

# Физические основы электроники

Институт Физики, Нанотехнологий  
и Телекоммуникаций  
(ИФНиТ)

**Купцов Владимир Дмитриевич**

ВШ Прикладной Физики и Космических Технологий

к. 224, II уч. корпус

[vdkuptsov@yandex.ru](mailto:vdkuptsov@yandex.ru)

# Содержание курса

- **Лекции**

Материалы лекций для скачивания размещены:

Сайт ВШ ПФИКТ СПбПУ —> Студентам —> Материалы по учебным дисциплинам —>

Купцов В.Д. Физические основы электроники.

<http://hsapst.spbstu.ru/materials/>

- **Лабораторные работы:** 3 работы

- **Практика:**

1. Метод комплексных амплитуд,
2. Методы расчета сложных цепей,
3. Методы расчета переходных процессов.

# Введение

## 1. Основы теории электрических цепей

1.1 Электрическая цепь и электрическая схема

1.2 Ток, напряжение, энергия и мощность в участке цепи

1.3 Идеализированные пассивные элементы цепи:  
сопротивление, емкость, индуктивность

1.4 Реальные пассивные элементы цепей и их схемы  
замещения

1.5 Источники тока и напряжения

1.6 Структура схемы электрической цепи

1.7 Законы Кирхгофа

1.8 Принцип дуальности в теории цепей

1.9 Уравнения, описывающие процессы в электрических  
цепях. Принцип суперпозиции и область его  
применимости.

## 2. Гармонические колебания в линейных электрических цепях

- 2.1 Основные характеристики гармонических колебаний
- 2.2 Метод комплексных амплитуд
- 2.3 Комплексные сопротивления и проводимости
- 2.4 Мощность в цепи гармонического тока
- 2.5 Уравнение баланса мощности
- 2.6 Условие передачи максимальной мощности от генератора в нагрузку
- 2.7 Комплексный коэффициент передачи. Примеры расчета простейших цепей, дифференцирующая и интегрирующая цепи
- 2.8 Метод контурных токов
- 2.9 Метод узловых потенциалов
- 2.10 Теорема об эквивалентном источнике
- 2.11 Трансформатор

### **3. Резонансные явления в электрических цепях**

3.1 Свободные колебания в LC-контуре

3.2 Вынужденные колебания в последовательном LC-контуре

3.3 Частотные характеристики последовательного колебательного контура. Полоса пропускания.

3.4 Резонанс в параллельном колебательном контуре

### **4. Анализ цепей при негармонических воздействиях**

4.1 Частотный спектр периодического колебания. Ряд Фурье

4.2 Колебания с непрерывным спектром. Преобразование Фурье

4.3 Свойства преобразование Фурье

- 4.4 Спектральный анализ простейших колебаний
- 4.5 Дельта-функция
- 4.6 Спектральный метод анализа цепей
- 4.7 Условие неискаженной передачи через цепь
- 4.8 Импульсная характеристика цепи. Интеграл суперпозиции.
- 4.9 Переходная характеристика цепи, ее связь с импульсной характеристикой
- 4.10 Преобразование Лапласа
- 4.11 Свойства преобразования Лапласа
- 4.12 Применение преобразования Лапласа к анализу цепей (операторный метод)
- 4.13 Свойства передаточной функции цепи
- 4.14 Переходные процессы в электрических цепях

## 5. Волновые процессы в цепях с распределенными параметрами

- 5.1 Основы теории длинных линий
- 5.2 Дифференциальные уравнения длинных линий
- 5.3 Волны в длинной линии в режиме гармонических колебаний
- 5.4 Фазовая скорость и длина волны в линии
- 5.5 Процессы в линиях без потерь при разных нагрузках
- 5.6 Уравнения передачи для фрагмента длинной линии
- 5.7 Входное сопротивление отрезка длинной линии
- 5.8 Коэффициент отражения
- 5.9 Распределение амплитуд напряжения и тока вдоль линии
- 5.10 Коэффициент стоячей и бегущей волны
- 5.11 Круговые диаграммы сопротивлений и проводимостей
- 5.12 Согласование длинной линии с нагрузкой

# Литература

## Основная:

1. Зайцев Э.Ф., Черепанов А.С., Ферсман Г.А. Электротехника и электроника. Теория электрических цепей. Ч. 1: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2005.
2. Новиков Ю.Н. Основные понятия и законы теории цепей, методы анализа процессов в цепях. СПб.: - Лань, 2011.
4. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей, - Питер, 1990.

