



# Основы теории цепей. Лекция 1

02.09.2021 г.

Жихарева Галина Владимировна

Кафедра ОРТ

# Содержание



- 0. Организационные вопросы
- 1. Введение в теорию цепей
  - 1.1. Физические основы теории электрических цепей
  - 1.2. Модель электрической цепи
  - 1.3. Элементарные двухполюсники

# 0. Организационные вопросы

## Учебный план

№ п/п	ДИСЦИПЛИНЫ	Часы занятий в семестре				Экзамены	Зачеты с оценкой	Зачеты	Защиты КР/КР	Часы уч. зан. в нед.			Вид расчетного задания	Консультации (КПР)	Зачетные единицы	Лекционный поток	Количество студентов	Кафедра
		Всего часов	Обязательных	Контроль + ПА	СР( +ПА+ ИККП для КТР)					Лекции	Лабораторные	Практические						
9	Основы теории цепей	216	96	36	84	*				3	1	2	Р		6	ЭР-11-16-20 ЭР-21,22-20	142	ОРТ

# 0. Организационные вопросы

## Контрольные мероприятия

КМ-1 Разветвленная цепь постоянного тока.  
Лабораторная работа № 1

КМ-2 Разветвленная цепь постоянного тока.  
Тест № 1

КМ-3 Контроль выполнения пп. 1-2 расчетного задания

КМ-4 Методы анализа сложных цепей (постоянный ток).  
Контрольная работа № 1

КМ-5 RC-цепи при гармоническом внешнем воздействии.  
Лабораторная работа № 2

КМ-6 RC-цепи при гармоническом внешнем воздействии.  
Тест № 2

КМ-7 Метод комплексных амплитуд.  
Контрольная работа № 2

КМ-8 Контроль выполнения пп. 3-5 расчетного задания

КМ-9 Частотные характеристики RC-цепей.  
Лабораторная работа № 3

КМ-10 Частотные характеристики RC-цепей.  
Тест № 3

КМ-11 Частотные характеристики линейных цепей.  
Контрольная работа № 3

КМ-12 Контроль выполнения пп. 6-8 расчетного задания

КМ-13 Системы параметров четырехполюсников.  
Контрольная работа № 4

КМ-14 Частотные характеристики последовательного  
колебательного контура. Лабораторная работа № 4

КМ-15 Частотные характеристики последовательного  
колебательного контура. Тест № 4

# 0. Организационные вопросы

## Контрольные мероприятия

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %															
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6	КМ-7	КМ-8	КМ-9	КМ-10	КМ-11	КМ-12	КМ-13	КМ-14	КМ-15
	Срок КМ:	4	4	5	6	8	8	9	11	12	12	13	14	15	16	16
Основные понятия теории электрических цепей		+	+													
Методы анализа сложных цепей		+	+	+	+											
Методы анализа линейных цепей при гармонических внешних воздействиях						+	+	+	+				+	+		
Частотные характеристики линейных цепей										+	+	+	+		+	+
Вес КМ:		5	5	4	8	5	5	8	12	5	5	8	12	8	5	5

# 0. Организационные вопросы

---

## Лаборатория

- 4 работы по 2 пары (допуск, выполнение, отчет -> оценка за КМ);
- 4 защиты (тесты) дистанционно на неделях КМ по лаборатории;
- необходимо заранее разделиться на 8 бригад по 2-3 человека (старостам - к концу недели составить списки);
- наличие домашней подготовки - необходимое условие для допуска (для первой работы исключения нет);
- защиты (тесты) будут проходить дистанционно на 4, 8, 12 и 16 неделях.

# 0. Организационные вопросы

---

## Литература

1. Баскаков С.И. Лекции по теории цепей. – М.: Эдиториал УРСС, 2009. – 280 с.
2. Гречихин В.А. Основы теории цепей. Руководство к решению задач анализа линейных цепей с сосредоточенными параметрами. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 92 с.
3. Гречихин В.А. Основы теории цепей. Руководство к решению задач анализа и синтеза двухполюсников и четырехполюсников. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 84 с.
4. Гречихин В.А., Шалимова Е.В. Основы теории цепей: Методические указания к использованию программного пакета MATHCAD при решении задач анализа цепей по курсу "Основы теории цепей". – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 48 с.

# 1. Введение в теорию цепей

## 1.1. Физические основы теории электрических цепей

Теория электрических цепей базируется на основных понятиях и законах электромагнетизма.

