивление идеального источника тока бесконечно.



# Управляемые источники

---

*Управляемый источник* – четырехполюсный резистивный элемент, состоящий из двух ветвей и двух пар выводов: входной и выходной.

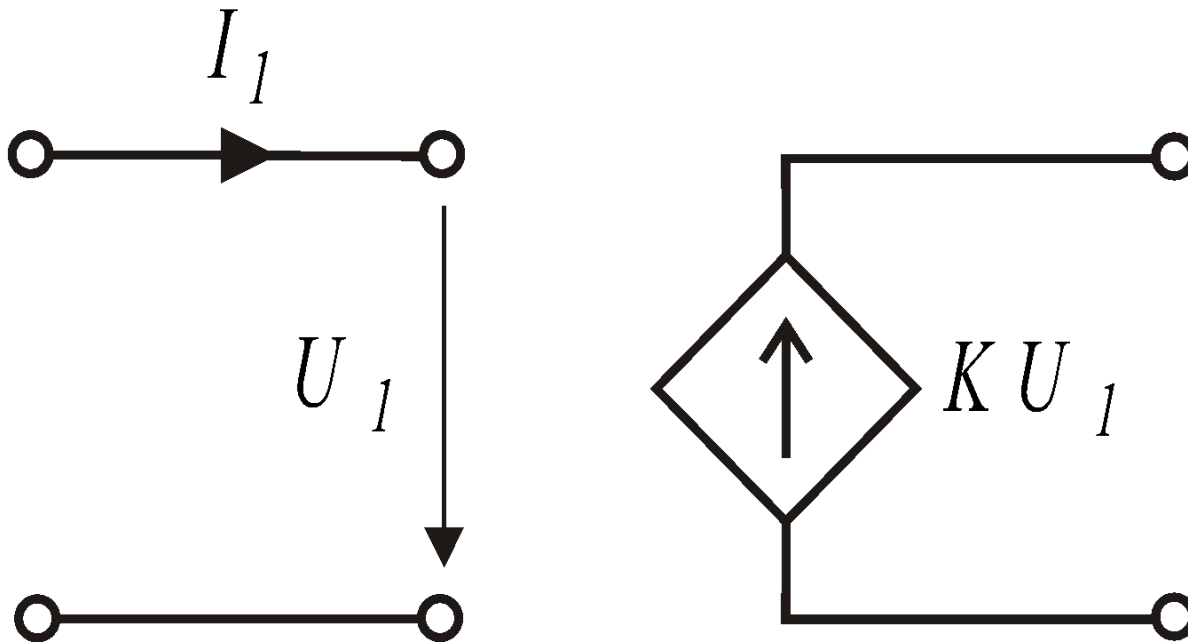
Управляемые источники обладают следующими свойствами:

- 1) выходная величина пропорциональна входной.
- 2) выходная величина не влияет на входную.

# Управляемые источники

---

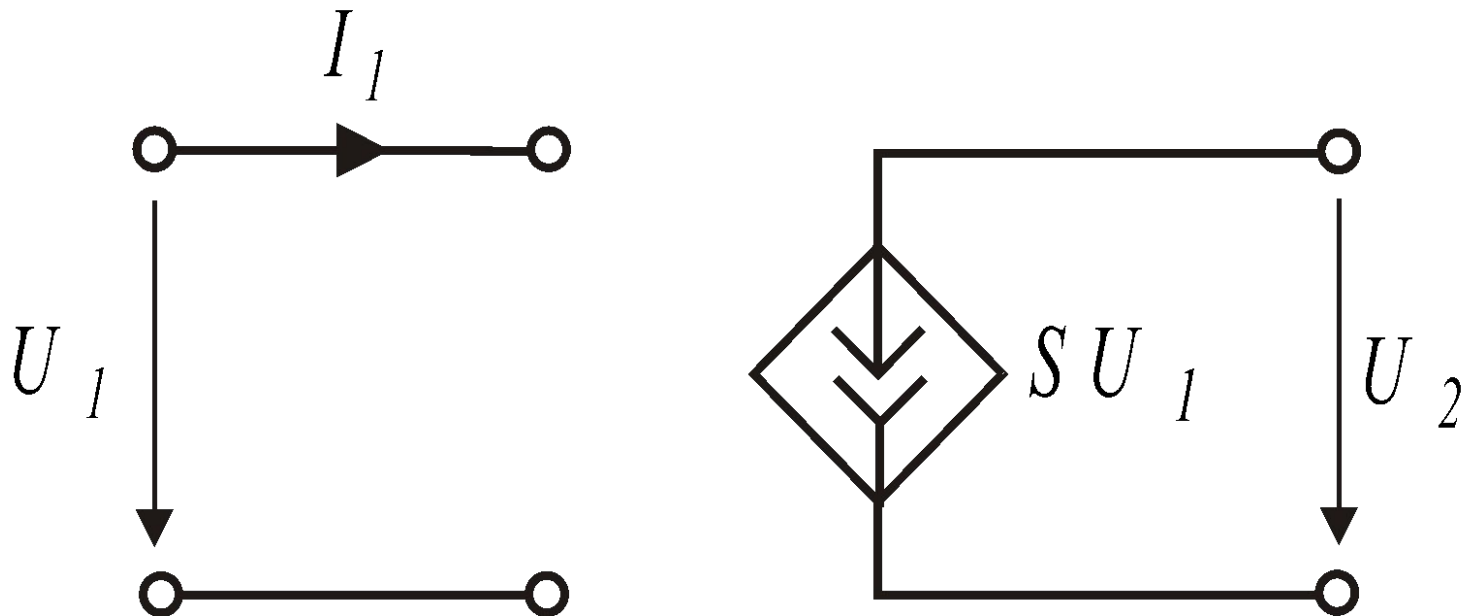
Источник напряжения управляемый напряжением  
(ИНУН)



# Управляемые источники

---

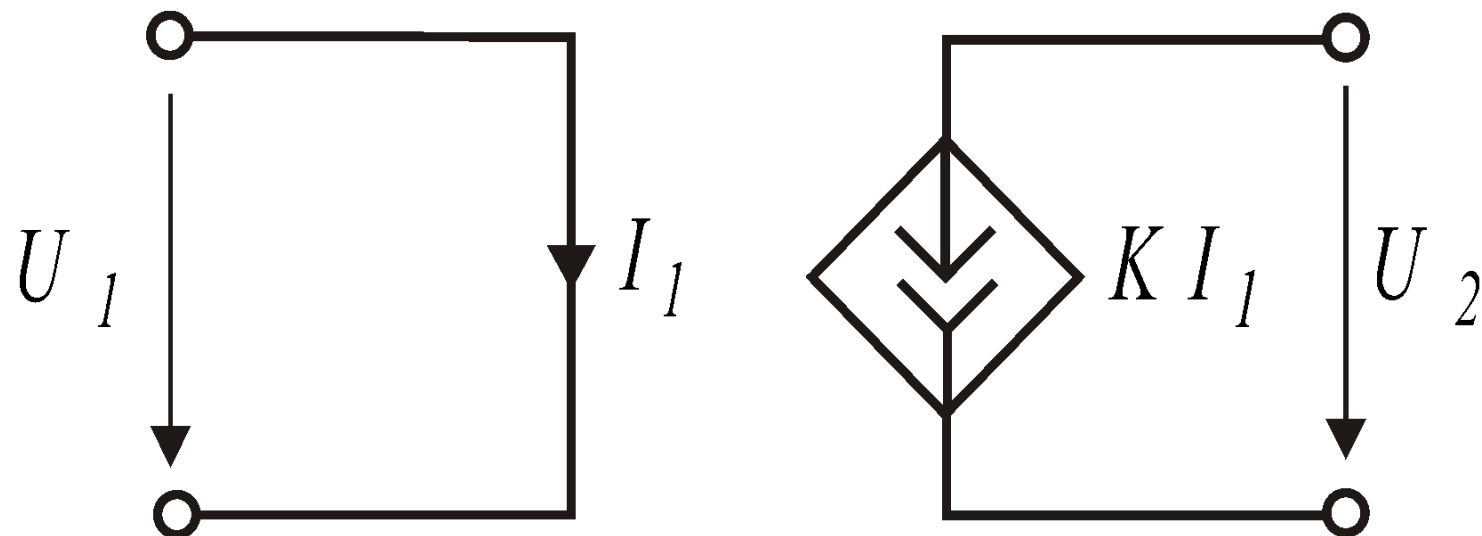
Источник тока управляемый напряжением  
(ИТУН)



# Управляемые источники

---

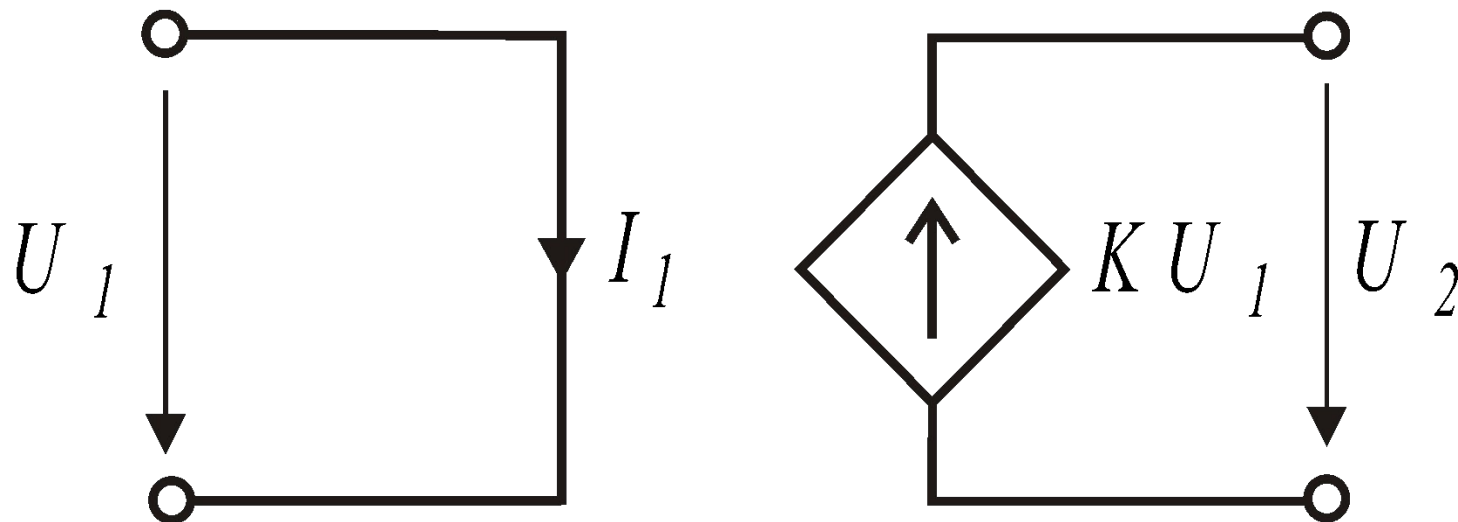
Источник тока управляемый током  
(ИТУТ)



# Управляемые источники

---

Источник напряжения управляемый током  
(ИНУТ)



# Выводы

---

1. *Ток* в проводящей среде есть явление упорядоченного движения электрических зарядов под действием электрического поля. Мгновенное значение тока равно скорости изменения заряда во времени. Положительное направление тока выбирают произвольно и показывают стрелкой на выводах элемента или участка цепи.
2. *Напряжение* (разность потенциалов) между двумя точками цепи определяется количеством энергии, затрачиваемой на перемещение заряда из одной точки в другую. Положительное направление напряжения показывают стрелкой, направленной от одного зажима элемента к другому, либо знаками «+», «-»

# Выводы

---

3. Для обозначения электрических величин используют прописные и строчные буквы. Прописными буквами обозначают постоянные напряжения, токи и мощности:  $U, I, P$ . Мгновенные значения переменных величин обозначают малыми (строчными) буквами:  $u, i, p$ .
4. *Резистивным* называют идеализированный двухполюсный элемент, для которого связь между напряжением и током можно представить в виде графика, называемого вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Резистивный элемент моделирует процесс необратимого преобразования электромагнитной энергии в тепло и другие виды энергии, при этом запасание энергии в электромагнитном поле отсутствует.

# Выводы

---

5. *Источник напряжения* – двухполюсный элемент, напряжение которого не зависит от тока через него и изменяется по заданному закону. Внутренне сопротивление идеального источника напряжения равно нулю.
  
6. *Источник тока* - двухполюсный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах и изменяется в соответствии с заданным законом. Внутренне сопротивление идеального источника тока бесконечно.



# Задача анализа электрических цепей. Законы Кирхгофа

---

Основные топологические понятия

*Ветвь* – участок цепи с двумя выводами.

*Узел* – точка соединения двух или более ветвей.

*Контур* – замкнутый путь, проходящий через ряд ветвей и узлов.

# Законы Кирхгофа

---

**Первый закон Кирхгофа: Алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю:**

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

Токи, направленные от узла, записывают с положительным знаком. Токи, направленные к узлу, записывают со знаком минус.

Число независимых уравнений по первому закону Кирхгофа

$$n_y - 1$$

# Законы Кирхгофа

---

**Второй закон Кирхгофа: В контуре электрической цепи алгебраическая сумма напряжений ветвей равна алгебраической сумме ЭДС источников.**

$$\sum_{k=1}^n u_k = \sum_{k=1}^n e_k$$

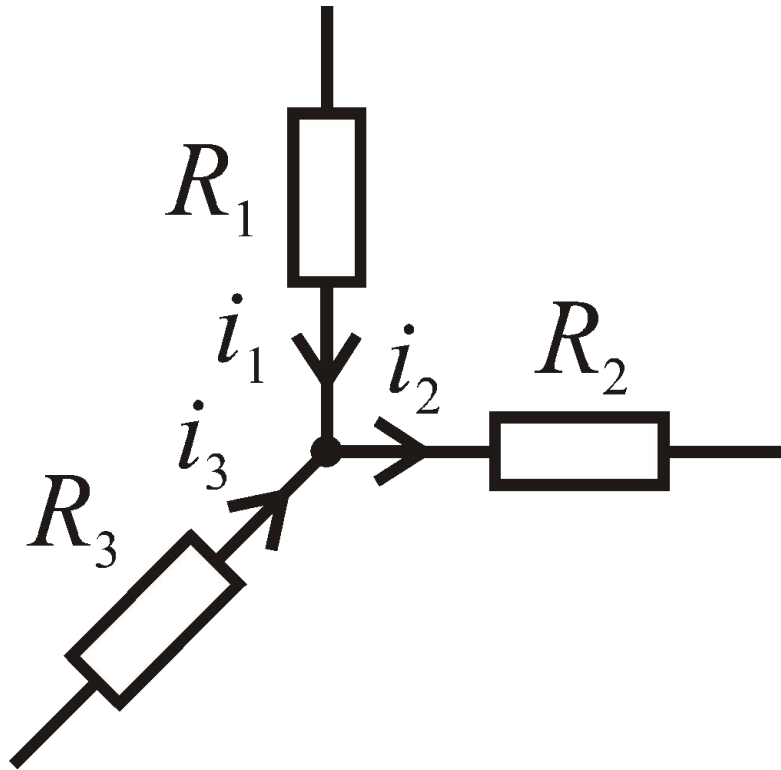
Число независимых уравнений по второму закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров:

$$n_b - n_y + 1$$



Густав Роберт Кирхгоф  
1824 - 1887

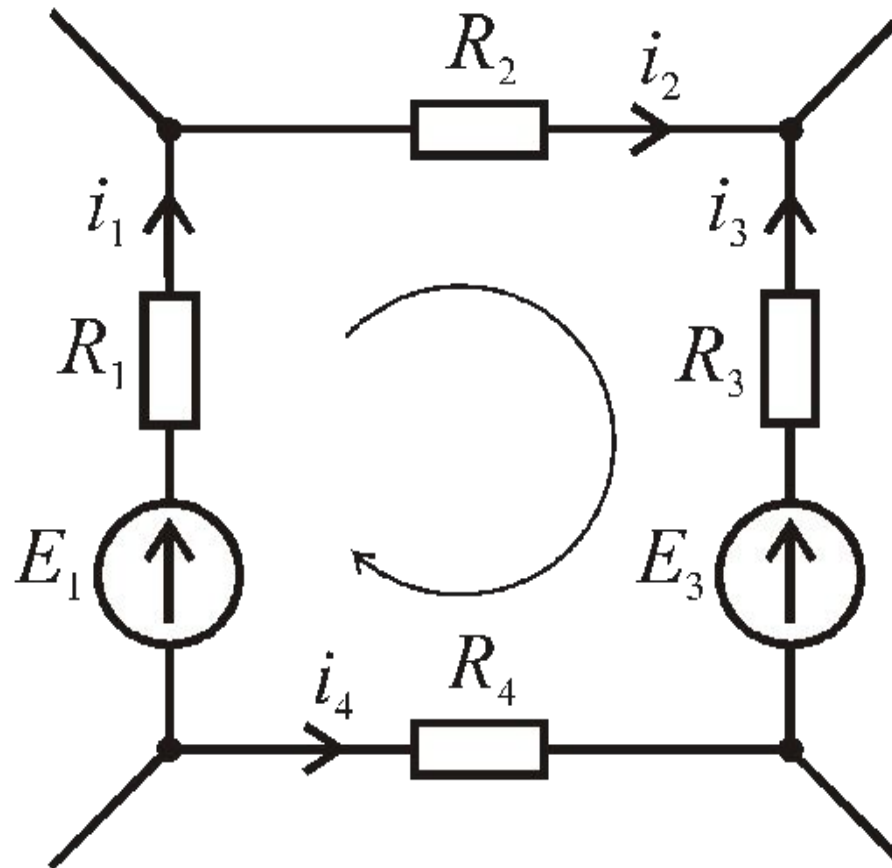
# Пример. Уравнения по законам Кирхгофа



$$-i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

# Пример. Уравнения по законам Кирхгофа

---



$$R_1 i_1 + R_2 i_2 - R_3 i_3 - R_4 i_4 = E_1 - E_3$$

# Принцип наложения (суперпозиции). Метод наложения

---

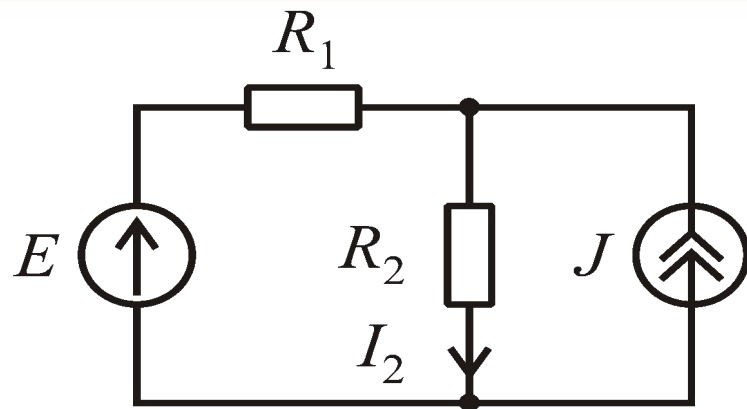
Принцип наложения является фундаментальным свойством линейных цепей.

**Реакция линейной цепи при одновременном действии нескольких независимых источников равна сумме реакций, получающихся при действии каждого источника в отдельности.**

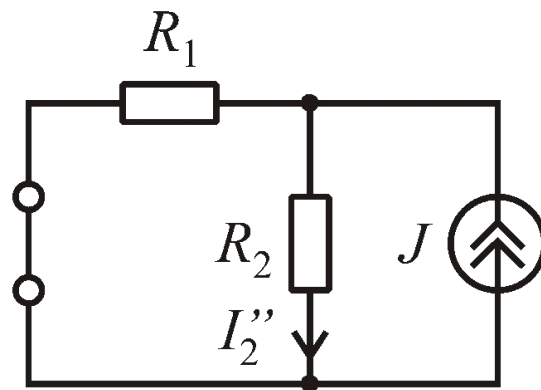
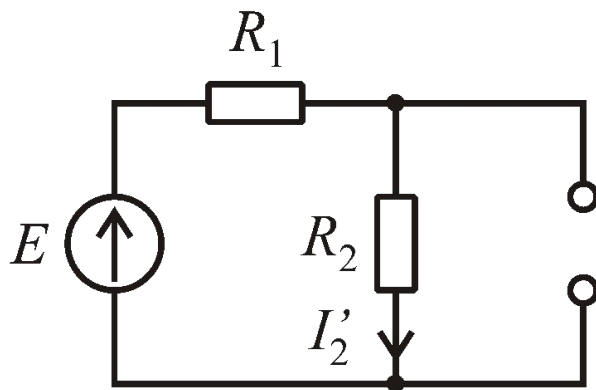
Принцип наложения является следствием линейности уравнений, описывающих цепь.

Принцип наложения справедлив только для линейных цепей.

# Пример, иллюстрирующий принцип наложения



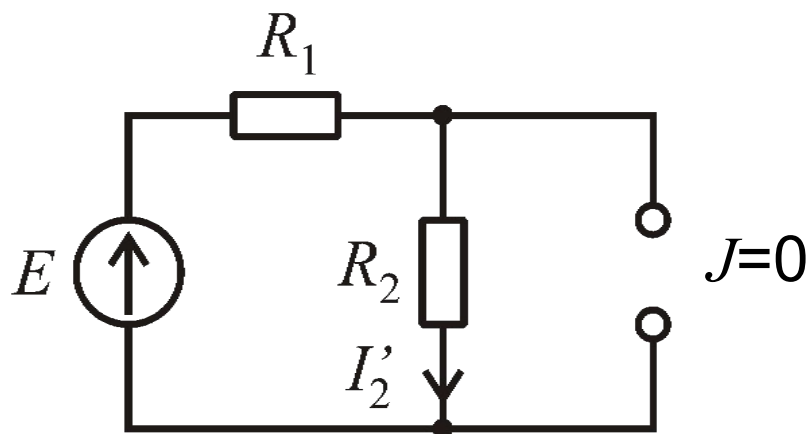
Рассмотрим две частных схемы, в каждой из которых действует только один источник



$$I_2 = I_2' + I_2''$$

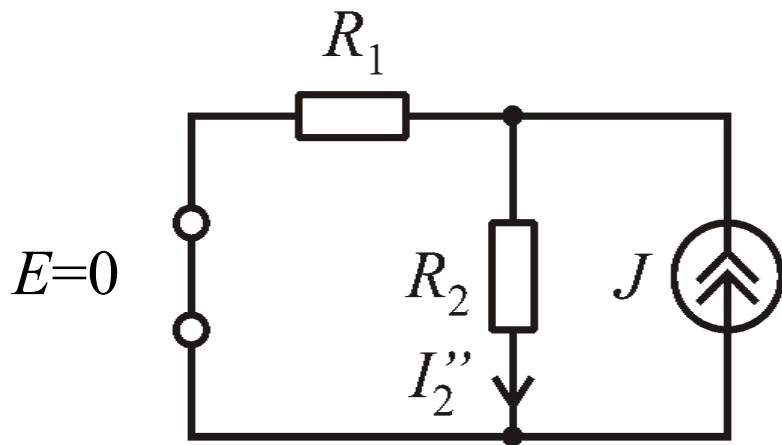
# Пример, иллюстрирующий принцип наложения

Частная схема 1:



$$I_2' = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

Частная схема 2:

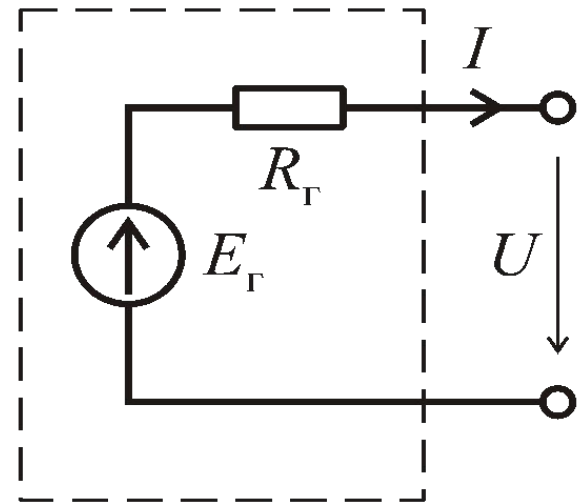
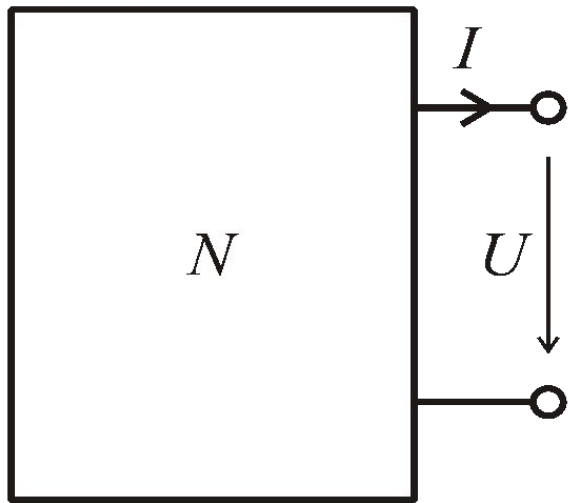


$$I_2'' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} J$$



# Теорема об эквивалентном двухполюснике:

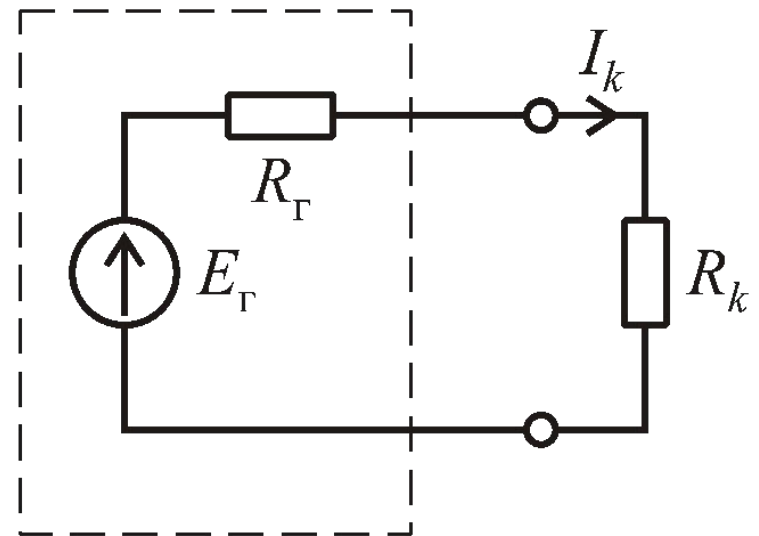
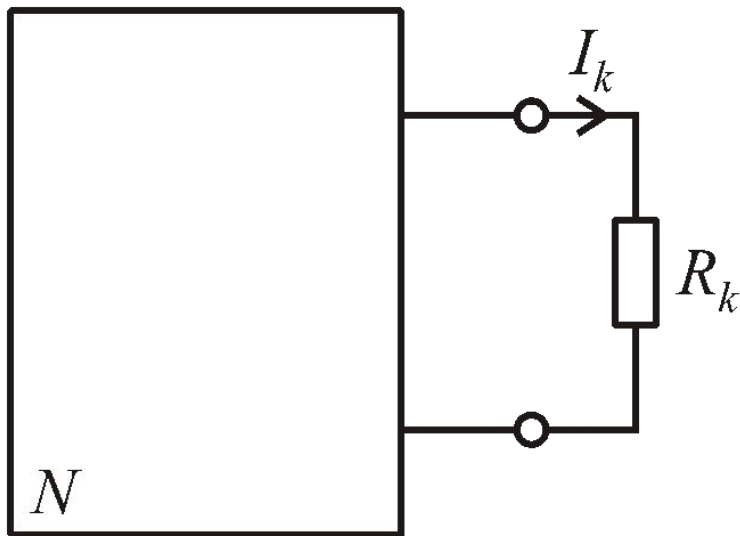
Линейную цепь с двумя внешними зажимами можно представить эквивалентной схемой, состоящей из последовательно соединенных независимого источника напряжения и резистора



$$E_G = U_{XX} \quad R_G = R_{BX} = \frac{U_{XX}}{I_{KЗ}}$$

# Метод эквивалентного генератора

Этот метод удобно использовать тогда, когда требуется рассчитать ток только в одной ветви сложной цепи.



# Последовательность расчета методом эквивалентного генератора

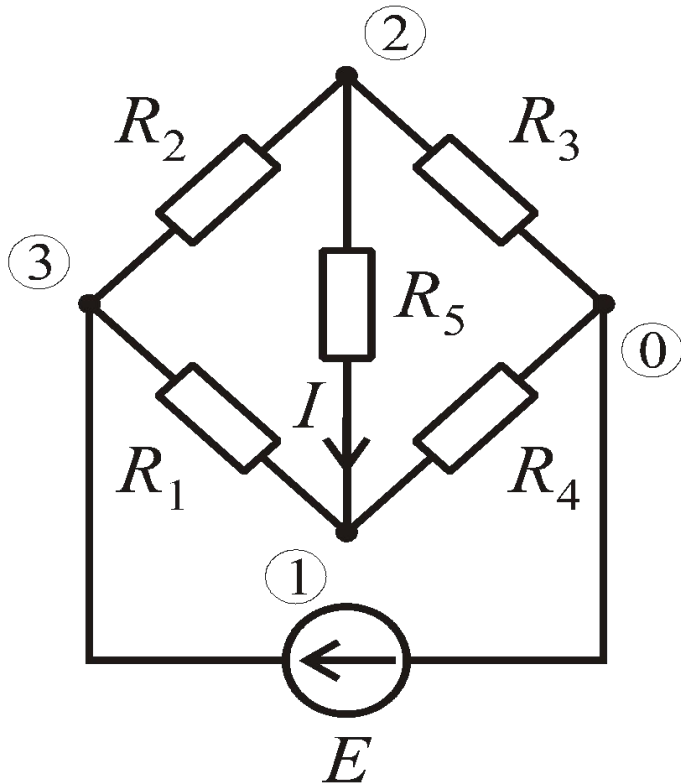
---

1. Выделяем ветвь, в которой необходимо рассчитать ток, а остальную часть цепи заменяем эквивалентным двухполюсником.
2. Определяем параметры эквивалентного двухполюсника  $E_{\Gamma}$ ,  $R_{\Gamma}$
3. Искомый ток рассчитываем по формуле

$$I = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_{\text{к}}} .$$

## Пример расчета методом ЭГ

Мост Уитстона, используется для измерения сопротивлений. Для ограничения тока нуль-индикатора последовательно с ним включен резистор  $R_5$ . Необходимо найти ток в диагональной ветви моста.



$$R_1 = 15 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 60 \text{ Ом},$$

$$R_3 = 90 \text{ Ом},$$

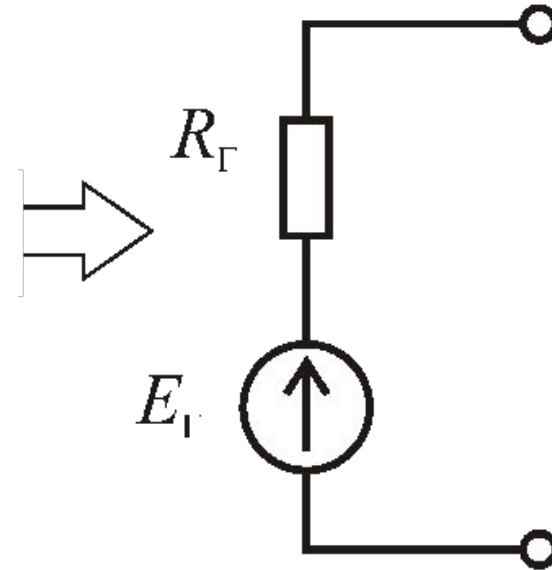
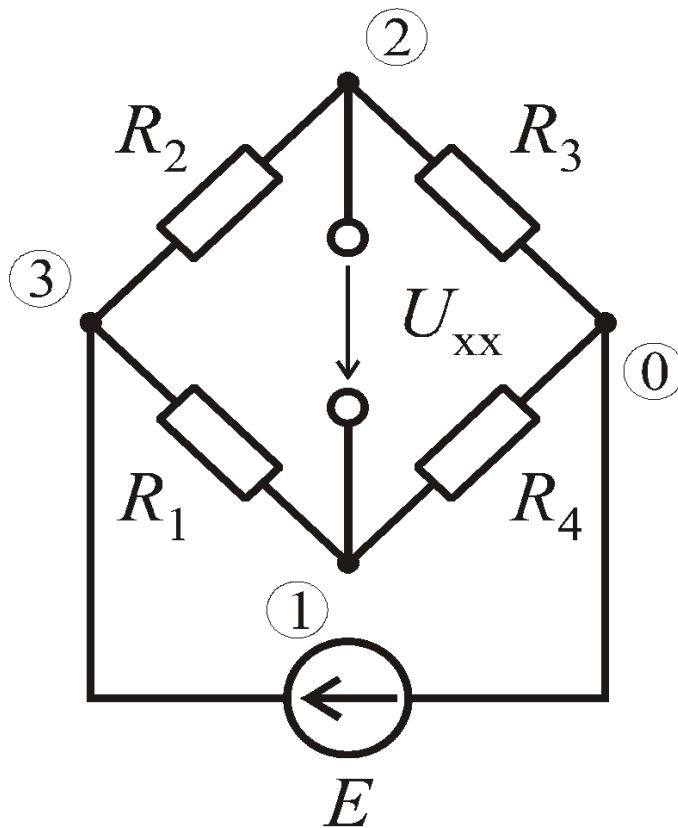
$$R_4 = 60 \text{ Ом},$$

$$R_5 = 12 \text{ Ом},$$

$$E = 120 \text{ В}$$

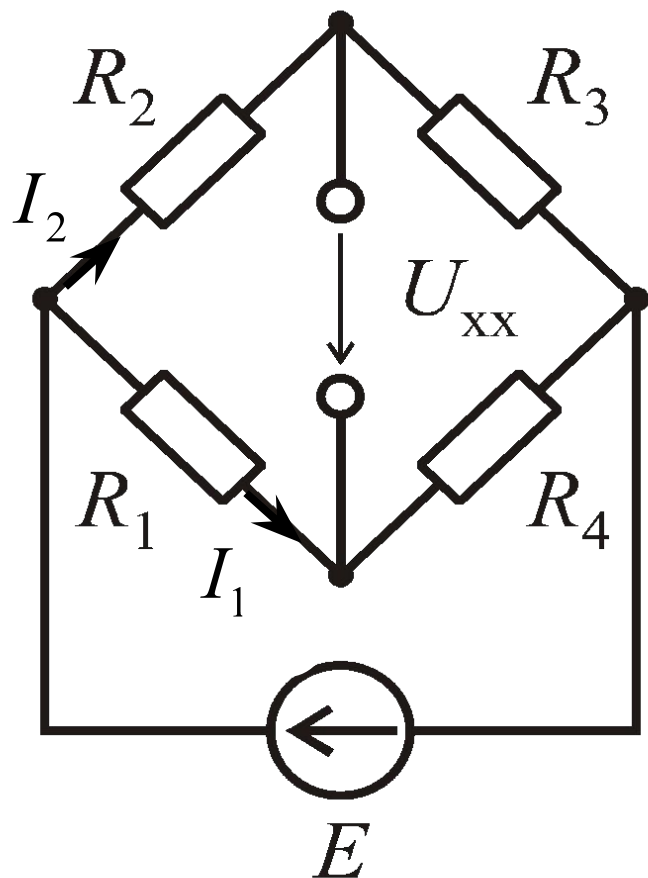
# Пример расчета методом ЭГ

Разомкнем диагональную ветвь, а оставшуюся цепь представим эквивалентным двухполюсником.



$$E_{\Gamma} = U_{XX} ; R_{\Gamma} = R_{BX}$$

## Пример расчета методом ЭГ



$$U_{xx} = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_4} = \frac{120}{15 + 60} = 1.6 \text{ A}$$

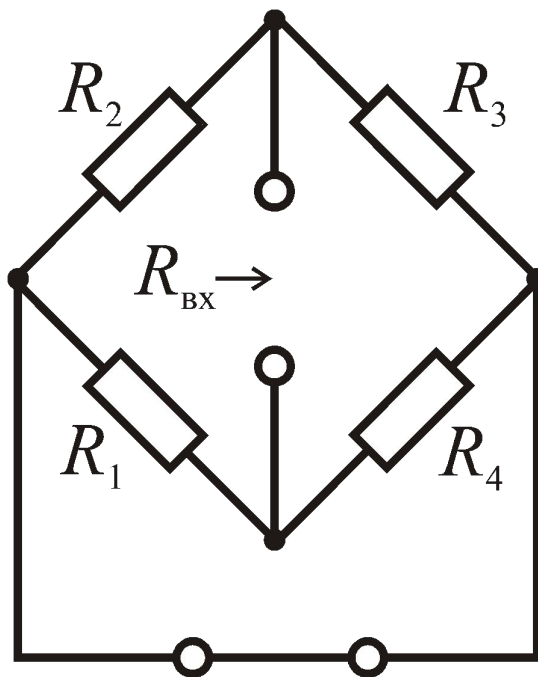
$$I_2 = \frac{E}{R_2 + R_3} = \frac{120}{60 + 90} = 0.8 \text{ A}$$

$$U_{xx} = -24 \text{ V}$$

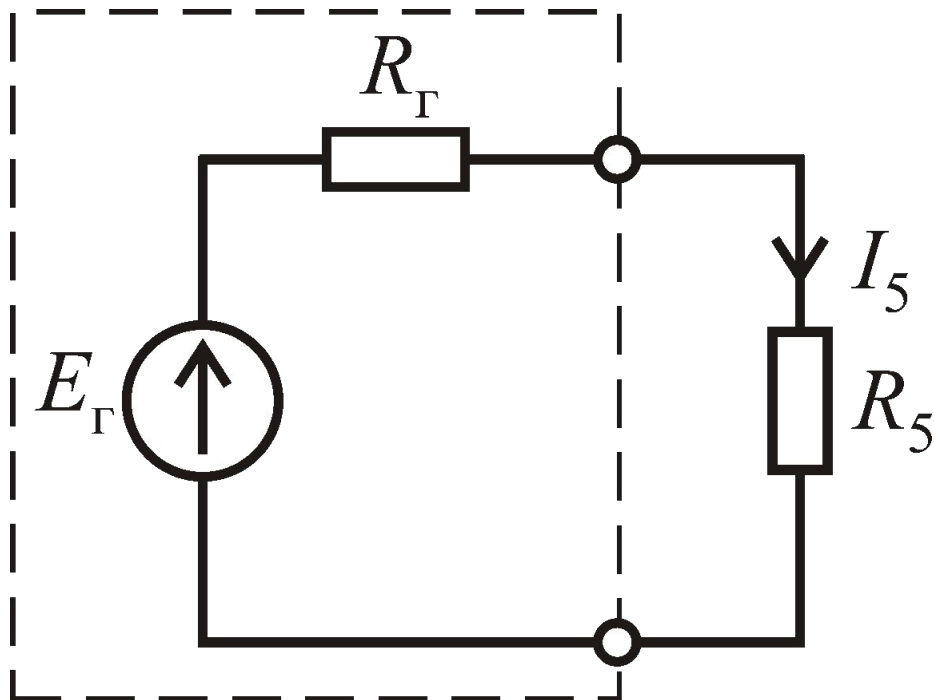
## Пример расчета методом ЭГ

Входное сопротивление двухполюсника найдем, исключив из схемы источник напряжения:

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2} = 48 \text{ Ом} .$$



## Пример расчета методом ЭГ



$$E_{\Gamma} = U_{\text{XX}} = -24 \text{ В}$$

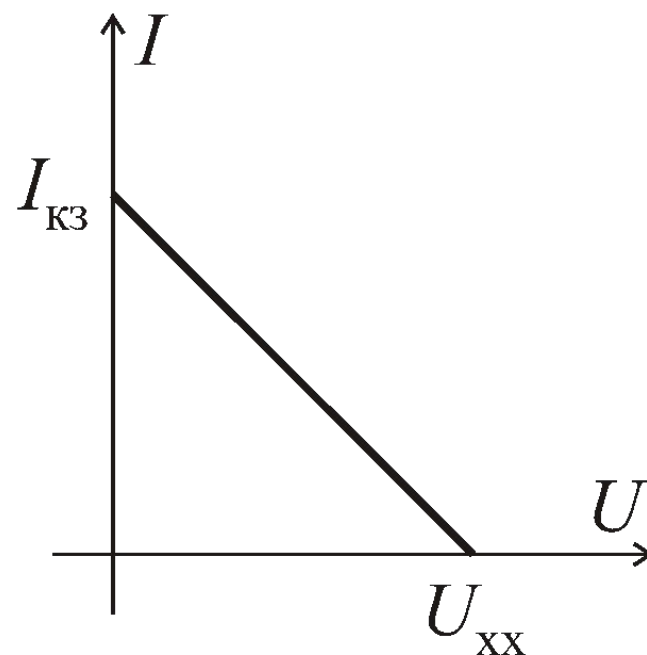
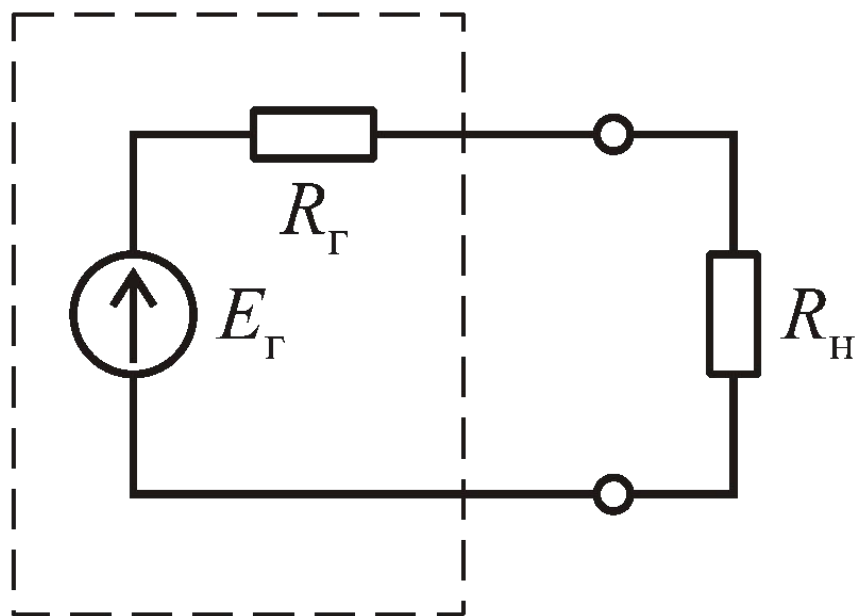
$$R_{\Gamma} = R_{\text{BX}} = 48 \text{ Ом}$$

$$I_5 = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_5} = \frac{-24}{48 + 12} = -0.4 \text{ А.}$$



# Характеристики эквивалентного двухполюсника

Рассмотрим двухполюсник, образованный последовательным соединением источника напряжения и линейного резистора. К внешним зажимам двухполюсника подключено сопротивление нагрузки  $R_H$ .