Фундаментальные понятия электромагнетизма:

**Электрический заряд** – одна из основных характеристик элементарных частиц, определяющих электромагнитное взаимодействие между ними.

*Свойства электрического заряда:*

- существует в двух видах: положительный ( $q_+$ ) и отрицательный ( $q_-$ );
- в электрически изолированной системе  $\sum_i q_i = \text{const}$  (закон сохранения заряда);
- величина заряда не зависит от того, движется ли он или покоится (не зависит от системы отсчета).



# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.1. Физические основы теории электрических цепей

Любой электрический заряд  $q$  изменяет определенным образом свойства окружающего его пространства – создает **электрическое поле**. Посредством электрического поля происходит взаимодействие между зарядами. На заряд, помещенный в электрическое поле действует сила:

$$\vec{F} = q\vec{E},$$

где  $q$  – величина заряда [Кл],  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля в точке нахождения заряда [В/м].

Стационарное электрическое поле (поле постоянных токов) является **потенциальным**. Для такого поля выполняется условие:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0.$$

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.1. Физические основы теории электрических цепей

*Работа сил* потенциального поля по перемещению заряда  $q$  между точками 1 и 2 *не зависит от траектории движения заряда*:

$$A = q \int_1^2 \bar{E} d\bar{l}.$$

**Потенциал**, [В] – работа сил электрического поля по перемещению единичного заряда ( $q = 1$  Кл) из данной точки поля (1) в бесконечно удаленную точку называется:

$$\varphi_1 = \int_1^{\infty} \bar{E} d\bar{l}.$$

Потенциал численно равен потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в рассматриваемую точку поля.

**Напряжение**, [В] – работа сил электрического поля по перемещению единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2:

$$\int_1^2 \bar{E} d\bar{l} = \int_1^{\infty} \bar{E} d\bar{l} - \int_2^{\infty} \bar{E} d\bar{l} = \varphi_1 - \varphi_2 = u_{12}$$

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.1. Физические основы теории электрических цепей

Электрические и магнитные явления обычно имеют место не в вакууме, а в некоторой материальной среде – веществе.

**Проводники** – вещества, содержащие свободные электрические заряды, которые могут перемещаться под действием приложенного электрического поля.

При отсутствии внешнего электрического поля заряженные частицы движутся хаотически. При появлении электрического поля на это хаотическое движение накладывается упорядоченное перемещение зарядов – **электрический ток**.

В **диэлектриках** свободные заряды отсутствуют, поэтому направленное перемещение зарядов под действием электрического поля невозможно.

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.1. Физические основы теории электрических цепей

Количественной мерой электрического тока является **сила тока**: заряд, переносимый через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

За направление электрического тока принимают направленное перемещение положительных зарядов.

Электрический ток является источником магнитного поля. Магнитное поле, в свою очередь, действует на движущиеся заряды. Характеристикой магнитного поля является магнитная индукция ***B***, определяющая силу, действующую на движущийся электрический заряд (силу Лоренца):

$$\bar{F}_л = q[\bar{v} \times \bar{B}].$$

где *v* – вектор скорости заряженной частицы.

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.1. Физические основы теории электрических цепей

Единая теория электрических и магнитных явлений была создана Джеймсом Клерком Максвеллом и представлена в виде системы фундаментальных уравнений электродинамики - уравнений Максвелла:

$$\begin{aligned}\oint_L \bar{E} d\bar{l} &= -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \bar{B} d\bar{S}; & \oint_L \bar{H} d\bar{l} &= \int_S \left( \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \sigma \bar{E} + \bar{J}_{\text{ст}} \right) d\bar{S}; \\ \oint_S \bar{D} d\bar{S} &= q; & \oint_S \bar{B} d\bar{S} &= 0; \\ \bar{D} &= \varepsilon \varepsilon_0 \bar{E}; & \bar{B} &= \mu \mu_0 \bar{H}.\end{aligned}$$

# 1. Введение в теорию цепей

## 1.2. Модель электрической цепи

Предмет курса ОТЦ – анализ **квазистационарных** процессов в устройствах особой, **цепной**, структуры.