# Характеристики эквивалентного двухполюсника

---

Ток в цепи

$$I = \frac{E}{R_{\Gamma} + R_{\text{H}}}$$

Напряжение на зажимах двухполюсника

$$U_{\text{H}} = E_{\Gamma} - R_{\Gamma} I$$

Мощность, отдаваемая двухполюсником в сопротивление нагрузки

$$P_{\text{H}} = I^2 R_{\text{H}} = \frac{E_{\Gamma}^2 R_{\text{H}}}{(R_{\Gamma} + R_{\text{H}})^2}$$

# Характеристики эквивалентного двухполюсника

---

## Режим короткого замыкания

$$I_{\text{кз}} = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma}} \quad U_{\text{н}} = 0$$

В режиме к. з.  $P_{\text{н}} = 0$ .

## Режим холостого хода:

напряжение на внешних зажимах двухполюсника равно напряжению источника:

$$U_{\text{хх}} = E_{\Gamma}, \quad \text{а ток } I = 0$$

В режиме хх  $P_{\text{н}} = 0$ .

# Характеристики эквивалентного двухполюсника

---

Двухполюсник отдает в нагрузку максимальную мощность при  $R_{\text{H}} = R_{\text{Г}}$ :

$$P_{\text{H max}} = \frac{E_{\text{Г}}^2}{4R_{\text{Г}}}$$

Этот режим называют ***режимом согласованной нагрузки***.

# Операционные усилители

---

Операционный усилитель (ОУ) – усилитель, имеющий большой коэффициент усиления, высокое входное и малое выходное сопротивления. В настоящее время операционные усилители выпускают в виде интегральных микросхем.

Типичные параметры интегрального ОУ:

$$R_{\text{ВХ}} > 100 \text{ кОм}$$

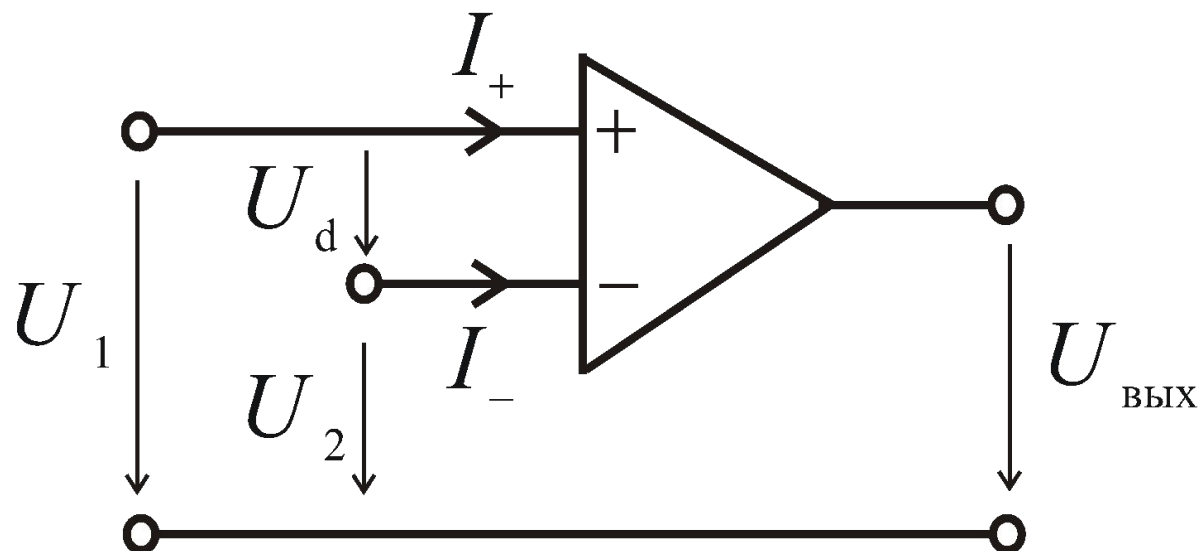
$$R_{\text{ВЫХ}} < 100 \text{ Ом}$$

в линейном режиме коэффициент усиления напряжения ОУ

$$K_U = 10^4 - 10^6.$$

# Операционные усилители

Условное обозначение ОУ



Неинвертирующий вход обозначен знаком «+»

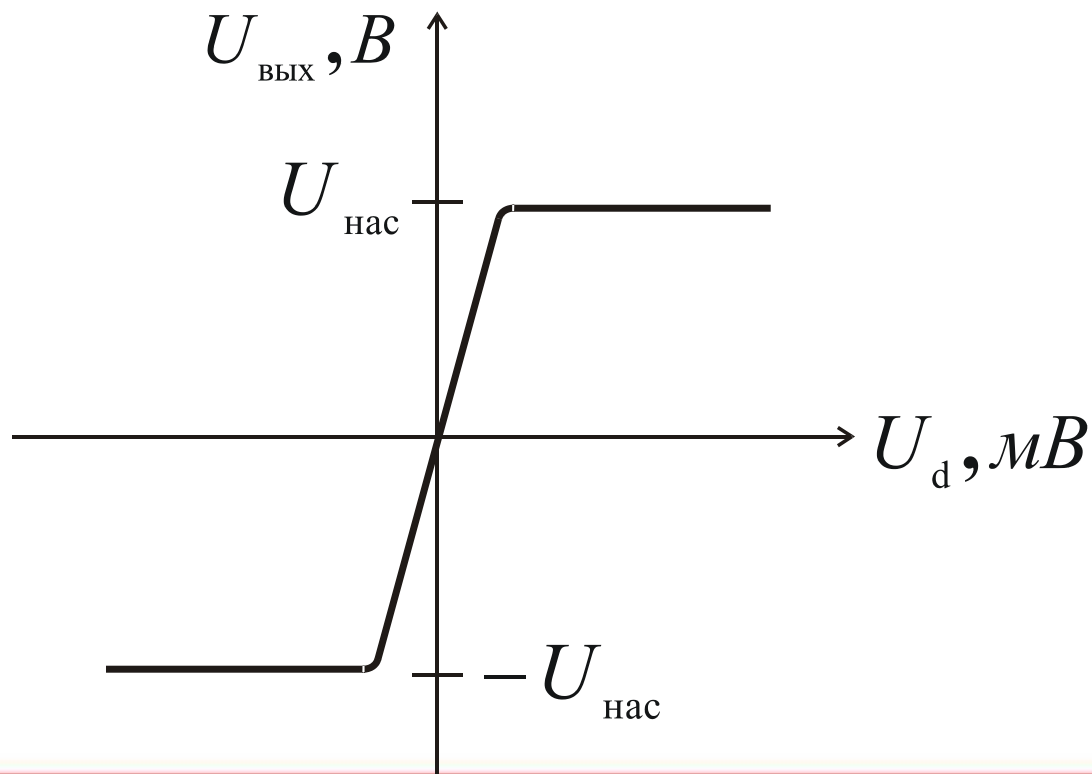
Инвертирующий вход обозначен знаком «-».

# Операционные усилители

Передаточная характеристика ОУ – зависимость выходного напряжения ОУ от входного

$$U_{\text{ВЫХ}} = f(U_d)$$

График передаточной характеристики



# Анализ цепей с ОУ

---

Правила анализа электронных цепей с ОУ, работающими в линейном режиме.

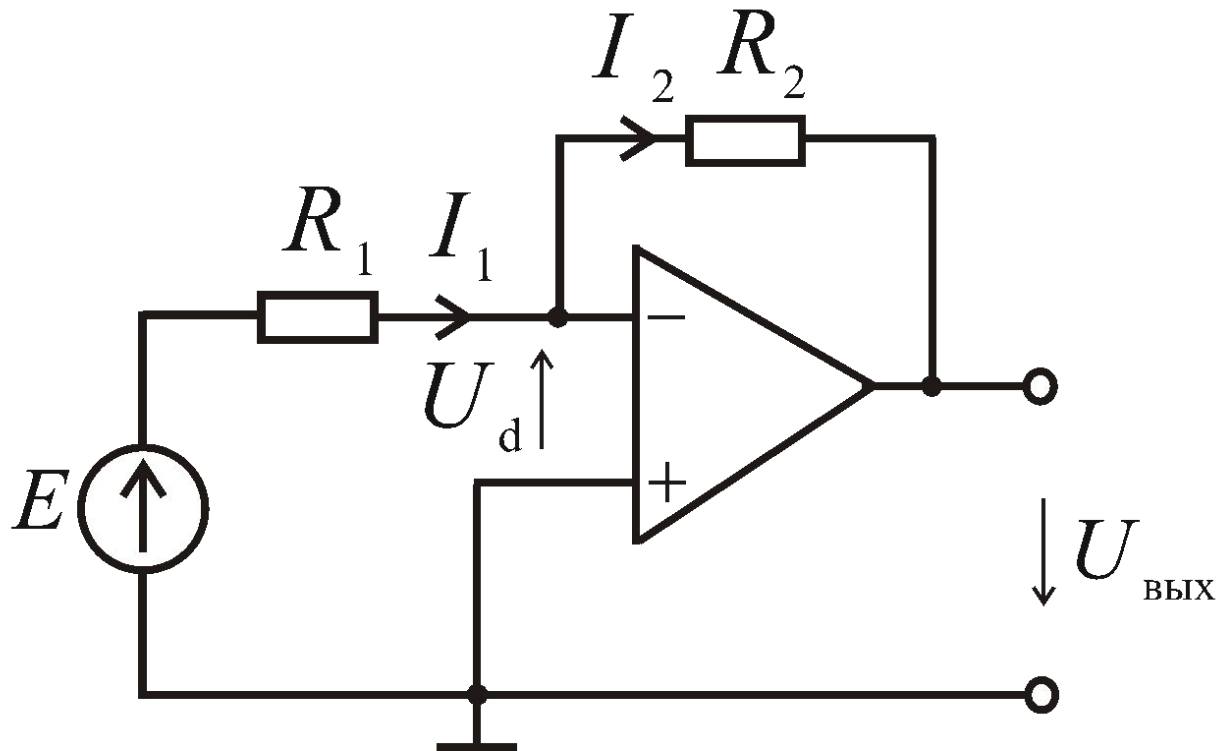
1. Входные токи ОУ равны нулю:  $I_+ = 0, I_- = 0$
2. Напряжение на входе ОУ равно нулю:  $U_d = 0$   
(правило виртуального короткого замыкания).

Правило виртуального короткого замыкания справедливо только в том случае, если ОУ охвачен отрицательной обратной связью и его выходное напряжение меньше напряжения насыщения.



# Анализ цепей с ОУ

Пример 1. Рассчитать выходное напряжение в схеме, изображенной на рисунке. ОУ считать идеальным.



# Анализ цепей с ОУ

---

Запишем уравнение по первому закону Кирхгофа для узла 1:

$$-I_1 + I_2 + I_- = 0$$

Уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, включающего источник  $E$ , резистор  $R_1$  и вход ОУ:

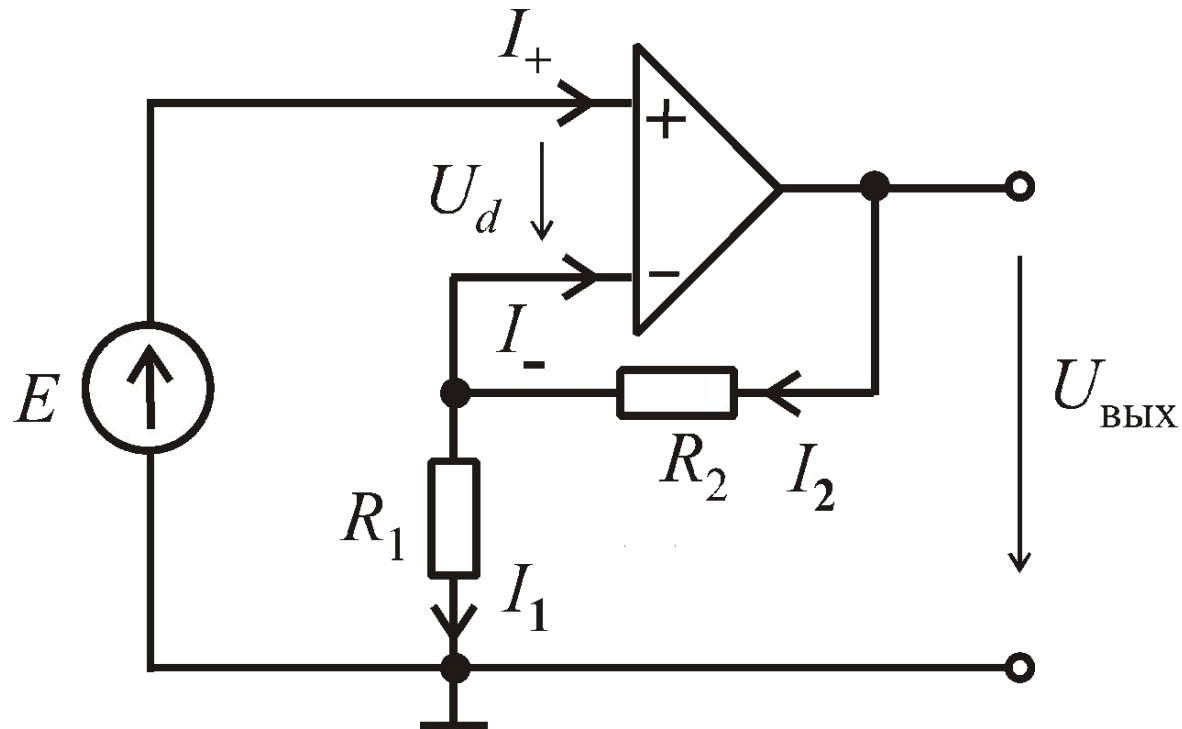
$$R_1 I_1 - U_d = E$$

Для контура, включающего вход ОУ, резистор  $R_2$  и выход схемы, имеем

$$U_d + R_2 I_2 + U_{\text{ВЫХ}} = 0$$

# Анализ цепей с ОУ

Пример 2. Неинвертирующий усилитель напряжения



Уравнение по первому закону Кирхгофа для узла, к которому подключен инвертирующий вход:

$$I_1 - I_2 + I_- = 0$$

# Анализ цепей с ОУ

---

Уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, включающего источник  $E$ , резистор  $R_1$  и вход ОУ:

$$U_d + R_1 I_1 = E.$$

Для контура, включающего резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и выход схемы, имеем

$$-R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{\text{ВЫХ}} = 0.$$

Решая эту систему уравнений и учитывая, что

$$U_d = 0, \quad I_- = I_+ = 0$$

получаем

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} E.$$

# ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

---

## Индуктивный и емкостный элементы

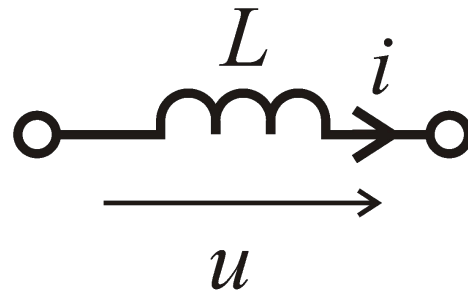
В индуктивном элементе происходит запасание энергии, связанное с прохождением тока, потери и запасание электрической энергии отсутствуют.

Условное графическое обозначение индуктивного элемента

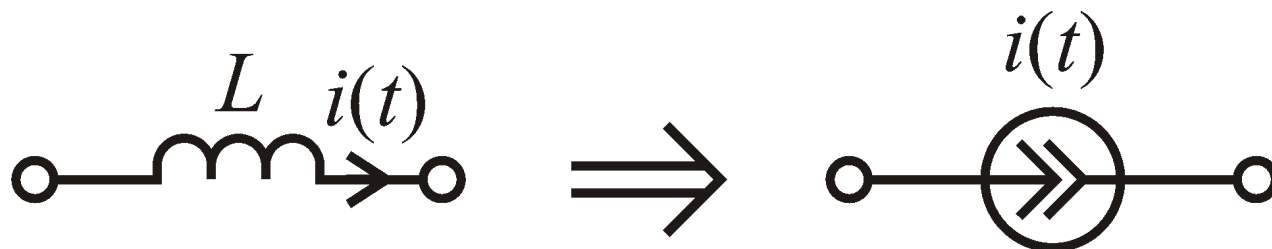
# Индуктивный и емкостный элементы

---

Условное графическое обозначение индуктивного элемента



$$u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

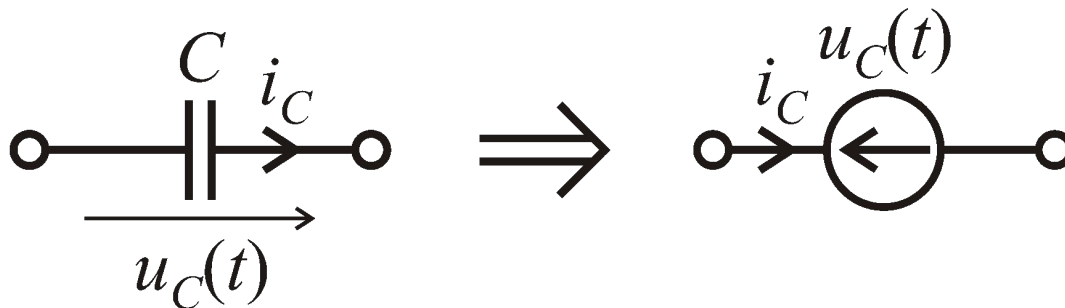


# Индуктивный и емкостный элементы

## Емкостный элемент

В идеальном емкостном элементе происходит запасание электрической энергии, связанное с прохождением тока, потери и запасание магнитной энергии отсутствуют.

$$i_C = \frac{dQ}{dt} = C \frac{du_C}{dt}$$



# Законы коммутации и начальные условия

---

## Законы коммутации

$$i_L(0_-) = i_L(0_+)$$

$$u_C(0_-) = u_C(0_+)$$

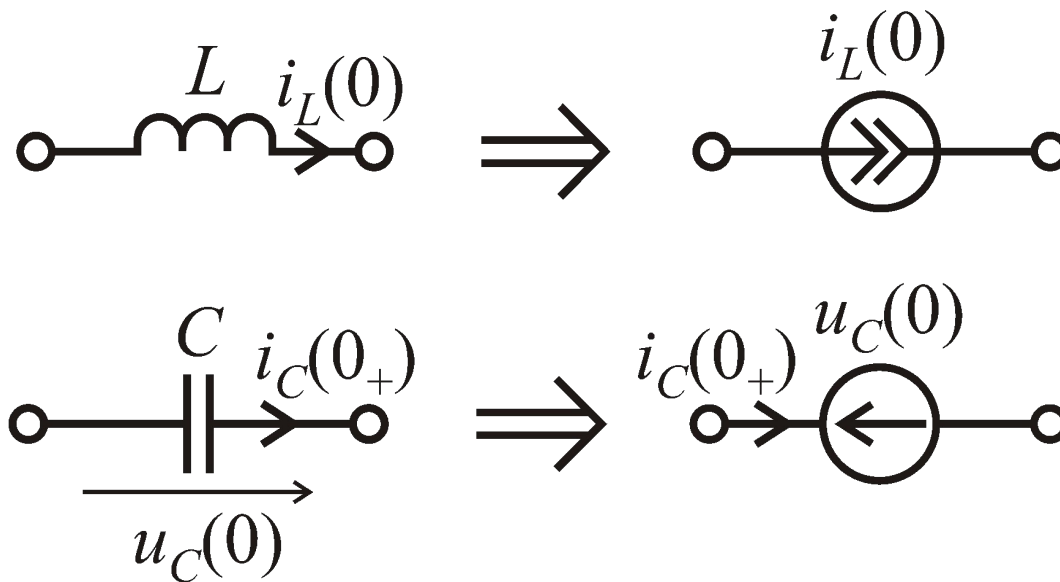
В начальный момент после коммутации токи индуктивных и напряжения емкостных элементов остаются такими же, какими они были перед коммутацией, а затем плавно изменяются.