**Условие квазистационарности:**

$$\oint_L \bar{E} d\bar{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \bar{B} d\bar{S}; \quad \frac{\partial}{\partial t} \bar{B} \approx 0 \Rightarrow \oint_L \bar{E} d\bar{l} = 0 \Rightarrow \text{поле потенциальное}$$

Условие выполняется, когда характерный размер системы ( $l$ )

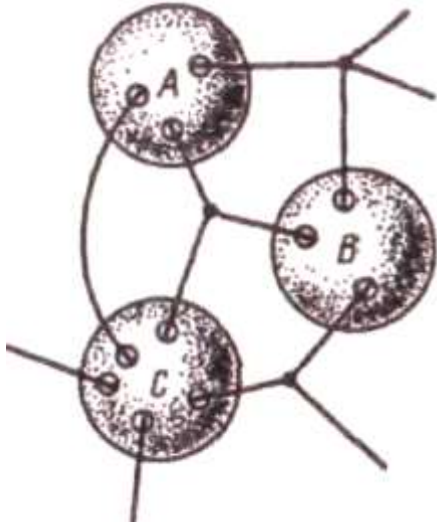
$$l \ll \lambda$$

где  $\lambda = v_\phi / f$  – длина волны,  $f$  – частота электромагнитных колебаний,  $v_\phi$  – фазовая скорость.

# 1. Введение в теорию цепей.

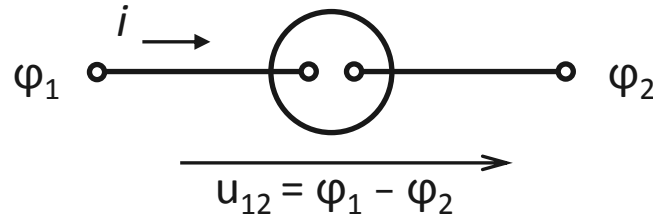
## 1.2. Модель электрической цепи

Моделью электрической цепи служит совокупность областей локализации электромагнитных процессов, соединенных между собой идеальными проводниками ( $\sigma = \infty$ ).



Внутри этих областей «работают» уравнения Максвелла. В каждом проводнике есть ток, у полюсов (точки входа) – потенциалы.

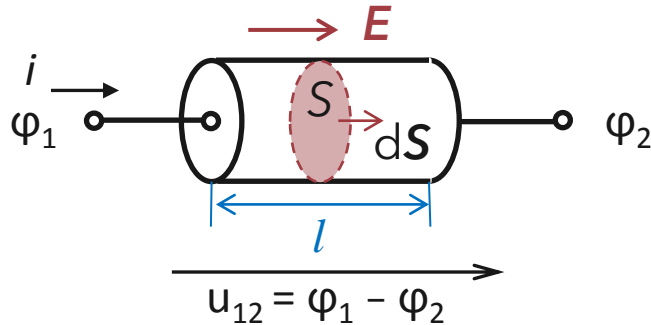
Простейшим элементом электрической цепи является **двухполюсник**:



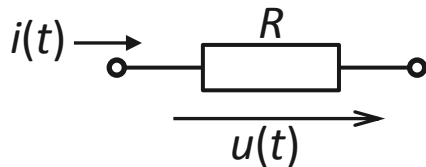
# 1. Введение в теорию цепей

## 1.3. Элементарные двухполюсники

**Резистивный элемент (резистор)** - область пространственной локализации удельной проводимости  $\sigma \neq \infty$  [См/м].



Обозначение:



$$\oint_L \bar{H} d\bar{l} = \int_S \left( \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \sigma \bar{E} + \bar{J}_{\text{ст}} \right) d\bar{S}$$

$$i = \int_S \sigma \bar{E} d\bar{S} = \sigma \frac{u_{12}}{l} S = \frac{\sigma S}{l} u_{12} = \frac{u_{12}}{R};$$

Компонентные уравнения (закон Ома):

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = Gu(t)$$



# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.3. Элементарные двухполюсники

Параметры резистора:

$R$  – сопротивление, [Ом];      кОм =  $10^3$  Ом; МОм =  $10^6$  Ом

$G = 1/R$  – проводимость, [См];      мСм =  $10^{-3}$  См; мкСм =  $10^{-6}$  См

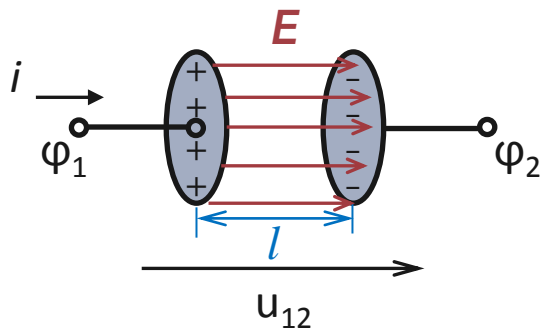
Резистивный элемент потребляет энергию:

$$w_R(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = R \int_{-\infty}^t i^2(\xi) d\xi$$