# Переходные процессы в электрических цепях

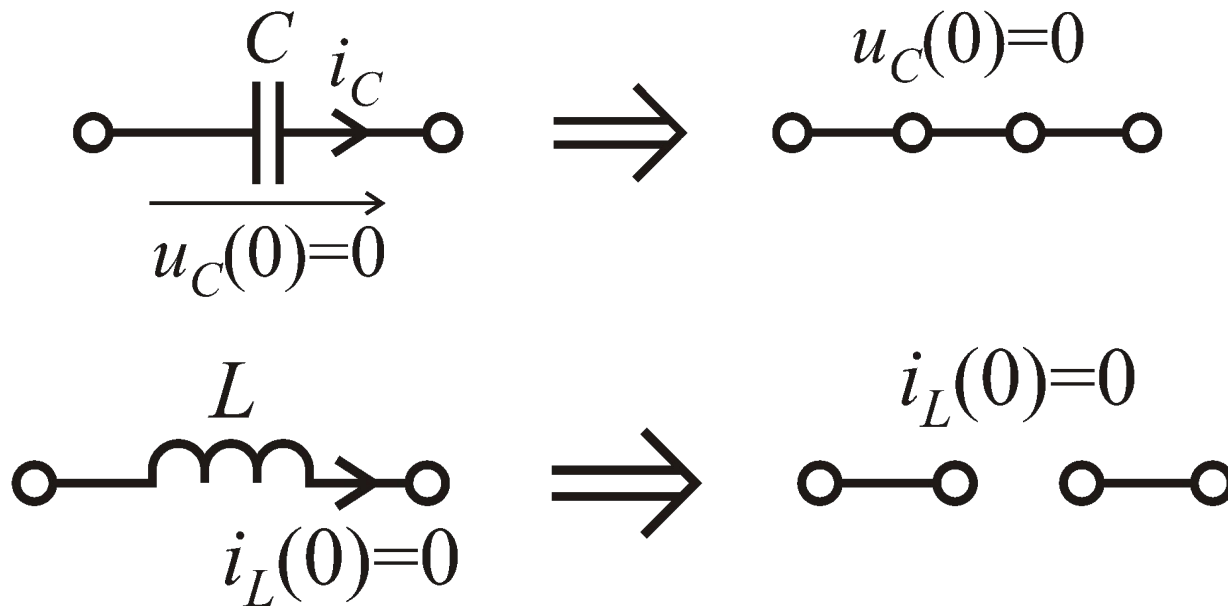
Значения тока индуктивного и напряжения емкостного элементов в момент коммутации называют **независимыми начальными условиями**.

Именно эти токи и напряжения, а также независимые источники, определяют режим цепи в первый момент после коммутации.



# Переходные процессы в электрических цепях

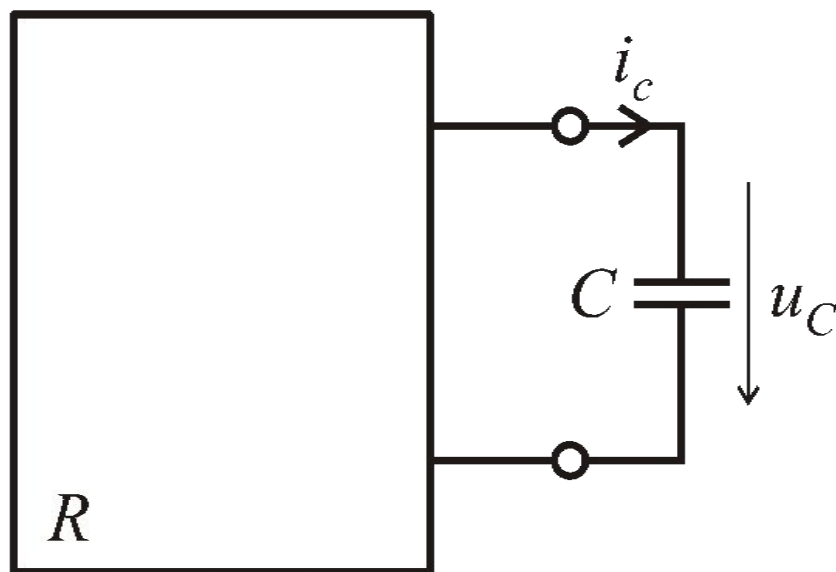
Если в момент коммутации токи всех индуктивных и напряжения всех емкостных элементов равны нулю, то соответствующие начальные условия называют **нулевыми**



# Переходные процессы в $RC$ -цепях первого порядка

---

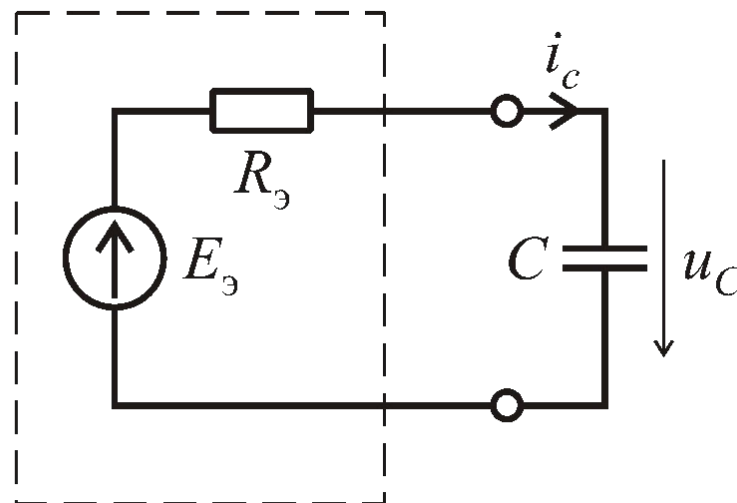
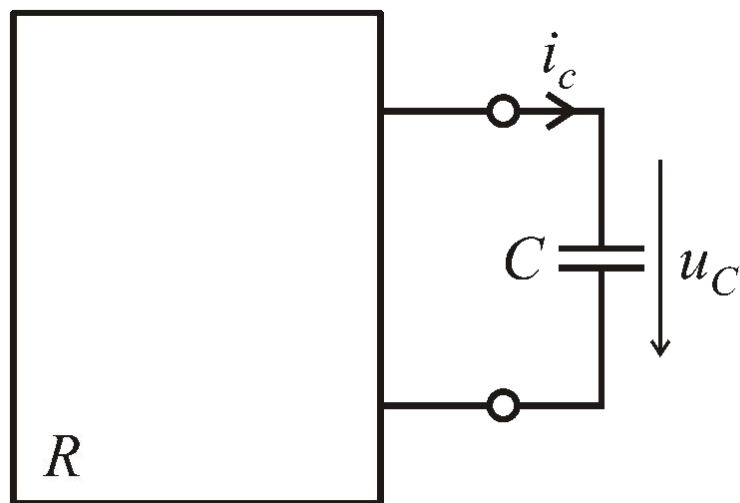
В  $RC$ -цепи в момент  $t = 0$  происходит коммутация.  
Необходимо определить токи и напряжения цепи при  $t \geq 0$



# Переходные процессы в $RC$ -цепях первого порядка

Определим сначала закон изменения напряжения  $u_C(t)$ . Зная  $u_C(t)$ , мы можем представить емкостный элемент источником напряжения  $e(t) = u_C(t)$  и рассчитать токи и напряжения в резистивной цепи.

Чтобы упростить расчет, заменим резистивную под схему эквивалентным двухполюсником



# Переходные процессы в $RC$ -цепях первого порядка

---

В соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$R_3 i_C + u_C = E_3$$

Выполняя подстановку  $i_C = C \frac{du_C}{dt}$  и решая

полученное уравнение относительно  $\frac{du_C}{dt}$ , получим

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{1}{R_3 C} u_C + \frac{1}{R_3 C} E_3 \quad (1)$$

$\tau = R_3 C$  - постоянная времени.

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{1}{\tau} u_C + \frac{1}{\tau} E_3 \quad (2)$$

# Переходные процессы в $RC$ -цепях первого порядка

---

$$u_C(t) = (U_0 - u_{уст}) e^{-t/\tau} + u_{уст}. \quad (3)$$

$$u_C(0) = U_0$$

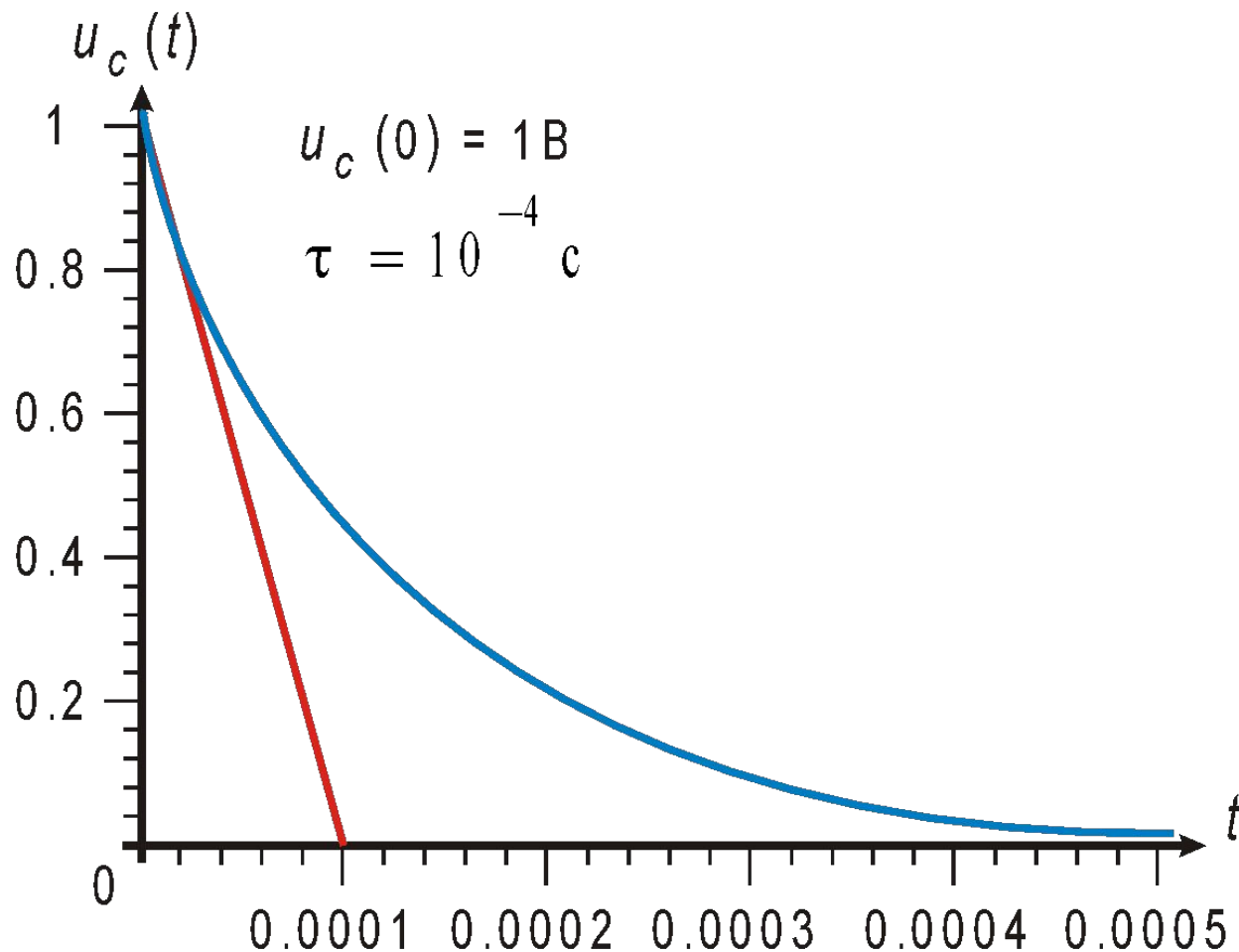
Первое слагаемое в (3) - **свободная составляющая**

Второе слагаемое в (3) - **принужденная (установившаяся) составляющая**

# Переходные процессы в $RC$ -цепях первого порядка

Случай 1.  $E_s = 0$

Решение уравнения (2) имеет вид:  $u_C(t) = u_C(0)e^{-t/\tau}$



# Переходные процессы в $RC$ -цепях первого порядка

---

Случай 2.  $E_{\text{э}} \neq 0$

Запишем уравнение (2) в виде:

$$\frac{d}{dt}(u_C - E_{\text{э}}) = -\frac{1}{\tau}(u_C - E_{\text{э}})$$

Решение:

$$u_C(t) - E_{\text{э}} = (u_C(0) - E_{\text{э}})e^{-t/\tau}$$

Поскольку  $u_C(\infty) = E_{\text{э}}$

$$u_C(t) = (u_C(0) - u_C(\infty))e^{-t/\tau} + u_C(\infty)$$



# Порядок расчета переходных процессов в $RC$ -цепях первого порядка

---

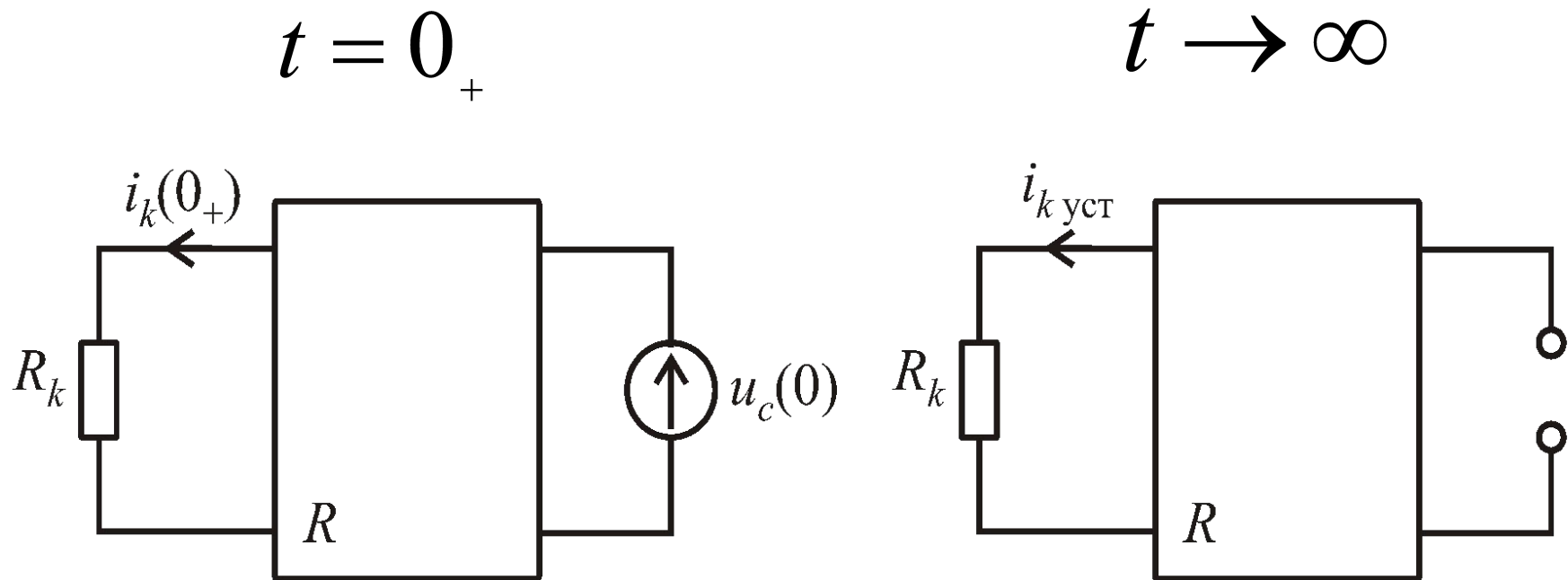
Считаем, что переходный процесс вызван замыканием или размыканием идеального ключа в момент  $t = 0$  и нужно определить ток  $k$ -й ветви.

1. Анализируем цепь в момент, предшествующий коммутации (при  $t = 0_-$ ), и определяем напряжение емкостного элемента  $U_C(0)$ .

2. Заменяем емкостный элемент источником напряжения  $E = U_C(0)$  (рис. а). Анализируя полученную резистивную схему замещения, находим начальные значения искомых токов и напряжений  $i_k(0_+), u_k(0_+)$ .

# Порядок расчета переходных процессов в $RC$ -цепях первого порядка

3. Рассчитываем установившиеся значения искомых токов и напряжений, анализируя цепь в момент времени  $t \rightarrow \infty$



# Порядок расчета переходных процессов в $RC$ -цепях первого порядка.

---

4. Определяем входное сопротивление резистивной цепи со стороны зажимов, к которым подключен емкостный элемент. Рассчитываем постоянную времени цепи по формуле

$$\tau = R_{\text{ВХ}} C .$$

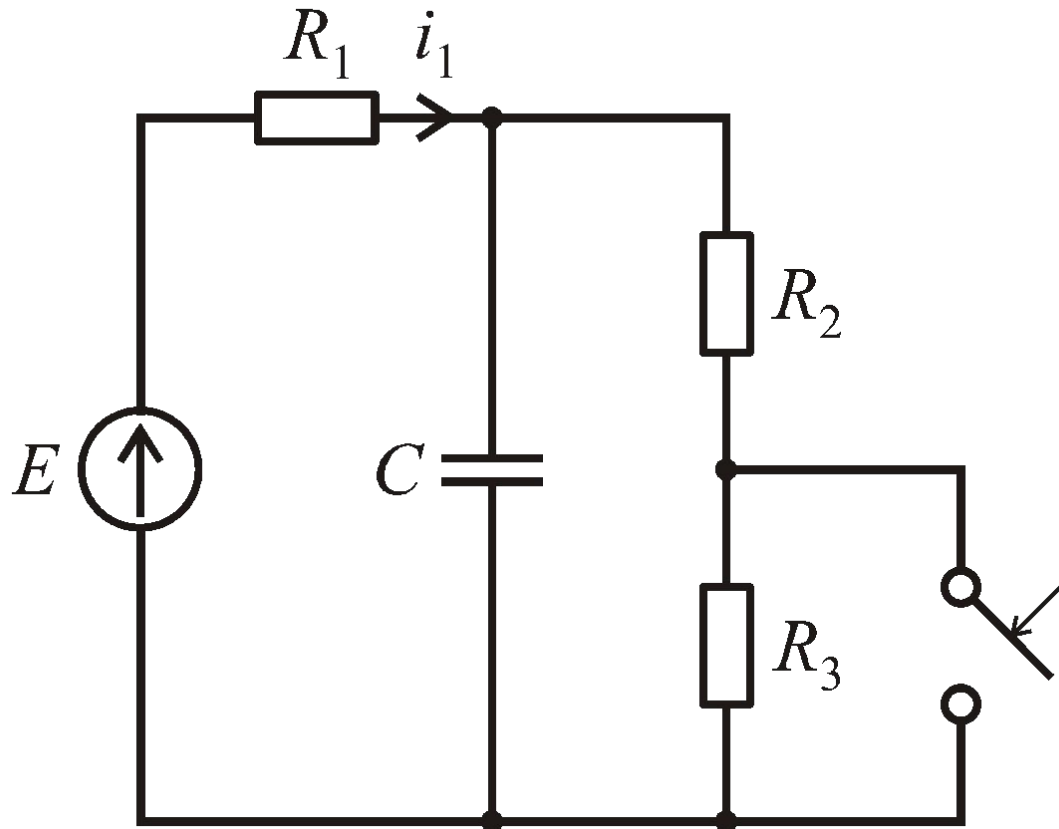
5. Решение записываем в виде

$$i_k(t) = \left[ i_k(0_+) - i_{k_{\text{уст}}} \right] e^{-t/\tau} + i_{\text{уст}}$$

**Важно!** Все переходные токи и напряжения имеют одинаковую постоянную времени.

# Пример расчета переходных процессов в $RC$ -цепях первого порядка.

**Пример.** Ключ в цепи на рис. 1 замыкается. Рассчитать ток после коммутации, если  $R_1 = R_2 = R_3 = 100$  Ом,  $C = 1$  мкФ,  $E = 60$  В.



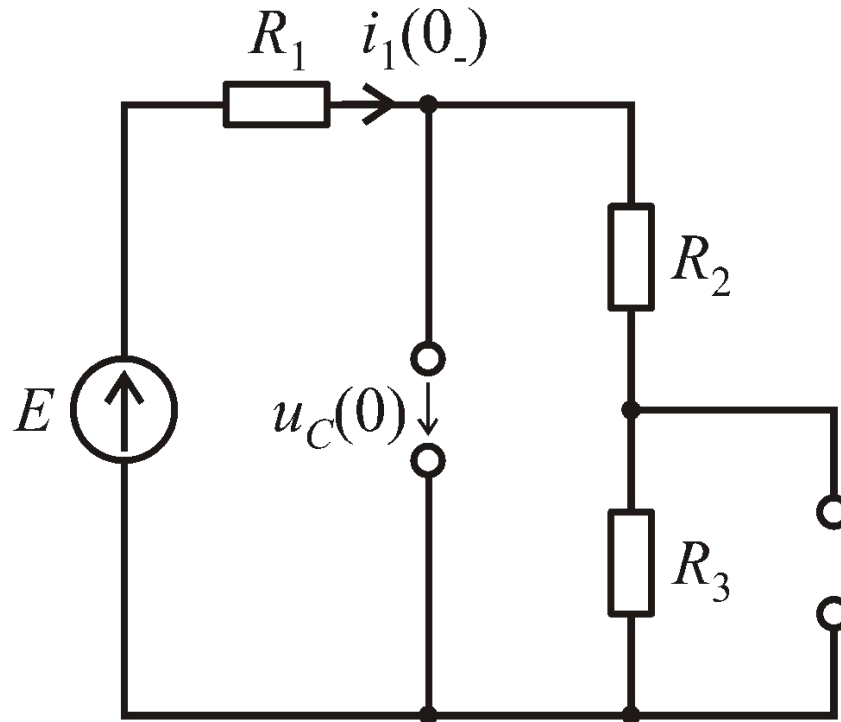
# Пример расчета переходных процессов в $RC$ -цепях первого порядка.

## *Решение.*

1. Определим независимые начальные условия. Для этого рассчитаем режим в цепи при  $t = 0_-$ .

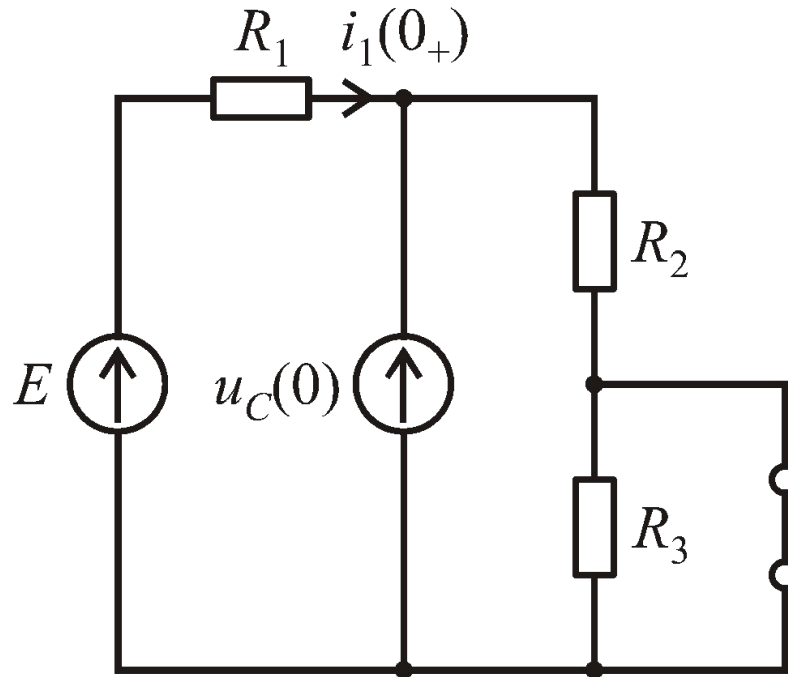
Эквивалентная схема для момента  $t = 0_-$ .

$$i_1(0_-) = 0.2 \text{ А}, u_C(0) = 40 \text{ В.}$$



# Пример расчета переходных процессов в $RC$ -цепях первого порядка.

---



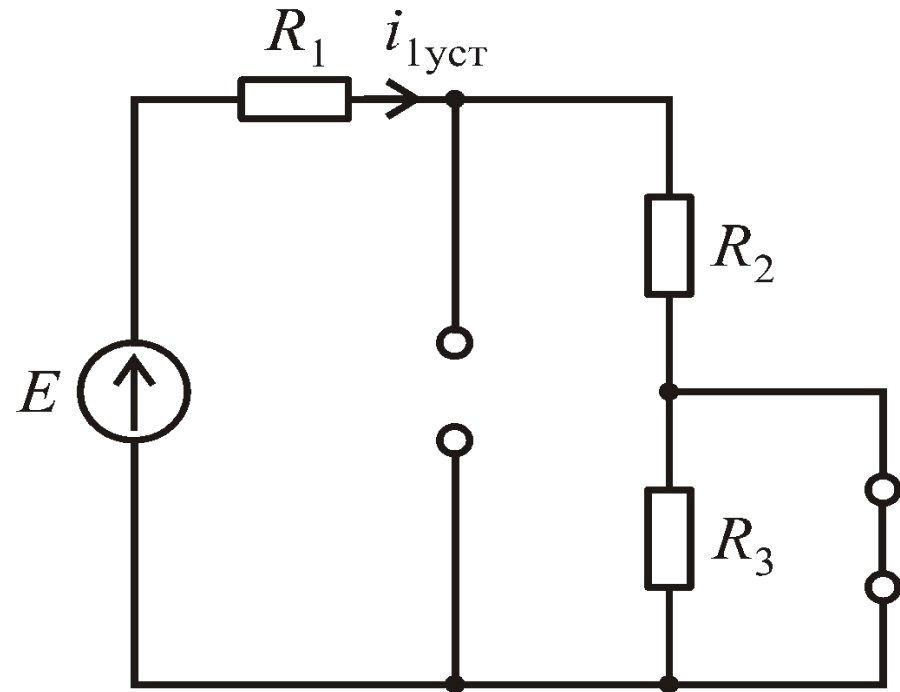
Начальное значение тока  $i_1$  при  $t = 0_+$ .

$$i_1(0_+) = \frac{E - u_C(0)}{R_1} = \frac{60 - 40}{100} = 0.2 \text{ A.}$$

# Пример расчета переходных процессов в $RC$ -цепях первого порядка.

Определим установившееся значение искомого тока.

Схема замещения,  
соответствующая  
Установившемуся  
режиму



Установившееся значение тока

$$i_{1\text{уст}} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{60}{100 + 100} = 0.3 \text{ A}$$

## Пример расчета переходных процессов в $RC$ -цепях первого порядка.

---

Определим входное сопротивление схемы относительно зажимов, к которым подключен емкостный элемент. Исключая источник напряжения, найдем, что

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 \cdot 100}{100 + 100} = 50 \text{ Ом}$$

Постоянная времени цепи

$$\tau = R_{\text{вх}} C = 50 \cdot 10^{-6} = 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

Закон изменения тока

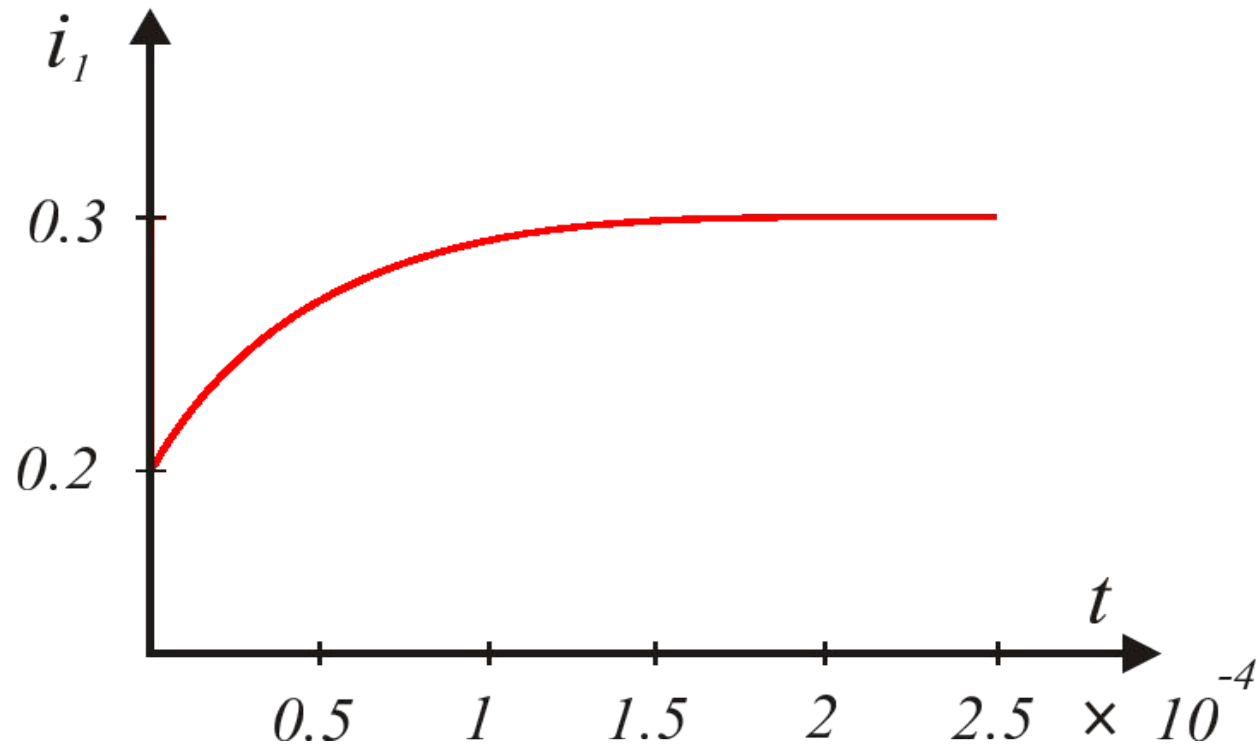
$$i_1(t) = [i_1(0_+) - i_{1\text{уст}}] e^{-t/\tau} + i_{1\text{уст}} = -0,1 e^{-2 \cdot 10^4 t} + 0,3$$



# Пример расчета переходных процессов в $RC$ -цепях первого порядка.

---

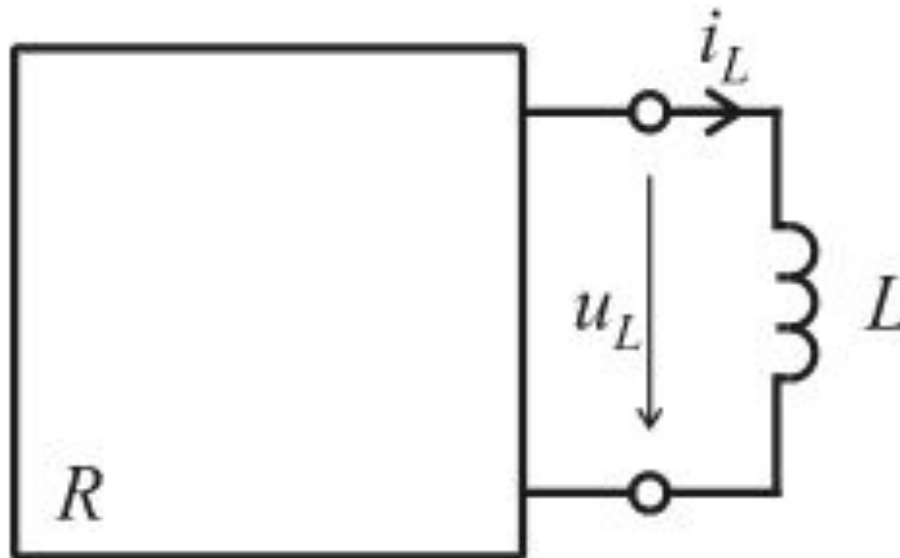
График изменения тока  $i_1(t)$



# Переходные процессы в $RL$ -цепях первого порядка

---

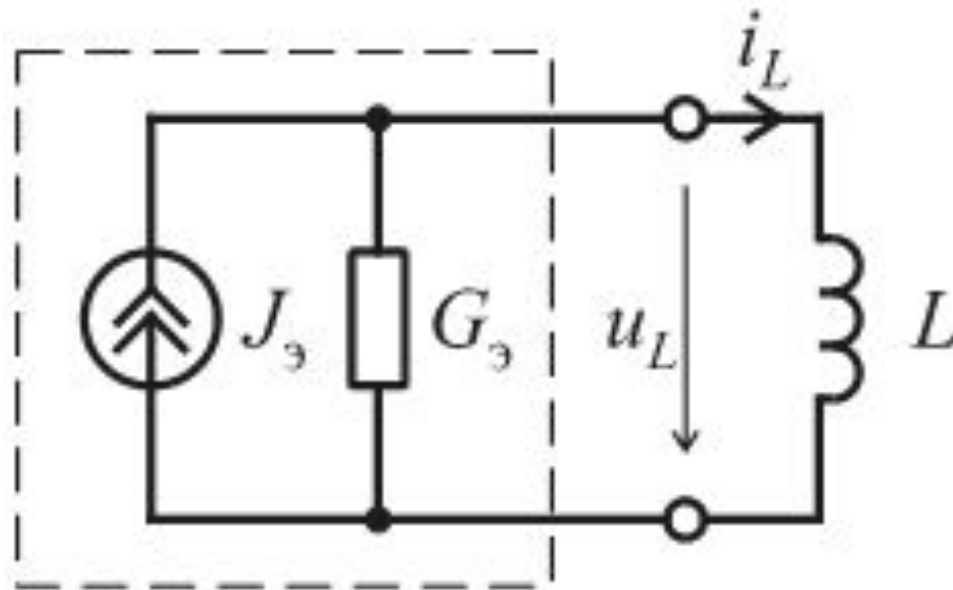
В цепи, показанной на рисунке, в момент  $t = 0$  происходит коммутация



Необходимо определить закон изменения тока  $i_L(t)$ .

# Переходные процессы в $RL$ -цепях первого порядка

Представим резистивный двухполюсник эквивалентной схемой Нортон



Параметры эквивалентного резистивного двухполюсника

$$J_3 = I_{кз}, \quad G_3 = 1/R_{вх}.$$

# Переходные процессы в $RL$ -цепях первого порядка

---

Уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$-J_{\vartheta} + G_{\vartheta} u_L + i_L = 0$$

Учитывая, что  $u_L = L \frac{di_L}{dt}$ , запишем уравнение состояния:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_{\vartheta}}{L} i_L + \frac{R_{\vartheta}}{L} J_{\vartheta}. \quad (1)$$

# Переходные процессы в $RL$ -цепях первого порядка

---

Обозначим  $\tau = L/R_3$ , уравнение (1) примет вид

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{\tau}i_L + \frac{1}{\tau}J_3. \quad (2)$$

$\tau$  называют *постоянной времени*.

Решение уравнения (2) можно представить в следующем виде:

$$i_L(t) = (I_0 - i_{уст})e^{-t/\tau} + i_{уст} \quad (3)$$

Первое слагаемое - свободная составляющая тока  $i_L(t)$ , а второе – установившаяся, или принужденная, составляющая.

# Переходные процессы в $RL$ -цепях первого порядка

---

**Порядок расчета переходных процессов в  $RL$ -цепях первого порядка.**

Переходный процесс вызван замыканием или размыканием идеального ключа в момент  $t = 0$ .

1. Анализируем цепь в момент, предшествующий коммутации (при  $t = 0_-$ ), и определяем ток индуктивного элемента  $i_L(0)$ .

2. Заменяем индуктивный элемент источником тока  $i_L(0)$ . Анализируя полученную схему замещения, определим начальные значения искомых напряжений или токов  $u_k(0_+)$ ,  $i_k(0_+)$

# Переходные процессы в $RL$ -цепях первого порядка

---

3. Замыкаем накоротко зажимы, к которым подключен индуктивный элемент. Определяем установившиеся значения интересующих нас токов и напряжений

$$i_{уст}, u_{уст}$$

4. Определяем входное сопротивление резистивной цепи со стороны зажимов, к которым подключен индуктивный элемент. Рассчитываем постоянную времени цепи по формуле  $\tau = L/R_э$  или  $\tau = L/R_э$ .

Записываем решение в виде

$$i_k(t) = (i_k(0_+) - i_{уст})e^{-t/\tau} + i_{уст}$$

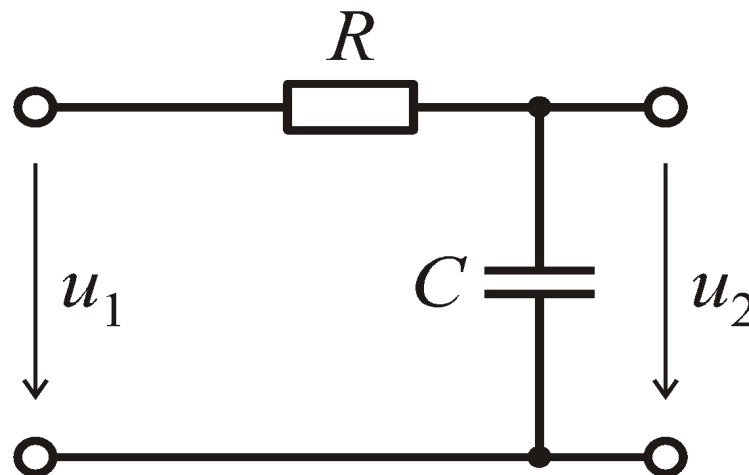
# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

---

Интегрирующие и дифференцирующие цепи находят широкое применение в электронике, системах автоматического управления, при аналого-цифровом преобразовании и генерации периодических колебаний.

**Интегрирующими** называют цепи, напряжение на выходе которых пропорционально интегралу входного напряжения.

Простейшая  
интегрирующая  
цепь





# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

---

Ток в цепи

$$i = C \frac{du_c}{dt} = \frac{u_1 - u_2}{R}$$

Выходное напряжение

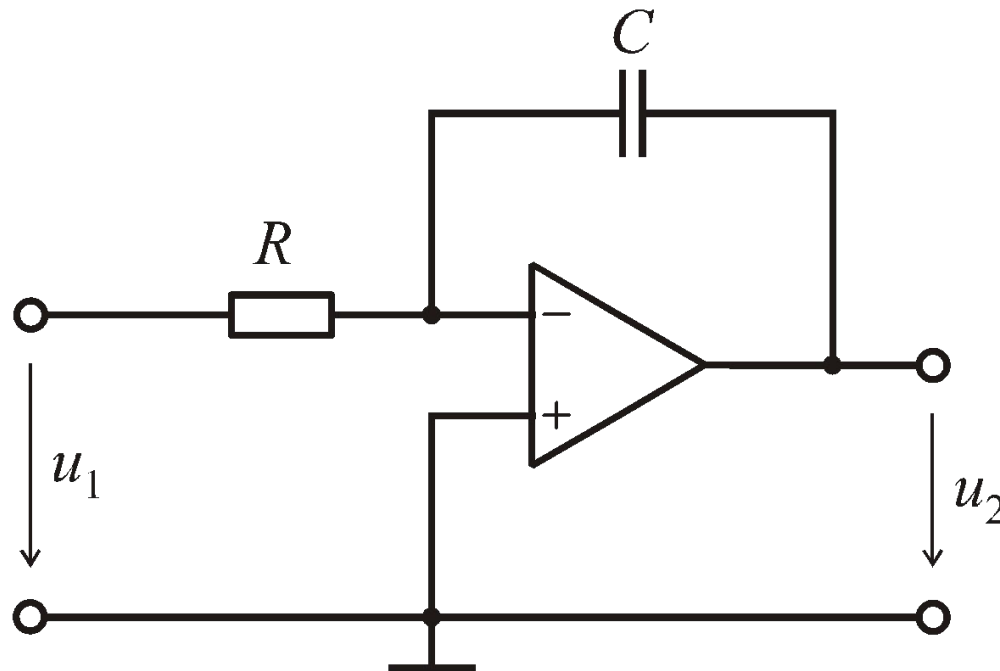
$$u_2(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