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.3. Элементарные двухполюсники

**Ёмкостный элемент (конденсатор)** - область пространственной локализации энергии электрического поля.



$$\oint_L \bar{H} d\bar{l} = \int_S \left( \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \sigma \bar{E} + \bar{J}_{\text{ст}} \right) d\bar{S}$$

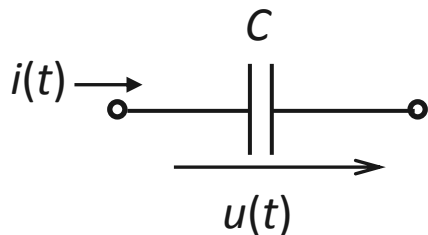
$$i = \int_S \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} d\bar{S} = \int_S \epsilon \epsilon_0 \frac{d\bar{E}}{dt} d\bar{S} = \epsilon \epsilon_0 \frac{d}{dt} \frac{u_{12}}{l} S = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{l} \frac{du_{12}}{dt} = C \frac{du_{12}}{dt}$$

$S$  - площадь пластин конденсатора, между пластинами диэлектрик ( $\epsilon$ ).

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.3. Элементарные двухполюсники

Обозначение:



Компонентные уравнения:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} \quad \text{или} \quad u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi$$

Характеристика конденсатора:

$C$  – емкость, [Ф];  $\text{мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ;  $\text{нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$ ;  $\text{пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ .

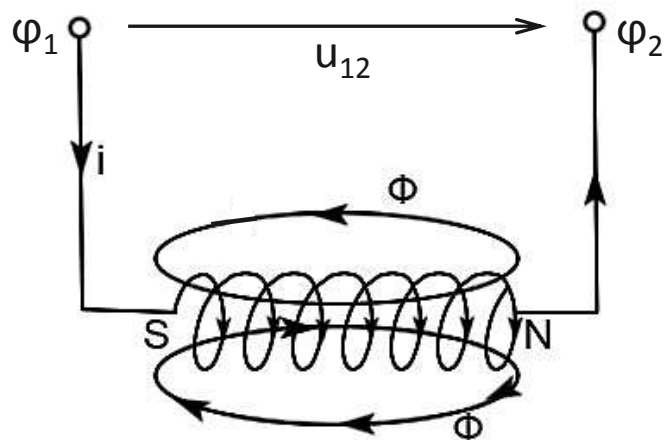
Конденсатор – реактивный элемент, запасает энергию электрического поля (не потребляет):

$$w_C(t) = \frac{Cu^2(t)}{2}$$

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.3. Элементарные двухполюсники

**Индуктивный элемент (катушка индуктивности)** – область пространственной локализации энергии магнитного поля.



$$\oint_L \bar{E} d\bar{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_S \bar{B} d\bar{S}$$

ЭДС самоиндукции идеальной катушки индуктивности:

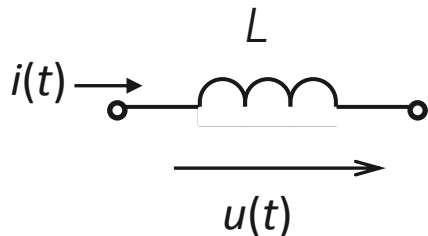
$$\begin{aligned} u_{12} &= -N \oint_L \bar{E} d\bar{l} = N \frac{d}{dt} \int_S \bar{B} d\bar{S} = \frac{d}{dt} N \Phi = \\ &= \frac{d}{dt} \Psi = \frac{d}{dt} \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{l} i(t) = \frac{d}{dt} L i(t) = L \frac{di(t)}{dt} \end{aligned}$$

$\Phi$  – магнитный поток,  $\Psi$  – потокосцепление,  $N$  – число витков,  $l$  – длина катушки

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.3. Элементарные двухполюсники

Обозначение:



Компонентные уравнения:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad \text{или} \quad i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi$$

Характеристика катушки индуктивности:

$L$  – индуктивность, [Гн]; мГн =  $10^{-3}$  Гн; мкГн =  $10^{-6}$  Гн.