При выполнении условия  $u_2 \ll u_1$  за  $u_1$  ~~за  $u_1$~~   
большого значения постоянной времени  $\tau = RC$

$$u_2(t) \approx \frac{1}{RC} \int_0^t u_1(t) dt$$

# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

Инвертирующий интегратор на операционном усилителе

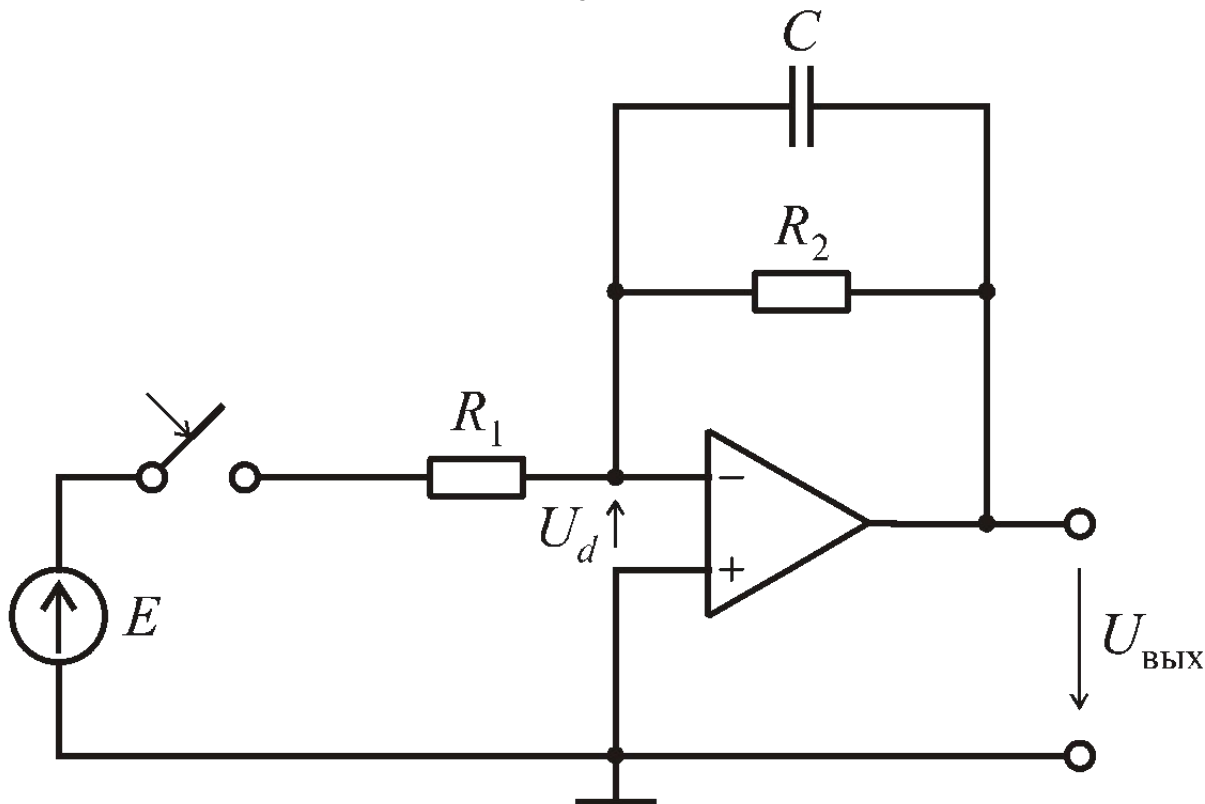


Выходное напряжение

$$u_2(t) = -\frac{1}{RC} \int u_1 dt$$

# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

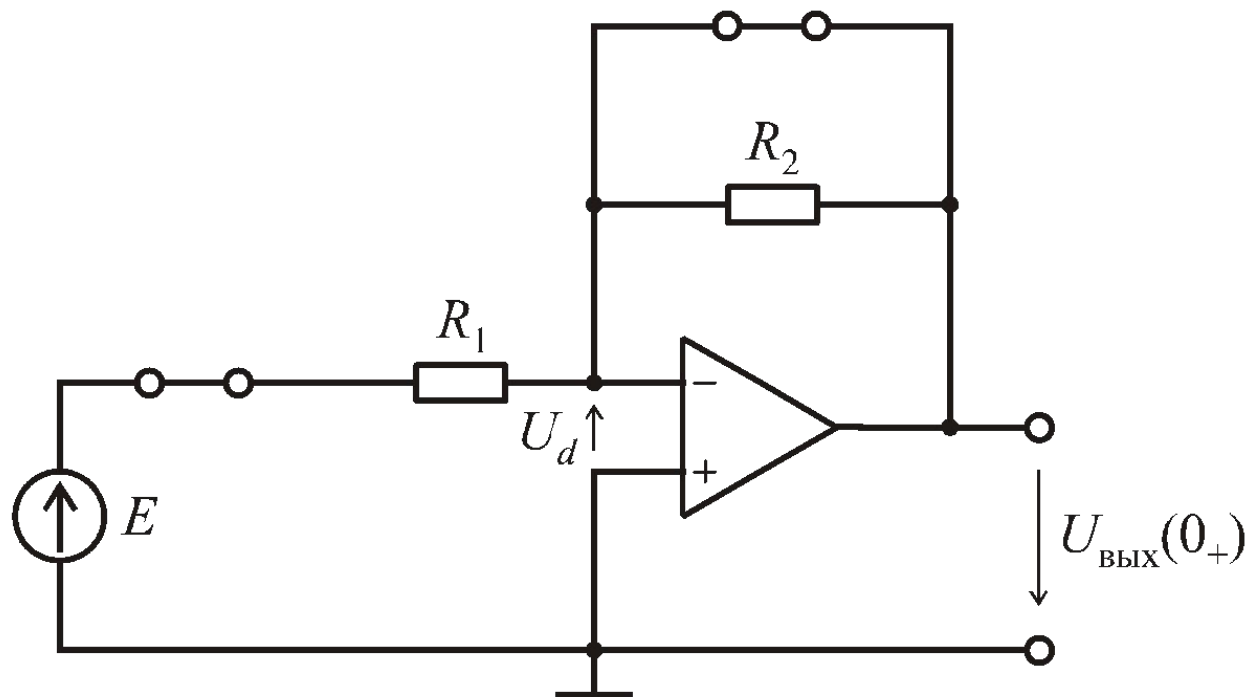
*Пример. Анализ демпфированного интегратора.*  
Рассчитать напряжение на выходе схемы, показанной на рис, при включении на входе источника постоянного напряжения. Операционный усилитель идеальный.



# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

*Решение.* Поскольку сначала ключ был разомкнут, начальные условия в цепи нулевые:  $u_C(0) = 0$

Схема замещения для момента времени  $t = 0_+$



# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

---

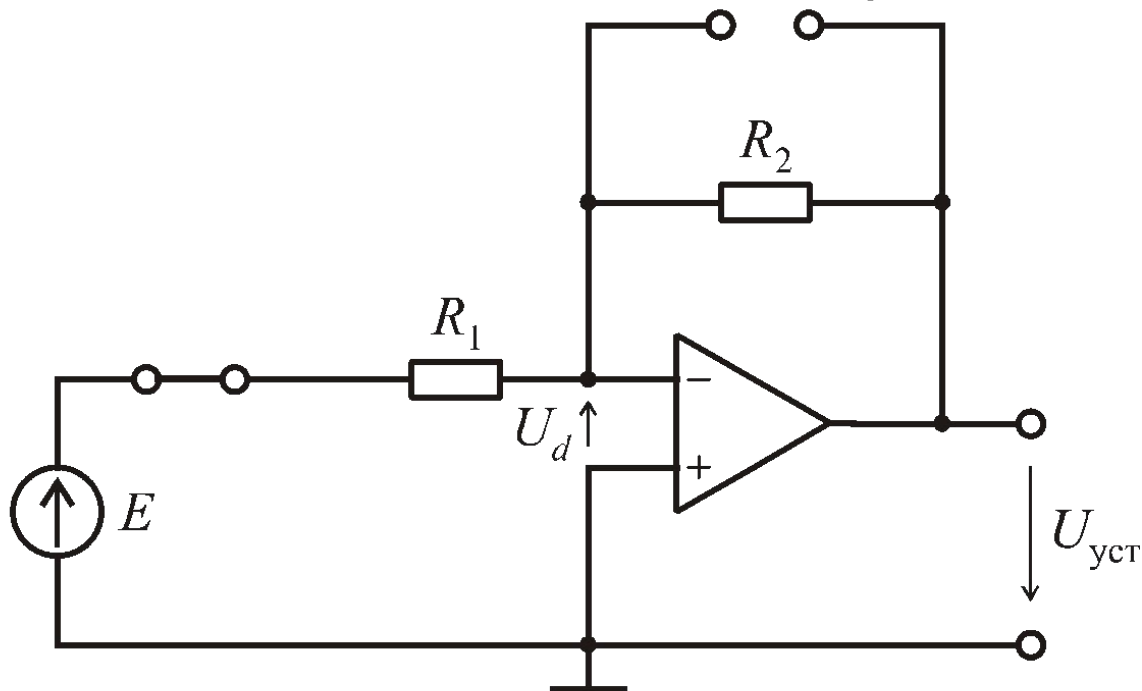
Из уравнения по второму закону Кирхгофа для контура, включающего вход ОУ, емкостный элемент и выход схемы:

$$u_d + u_{\text{ВЫХ}}(0_+) = 0$$

Поскольку  $u_d = 0$   $u_{\text{ВЫХ}}(0_+) = 0$

# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

Эквивалентная схема для момента времени  $t \rightarrow \infty$



Рассматриваемая схема представляет инвертирующий усилитель, напряжение на выходе которого

$$u_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_2}{R_1} E$$

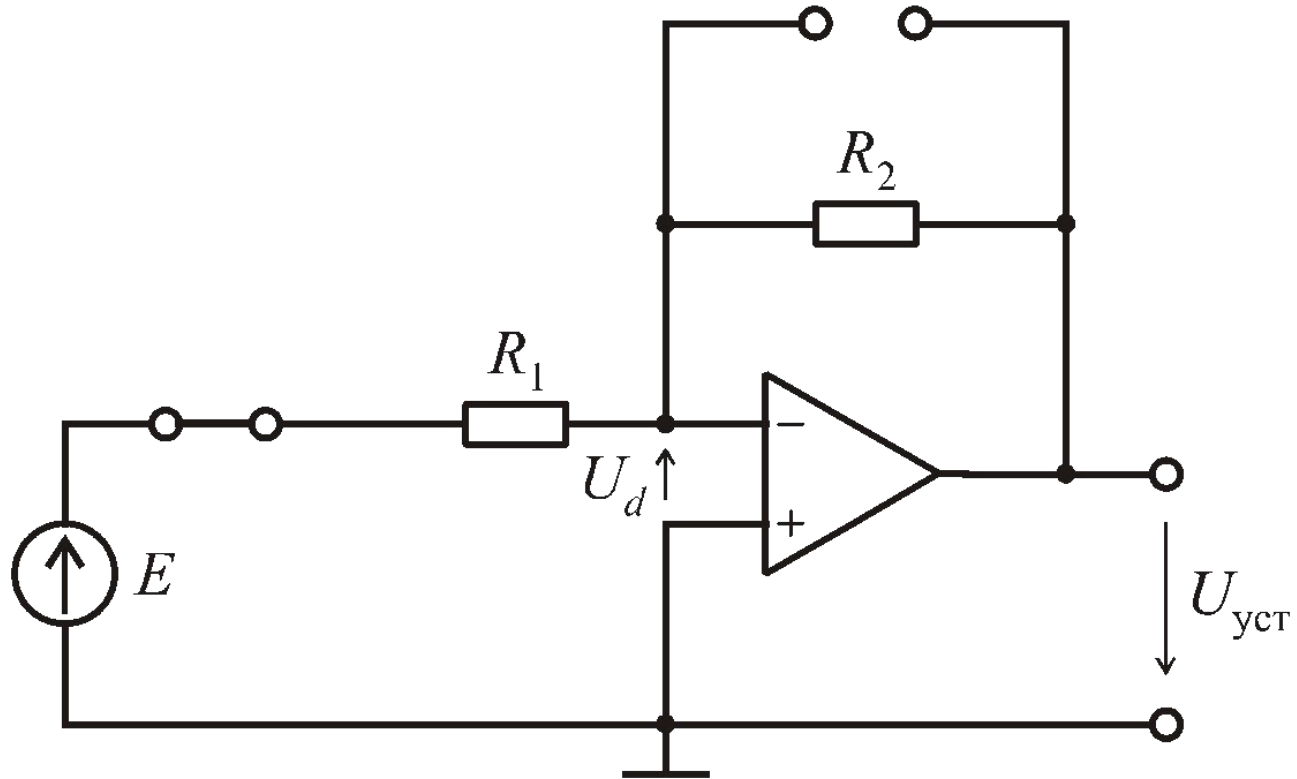
# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

---

Входное сопротивление резистивной части цепи относительно зажимов, к которым подключен емкостный элемент найдем как отношение напряжения холостого хода к току короткого замыкания:

$$R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ХХ}} / I_{\text{КЗ}}.$$

# Интегрирующие и дифференцирующие цепи



$$U_{xx} = ER_2 / R_1,$$



# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

---

Ток короткого замыкания  $I_{\text{КЗ}} = E / R_1$ .

Таким образом,  $R_{\text{ВХ}} = R_2$

Постоянная времени цепи  $\tau = R_{\text{ВХ}} C = R_2 C$ .

Итак, напряжение на выходе интегратора

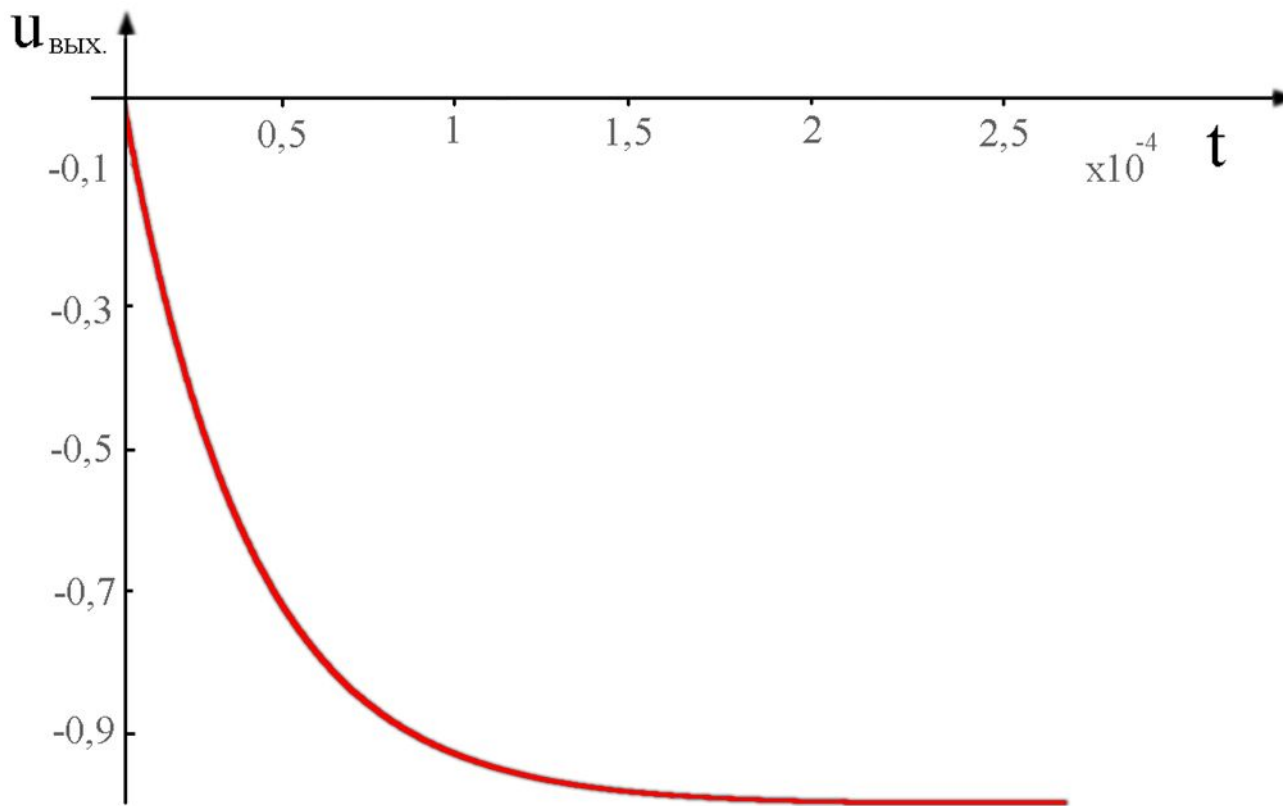
изменяется по закону

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{R_2}{R_1} E e^{-t/\tau} - \frac{R_2}{R_1} E$$

# Интегрирующие и дифференцирующие цепи

График  $u_{\text{ВЫХ}}$  для случая, когда

$$C = 0,1 \text{ мкФ} \quad R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм} \quad E = 1 \text{ В}$$



# Синусоидальные электрические величины

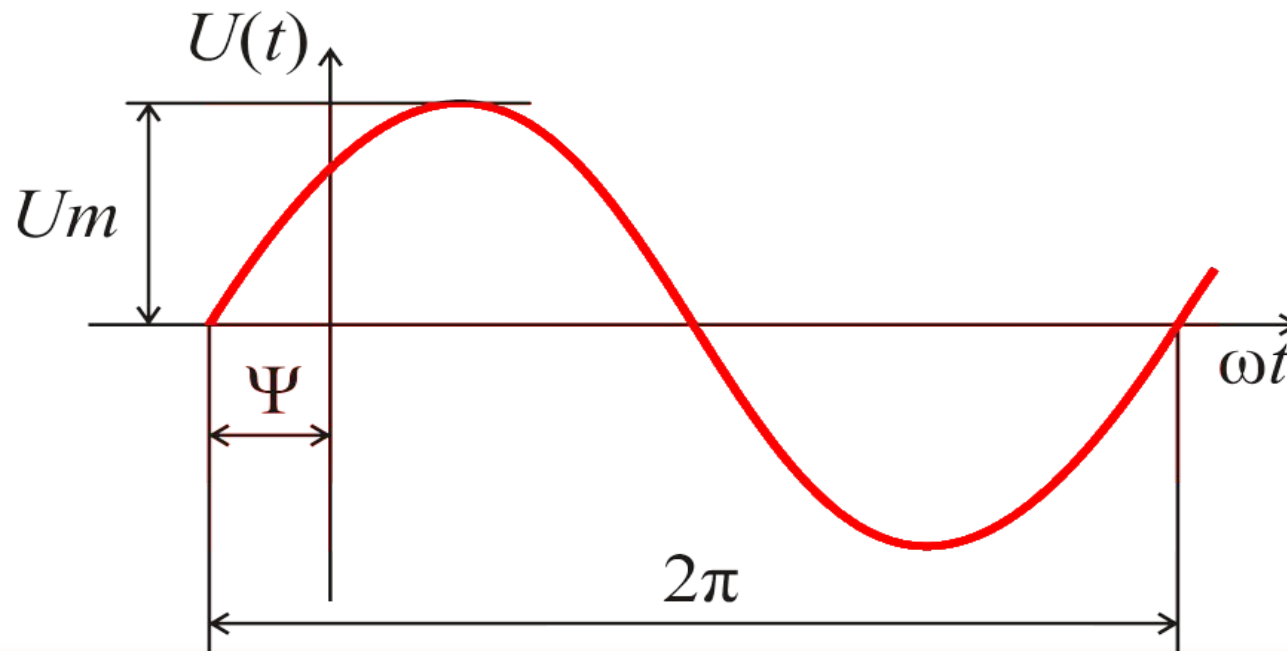
Мгновенное значение синусоидальной функции времени:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

$I_m$  – амплитудное значение.

Аргумент  $\omega t + \psi$  называют фазой синусоидальной функции.

$\omega$  – угловая частота:  $\omega = 2\pi f$



# Синусоидальные электрические величины

---

О величине переменного тока судят по его среднему или действующему значению.

*Среднее значение* периодической функции времени  $f(t)$  определяют по формуле:

$$F_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

# Синусоидальные электрические величины

---

Среднее значение синусоидальной функции за период равно нулю. Поэтому используют понятие среднего значения за половину периода:

$$F_{\text{cp}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt$$

Среднее значение синусоидального тока за половину периода

$$I_{\text{cp}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{\pi} \approx 0.637 I_m$$

# Синусоидальные электрические величины

---

Действующее значение переменного тока  $i(t)$  определяется по формуле:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 dt}$$

Действующее значение синусоидального тока:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I_m \sin \omega t]^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

# Синусоидальные электрические величины

---

За один период переменного тока в резисторе сопротивлением  $R$  выделяется тепловая энергия, равная

$$\int_0^T R i^2 dt = RT \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = RI^2 T$$

*Действующее значение синусоидального тока равно такому постоянному току, при котором в резисторе за период выделяется такое же количество тепла, что и при переменном.*

# Резистивный элемент на синусоидальном токе

---

Пусть ток резистивного элемента изменяется синусоидально

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

В соответствии с законом Ома напряжение

$$u(t) = Ri(t) = RI_m \sin(\omega t + \psi)$$

Напряжение резистивного элемента изменяется синусоидально, причем начальные фазы напряжения и тока одинаковы.

**Ток и напряжение резистивного элемента совпадают по фазе.**



# Резистивный элемент на синусоидальном токе

---

Мгновенная мощность, поглощаемая резистивным элементом, равна:

$$p(t) = u(t)i(t) = U_m I_m \sin^2(\omega t) = \frac{U_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) = UI(1 - \cos 2\omega t)$$

Мгновенная мощность резистивного элемента – пульсирующая функция времени.

# Резистивный элемент на синусоидальном токе

---

Среднее значение мгновенной мощности  $p(t)$  за период  $T$  называют *активной* или *средней* мощностью:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

Активная мощность резистивного элемента

$$P = UI = RI^2$$

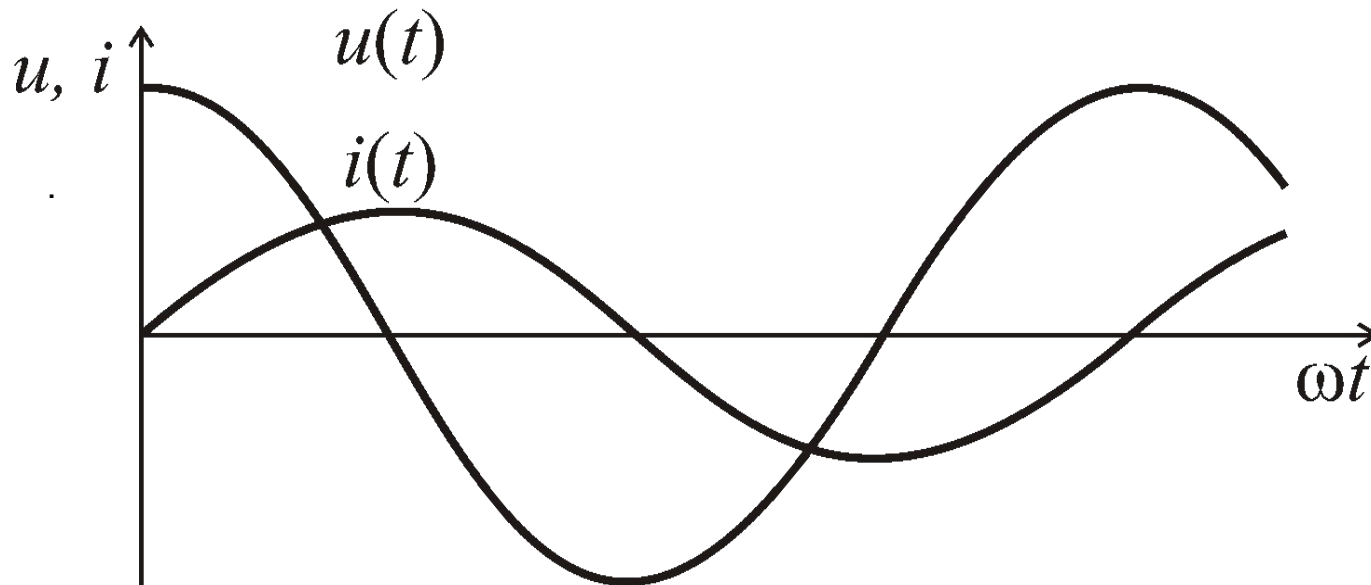
# Индуктивный элемент на синусоидальном токе

Если ток индуктивного элемента изменяется синусоидально

$$i = I_m \sin \omega t$$

то напряжение

$$u = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$



Ток индуктивного элемента отстает по фазе от приложенного напряжения на угол  $\frac{\pi}{2}$  или на четверть периода.

# Индуктивный элемент на синусоидальном токе

---

Амплитуда напряжения индуктивного элемента

$$U_m = \omega L I_m = x_L I_m$$

Величину  $x_L = \omega L$ , имеющую размерность сопротивления, называют *индуктивным сопротивлением*. Индуктивное сопротивление является линейной функцией частоты  $\omega$ .

# Индуктивный элемент на синусоидальном токе

---

Мгновенная мощность индуктивного элемента

$$p(t) = u(t)i(t) = U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t$$

Энергия, запасаемая в магнитном поле индуктивного элемента в первую четверть периода, во вторую четверть периода возвращается во внешнюю цепь.

Активная мощность индуктивного элемента равна нулю:  $P = 0$

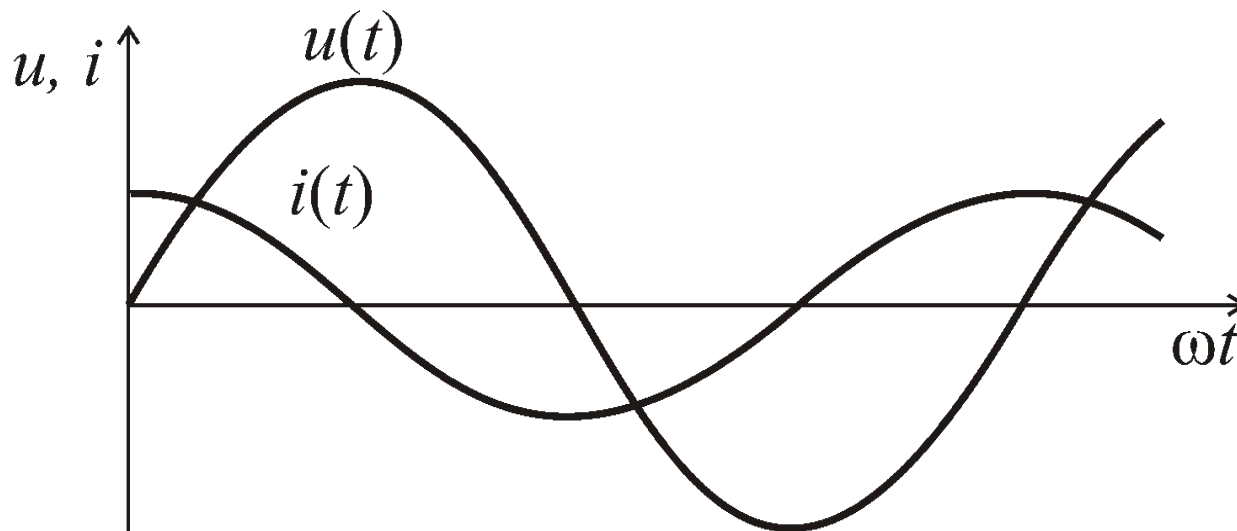
# Емкостный элемент на синусоидальном токе

---

Если напряжение емкостного элемента – синусоидальная функция времени  $u(t) = U_m \sin \omega t$

то ток

$$i(t) = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = \omega C U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$



Ток емкостного элемента опережает напряжение  $u(t)$  на угол  $\frac{\pi}{2}$  или на четверть периода.

# Емкостный элемент на синусоидальном токе

---

Амплитуда тока емкостного элемента

$$I_m = \omega C U_m = b_C U_m$$

Величина  $b_C$  – емкостная проводимость.

Величина, обратная емкостной проводимости, – емкостное сопротивление:

$$x_C = \frac{1}{\omega C}$$

Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте приложенного напряжения.

# Емкостный элемент на синусоидальном токе

---

Мгновенная мощность емкостного элемента

$$p(t) = u(t)i(t) = U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = UI \sin 2\omega t$$

Энергия, запасаемая в электрическом поле емкостного элемента в первую четверть периода, во вторую четверть периода возвращается во внешнюю цепь.

Активная мощность емкостного элемента равна нулю:  
 $P = 0$



# Резонанс и его значение в радиоэлектронике

---

*Резонанс* – такой режим цепи синусоидального тока, содержащей индуктивные и емкостные элементы, при котором реактивное сопротивление и проводимость равны нулю.

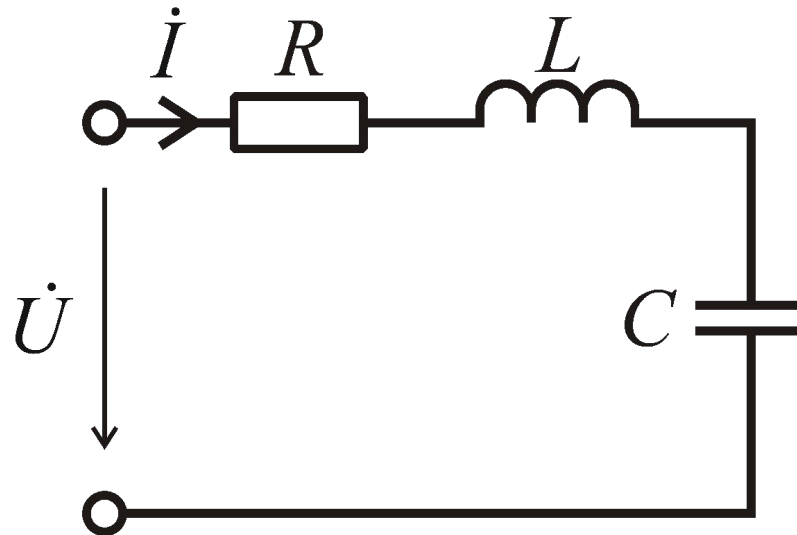
При резонансе приложенное напряжение и входной ток совпадают по фазе. Цепи, в которых возникает явление резонанса, называют *резонансными цепями* или *колебательными контурами*.

# Резонанс напряжений

---

*Резонанс напряжений* наблюдается в цепях с последовательным соединением ветвей, содержащих  $L$  и  $C$  элементы.

Простейшей цепью, в которой наблюдается резонанс напряжений, является последовательный колебательный контур.



# Резонанс напряжений

---

Комплексное сопротивление последовательного колебательного контура

$$\underline{Z} = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

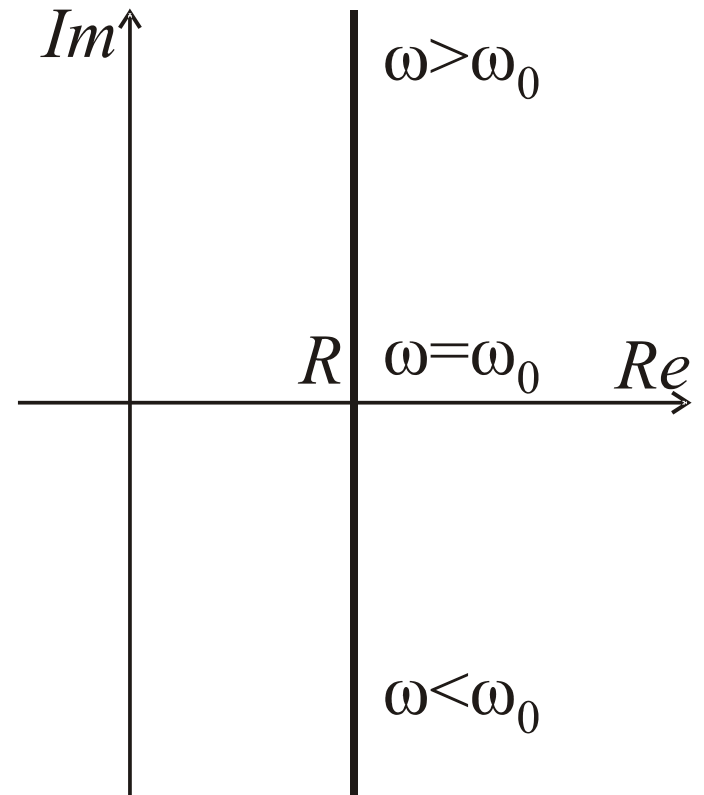
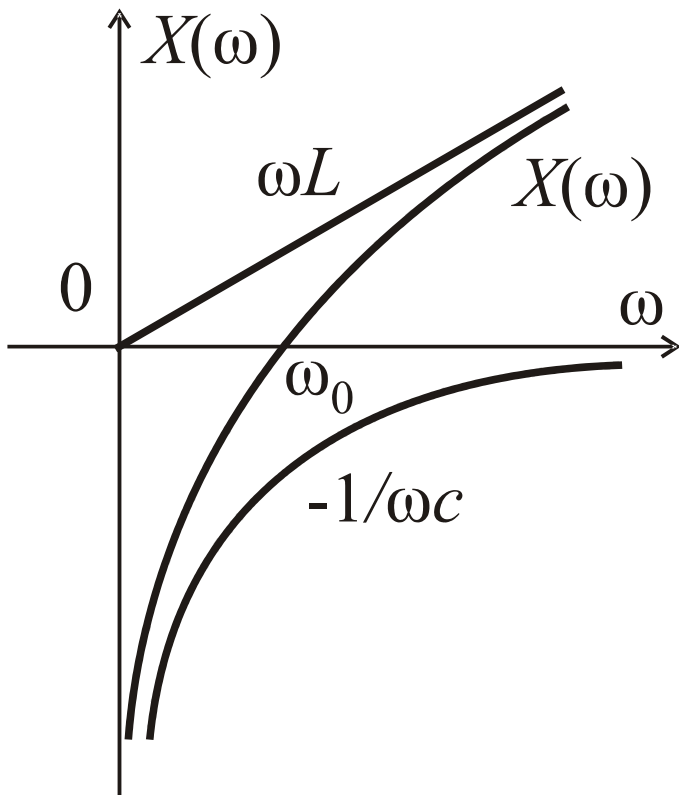
Резонанс напряжений наступает, когда реактивное сопротивление обращается в нуль, т. е.

$$X = \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0$$

Это происходит при резонансной частоте  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

# Резонанс напряжений

Частотные характеристики последовательного колебательного контура



# Резонанс напряжений

---

Поскольку при резонансе напряжений реактивное сопротивление  $X = 0$ , полное сопротивление цепи принимает минимальное значение

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \min$$

Вследствие этого ток в цепи достигает максимального значения. При резонансе ток и напряжение совпадают по фазе, поэтому коэффициент мощности  $\cos \phi = 1$

# Резонанс напряжений

---

Сопротивления индуктивного и емкостного элементов в последовательном колебательном контуре при резонансе равны:

$$x_L = x_C = \omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Эту величину называют *характеристическим сопротивлением* контура и обозначают  $\rho$  :

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

# Резонанс напряжений

---

При резонансе входное напряжение последовательного колебательного контура равно напряжению резистивного элемента. Поэтому

$$U_L = U_C = \frac{\rho}{R} U_{\text{ВХ}} = Q U_{\text{ВХ}}$$

$$Q = \rho / R$$

# Резонанс напряжений

---

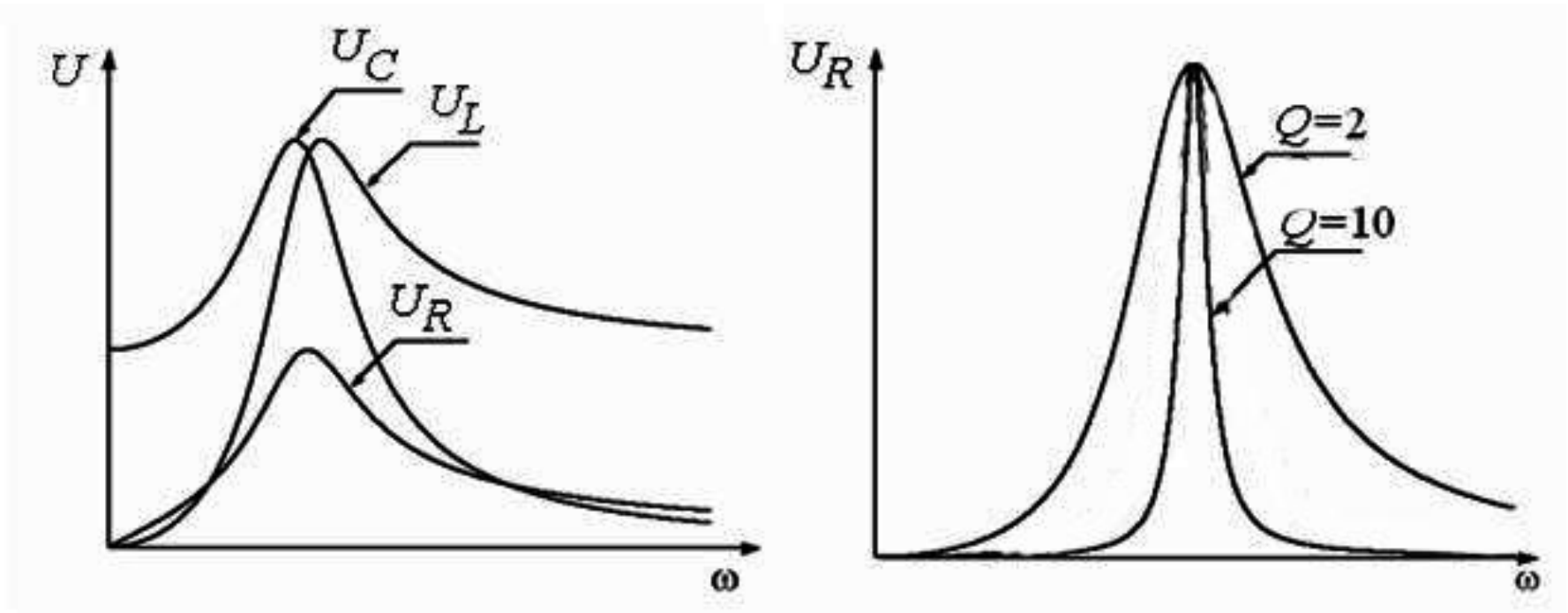
Величину  $Q = \rho/R$  называют добротностью колебательного контура. Добротность равна отношению напряжения на индуктивном и емкостном элементах в режиме резонанса к напряжению, приложенному к контуру.

$$Q = \frac{\rho I}{RI} = \frac{U_L}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_C}{U_{\text{ВХ}}}$$



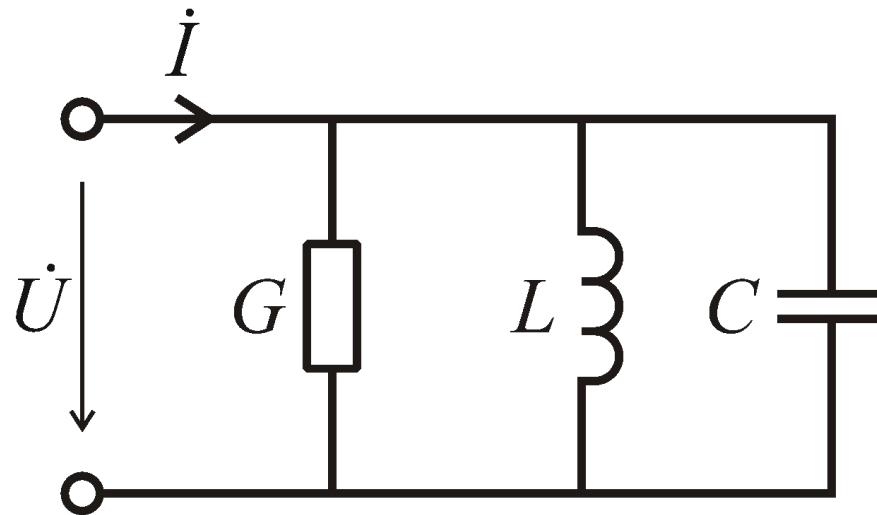
# Частотные характеристики последовательного колебательного контура

---



# Резонанс токов

Простейшей цепью, в которой может наблюдаться резонанс токов, является параллельный колебательный контур



Комплексная проводимость контура

$$\underline{Y} = G + j \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

# Резонанс токов

---

Резонанс токов наступает, когда реактивная проводимость обращается в нуль:

$$B = \left( \frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = 0$$

Резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

На резонансной частоте полная проводимость контура минимальна:

$$Y(\omega_0) = G$$

# Резонанс токов

---

Полное сопротивление параллельного колебательного контура на частоте резонанса максимально

$$Z(\omega_0) = \frac{1}{Y(\omega_0)}$$

# Резонанс токов

---

Следовательно, при резонансе токов ток неразветвленной части цепи имеет наименьшее значение и равен току резистивного элемента:

$$I_{\text{рез}} = U / R$$

При резонансе токи емкостного и индуктивного элементов

$$I_C = \omega_0 C U = Q I$$

# Резонанс токов

---

Величину  $Q = \frac{R}{\rho}$  называют добротностью

параллельного колебательного контура. Как и в случае последовательного колебательного контура, характеристическое сопротивление

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Добротность параллельного колебательного контура тем больше, чем больше сопротивление резистора  $R$ , включенного параллельно индуктивному и емкостному элементам.