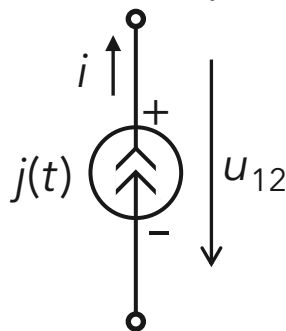
Каушка индуктивности – реактивный элемент, запасает энергию магнитного поля (не потребляет):

$$w_L(t) = \frac{Li^2(t)}{2}$$

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.3. Элементарные двухполюсники

**Идеальный источник тока** – область пространственной локализации сторонних токов: сил неэлектрического происхождения, которые осуществляют разделение электрических зарядов.



$$\oint_L \bar{H} d\bar{l} = \int_S \left( \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \sigma \bar{E} + \bar{J}_{\text{ст}} \right) d\bar{S}$$

Ток во внешней цепи:

$$i = \int_S \bar{J}_{\text{ст}} d\bar{S} = j(t)$$

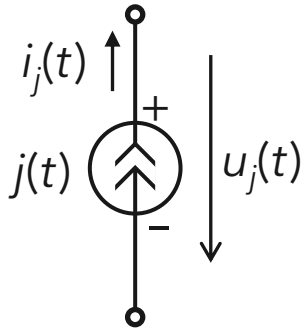
- ток идеального источника тока не зависит от приложенного напряжения;
- ток и напряжение направлены в противоположные стороны: ток – по стрелке источника, напряжение от «+» к «-»;
- внутреннее сопротивление источника тока:  $R_i = \infty$  ( $G_i = 0$ ).

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.3. Элементарные двухполюсники

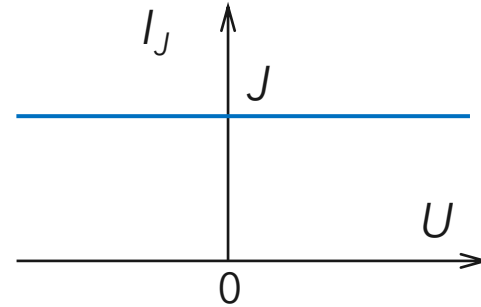
Компонентное уравнение:

$$i_j(t) = j(t)$$



Частный случай – источник постоянного тока:

$$i_j(t) = J = \text{const}$$



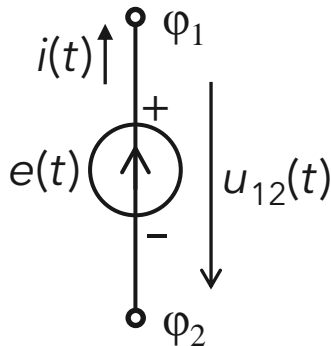
Характеристика источника тока:

$J$  – ток, [A];  $\text{mA} = 10^{-3} \text{ A}$ ;  $\text{mA} = 10^{-6} \text{ A}$

# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.3. Элементарные двухполюсники

**Идеальный источник напряжения (ЭДС)** – источник электрического поля, обусловленного внешними (неэлектрическими) факторами.



Напряжение на источнике:

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = e(t)$$

- напряжение идеального источника ЭДС не зависит от протекающего через него тока;
- ток и напряжение направлены в противоположные стороны: ток – по стрелке источника, напряжение от «+» к «-»;
- внутреннее сопротивление источника ЭДС:  $R_i = 0$  ( $G_i = \infty$ ).

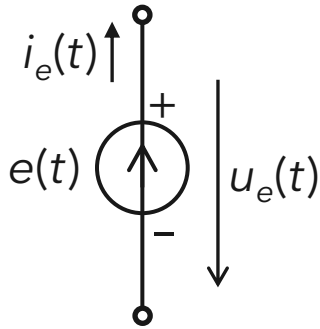


# 1. Введение в теорию цепей.

## 1.3. Элементарные двухполюсники

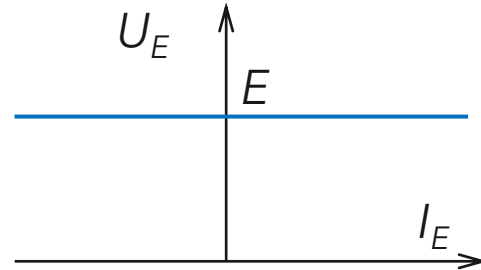
Компонентное уравнение:

$$u_e(t) = e(t)$$



Частный случай – источник постоянной ЭДС:

$$u_E(t) = E = \text{const}$$



Характеристика источника напряжения:

$E$  – напряжение, [В];

мВ =  $10^{-3}$  В; мкВ =  $10^{-6}$  В; кВ =  $10^3$  В

**Необходимо самостоятельно  
законспектировать материал лекции и  
проверить формулы**