# Ряд Фурье в тригонометрической форме

---

Ряд Фурье в тригонометрической форме

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t))$$

$\omega_1 = (2\pi / T)$  – угловая частота первой гармоники

# Ряд Фурье в тригонометрической форме

---

Коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  вычисляются по формулам

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega_1 t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega_1 t) dt$$

$a_0 / 2$  – постоянная составляющая, равная среднему значению функции  $f(t)$  за период:

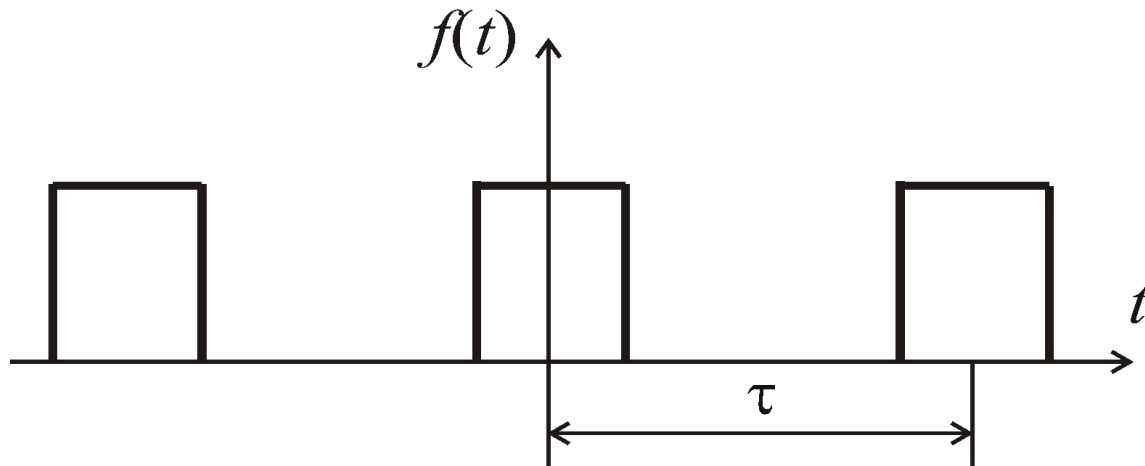
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$



# Случаи симметрии

---

Случай 1. Четная функция:  $f(t) = f(-t)$



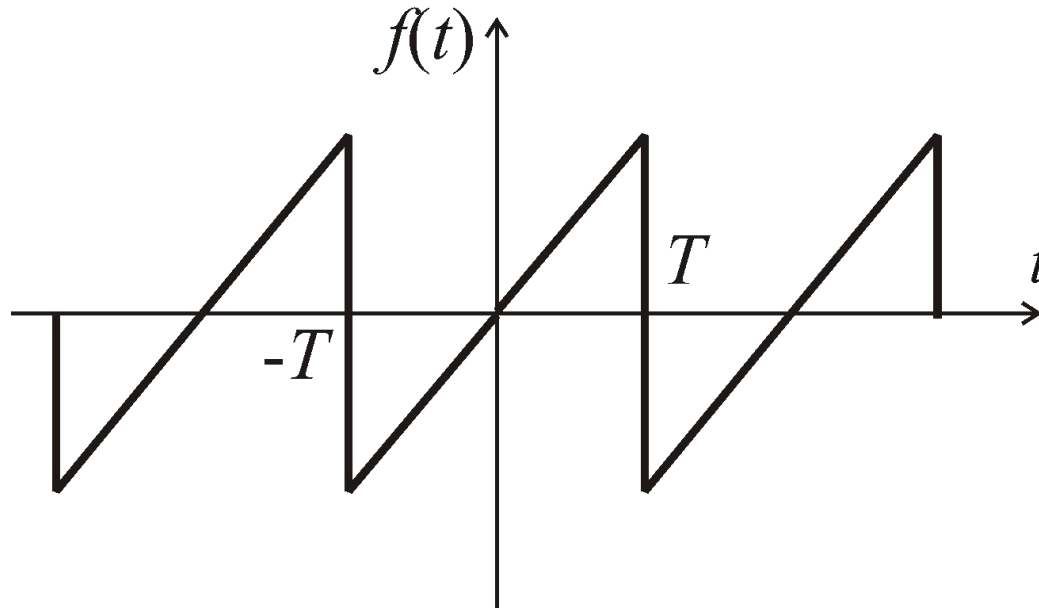
Разложение в ряд Фурье четной функции содержит только косинусы:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_1 t)$$

Коэффициенты при синусных составляющих  $b_n = 0$ ,  $n = 1, 2, \dots$

# Случаи симметрии

Случай 2. Нечетная функция:  $-f(t) = f(-t)$



Разложение в ряд Фурье нечетной функции содержит только синусы:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_1 t)$$

# Случаи симметрии

---

*Случай 3.* Функция  $f(t)$  симметрична относительно оси абсцисс при совмещении двух полупериодов во времени, т. е.

$$f(t) = -f(t + T/2).$$

Четные гармоники, а также составляющая  $a_0$  равны нулю, т. е.

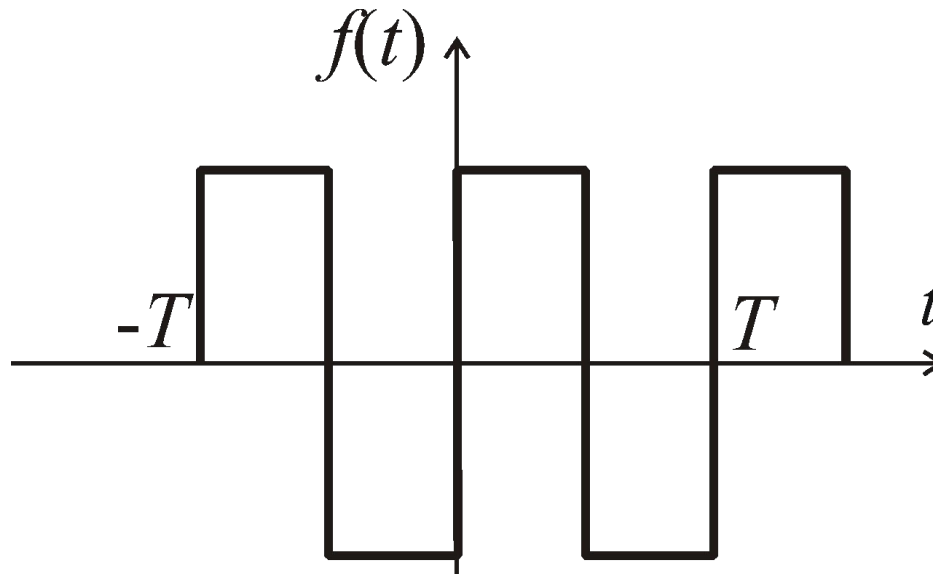
$$a_n = b_n = 0, n = 0, 2, 4, \dots$$

# Случаи симметрии

---

Пример – последовательность прямоугольных импульсов. Разложение в ряд Фурье такой функции содержит только нечетные гармоники:

$$f(t) = \frac{4U}{\pi} \left( \sin(\omega_1 t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_1 t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_1 t) + \dots \right)$$



$U$  – амплитуда прямоугольных импульсов.

# Комплексная форма ряда Фурье

---

Ряд Фурье в тригонометрической форме

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t))$$

Воспользуемся равенствами:

$$\cos(n\omega_1 t) = \frac{e^{jn\omega_1 t} + e^{-jn\omega_1 t}}{2}; \quad \sin(n\omega_1 t) = \frac{e^{jn\omega_1 t} - e^{-jn\omega_1 t}}{j2}$$

# Комплексная форма ряда Фурье

---

Ряд Фурье примет вид:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} ((a_n - jb_n)e^{jn\omega_1 t} + (a_n + jb_n)e^{-jn\omega_1 t})$$

Коэффициент  $a_n$  – четная, а  $b_n$  – нечетная функция индекса  $n$ :

$$a_n = a_{-n}, \quad b_n = -b_{-n}$$

Поэтому элемент  $-jb_n$  можно рассматривать как слагаемое с отрицательным индексом.

# Комплексная форма ряда Фурье

---

Изменив нижний предел суммирования на  $-\infty$ , получим

$$f(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (a_n - jb_n) e^{jn\omega_1 t} = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{A}_n e^{jn\omega_1 t}$$

$\underline{A}_n = a_n - jb_n$  – комплексный коэффициент ряда Фурье.

В показательной форме:  $\underline{A}_n = A e^{j\Psi}$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \Psi_n = -\operatorname{arctg}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

# Комплексный частотный спектр

---

Совокупность комплексных коэффициентов гармоник называют *комплексным частотным спектром* функции  $f(t)$

Амплитуды гармоник  $A_n$  образуют *амплитудный спектр*.

Начальные фазы  $\Psi_n$  образуют *фазовый спектр*.



# Комплексный частотный спектр

---

Комплексная амплитуда  $n$ -й гармоники

$$\underline{A}_n = a_n - jb_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) (\cos(n\omega_1 t) - j \sin(n\omega_1 t)) dt$$

Используя равенства

$$\cos(n\omega_1 t) = \frac{e^{jn\omega_1 t} + e^{-jn\omega_1 t}}{2}; \quad \sin(n\omega_1 t) = \frac{e^{jn\omega_1 t} - e^{-jn\omega_1 t}}{j2}$$

получим, что комплексный коэффициент ряда Фурье

$$\underline{A}_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega_1 t} dt$$

# Электрические свойства полупроводников

---

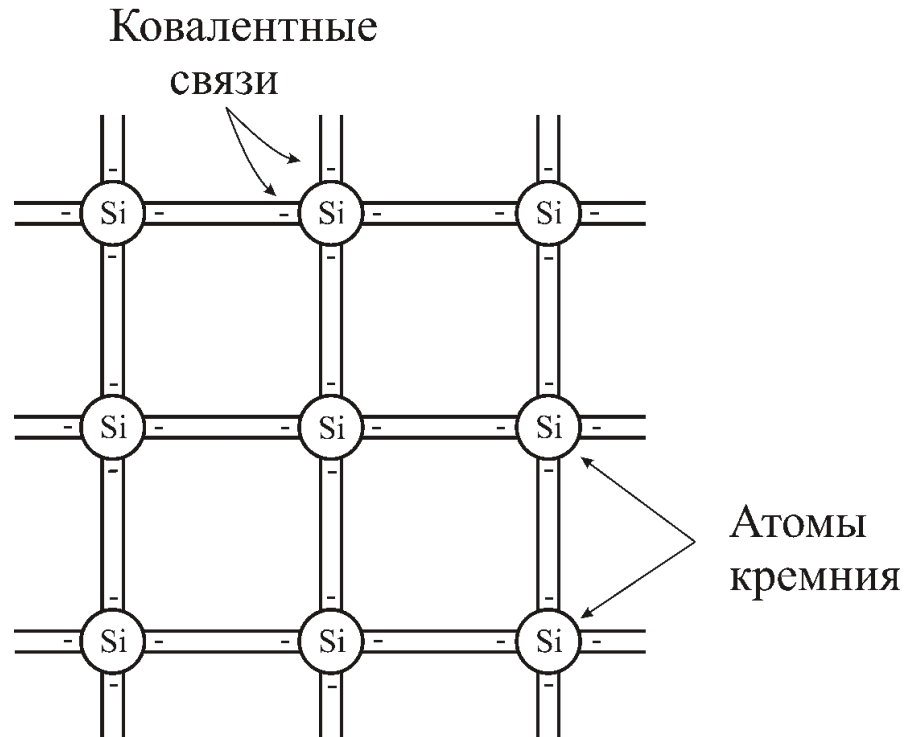
*Полупроводниками* называют вещества, удельная проводимость которых имеет промежуточное значение между удельными проводимостями металлов и диэлектриков.

В отличие от металлов в полупроводниках носители заряда возникают при повышении температуры или поглощении энергии от другого источника.

Кроме того, в полупроводниках электропроводность осуществляется двумя различными видами движения электронов. Проводимость полупроводников можно менять в широких пределах, добавляя ничтожно малые количества примесей.

# Электрические свойства полупроводников

## Структура кристалла кремния



Атомы кремния способны объединять свои валентные электроны с другими атомами кремния с помощью ковалентных связей.

# Электрические свойства полупроводников

---

При освобождении электрона в кристаллической решетке появляется незаполненная межатомная связь. Такие «пустые» места с отсутствующими электронами получили название *дырок*.

Возникновение дырок в кристалле полупроводника создает дополнительную возможность для переноса заряда. Дырка может быть заполнена электроном, перешедшим под действием тепловых колебаний от соседнего атома.

Последовательное заполнение свободной связи электронами эквивалентно движению дырки в направлении, противоположном движению электронов, что равносильно перемещению положительного заряда.

# Электрические свойства полупроводников

---

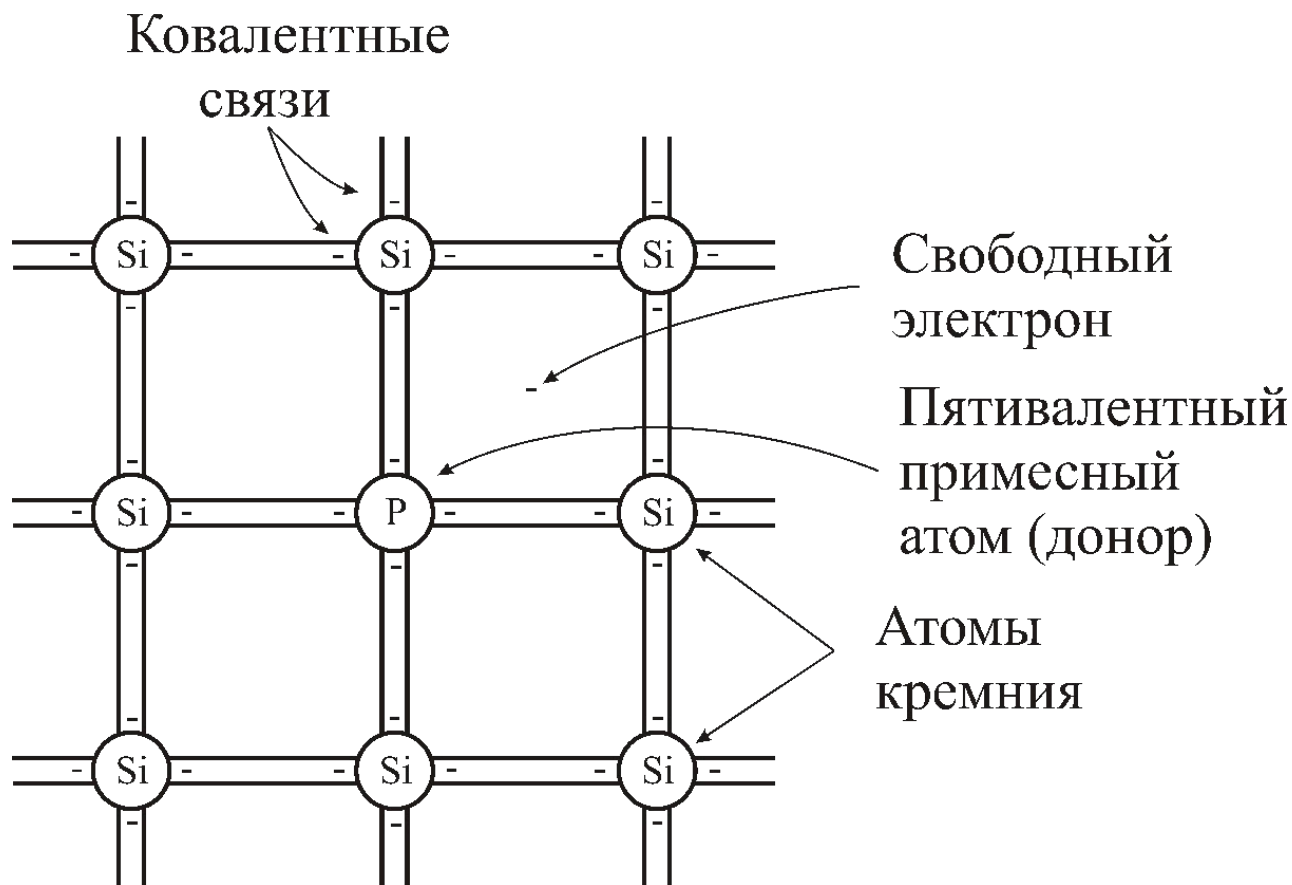
Таким образом, в полупроводнике имеются два типа носителей заряда – электроны и дырки, а общая проводимость полупроводника является суммой электронной проводимости ( $n$ -типа) и дырочной проводимости ( $p$ -типа).

Для увеличения проводимости чистых полупроводниковых материалов применяют *легирование* – добавление небольших количеств посторонних элементов, называемых примесями.

Используются два типа примесей. Примеси первого типа – пентавалентные – состоят из атомов с пятью валентными электронами. Примеси второго типа – трехвалентные – состоят из атомов с тремя валентными электронами.

# Электрические свойства полупроводников

Структура кристалла кремния, легированного пентавалентным материалом (фосфором)



# Электрические свойства полупроводников

---

Атом фосфора называют *донором*, поскольку он отдает свой лишний электрон.

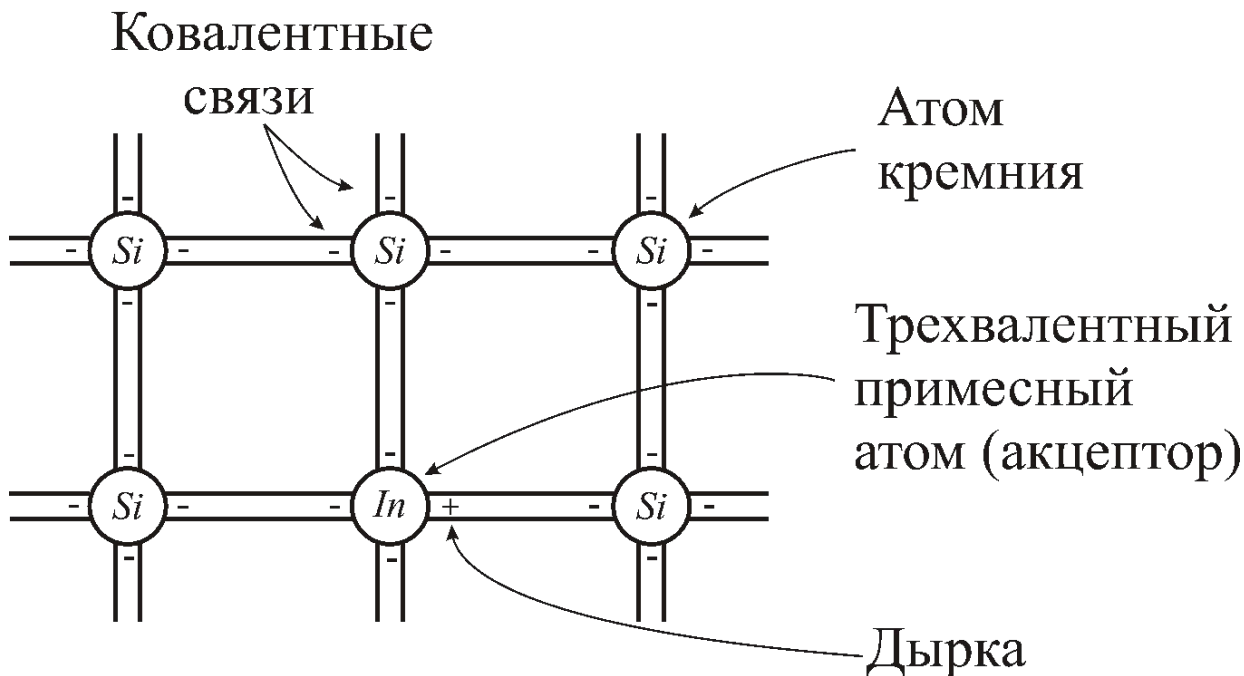
Электроны в таком полупроводнике являются *основными носителями*, а дырки – *неосновными носителями*. Основные носители имеют отрицательный заряд, поэтому такой материал называется полупроводником *n*-типа.

В качестве донорных примесей для германия и кремния используют фосфор, мышьяк, сурьму.

# Электрические свойства полупроводников

Когда полупроводниковый материал легирован трехвалентными атомами, например атомами индия (In), то эти атомы разместят свои три валентных электрона среди трех соседних атомов. Это создаст в ковалентной связи дырку.

Структура кристалла кремния, легированного трехвалентным материалом





# Электрические свойства полупроводников

---

Так как дырки легко принимают электроны, то атомы, которые вносят в полупроводник дополнительные дырки, называются *акцепторами*.

Дырки являются основными носителями, а электроны – неосновными. Поскольку основные носители имеют положительный заряд, материал называется полупроводником *p*-типа.

В качестве акцепторных примесей в германии и кремнии используют бор, алюминий, галлий, индий.

# Вольт-амперная характеристика $p$ – $n$ -перехода

---

Контакт двух полупроводников с различными типами проводимости называется  $p$ – $n$ -переходом. Сопротивление  $p$ – $n$ -перехода зависит от направления тока через него.

Поскольку концентрация электронов в  $n$ -области значительно больше их концентрации в  $p$ -области, происходит диффузия электронов из  $n$ -области в  $p$ -область. В  $n$ -области остаются неподвижные положительно заряженные ионы доноров.

Одновременно происходит диффузия дырок из  $p$ -области в  $n$ -область. За счет этого приграничная  $p$ -область приобретает отрицательный заряд, обусловленный отрицательно заряженными ионами акцепторов.

# Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода

Прилегающие к  $p-n$ -переходу области образуют слой объемного заряда, обедненный основными носителями. В слое объемного заряда возникает контактное электрическое поле  $E_k$ , препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок из одной области в другую.