## Дополнительная:

1. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – СПб.: Лань, 2009.
2. Демирчян К.С., Нейман Л.Р. , Коровкин Н.В. Теоретические основы радиотехники, т.1,2,3. – Издательство Питер, 2009.
3. Попов В.П. Основы теории цепей. – Издательство Юрайт, 2013.



Теория электрических цепей рассматривает физические процессы в квазистационарном приближении, при котором возможно применять понятия напряжений и токов. (не напряженности магнитного и электрического поля).

**Радиофизика** — наука о физических процессах, связанных с электромагнитными колебаниями и волнами. К этим процессам относятся 1) усиление, генерирование и преобразование электромагнитных колебаний; 2) излучение, распространение и прием радиоволн; 3) взаимодействие электромагнитного поля с веществом.

**Радиотехника** — наука, изучающая электромагнитные колебания и волны радиодиапазона, методы генерации, усиления, преобразования, излучения и приёма, а также применение их для передачи информации, включающая в себя технику радиопередачи и радиоприёма, обработку сигналов, проектирование и изготовление радиоаппаратуры.

**Электротехника** — область техники, связанная с получением, распределением, преобразованием и использованием электрической энергии.

# Основы теории электрических цепей

**Электрическая цепь** — устройство, в котором электромагнитные процессы могут быть описаны с помощью понятий напряжения и тока, то есть напряжения и токи выступают как величины, задание которых в любой момент времени однозначно определяет состояние цепи.

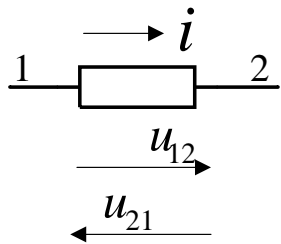
**Электрическая схема** — это графическое изображение электрической цепи, где реальные элементы представлены в виде условных обозначений.

**Принципиальная схема** — показывает все функциональные элементы и связи между ними.

**Расчетная (эквивалентная) схема** — в ней каждый реальный элемент замещается совокупностью идеальных элементов (активных и пассивных), такие схемы удобны для расчетов и именно они рассматриваются в теории цепей.

Электрический ток упорядоченное движение носителей электрических зарядов (электронов, ионов, дырок).

Сила (величина) тока равна количеству суммарного заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за единицу времени.



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

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

Напряжение (падение напряжения) на данном участке цепи - разность электрических потенциалов точек 1 и 2. Это — скалярная величина, равная работе, которая затрачивается на перенос единичного положительного заряда из точки 1 в 2.

Стационарный состояние - электрические заряды и токи во всех точках устройства (цепи) постоянны во времени, при этом постоянны и создаваемые ими поля  $E, B$ .

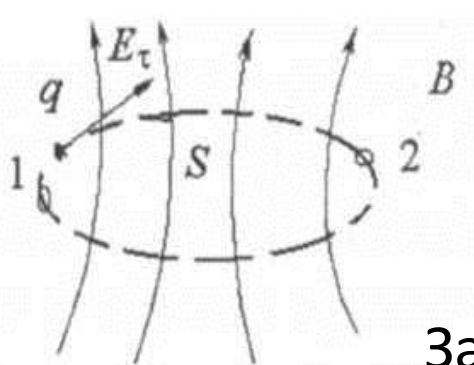
$\Delta W = u\Delta q$  - работа по перемещению заряда  $\Delta q$  за время  $\Delta \tau$

$p = \frac{dW}{dt} = ui$  - мгновенная мощность это скорость изменения энергии

$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = \int_{t_1}^{t_2} u i dt$  - поглощенная энергия

### 1. Индуктивность на переменном токе.

Переменное электрическое поле не обладает потенциалом. Работа по переносу заряда  $q$  из точки 1 в точку 2 (работа сил электрической индукции) зависит от пути его движения:

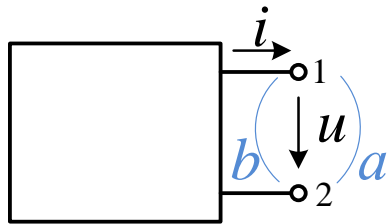


$$\int_1^2 q E_\tau dl + \int_2^1 q E_\tau dl = q \oint E_\tau dl = q e_{инд}$$

Закон Фарадея:  $e_{инд} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S B_n dS$

$e_{инд} = 0$  только в стационарном состоянии

$u_{12} = \int_1^2 E_{\tau} dl$  - для переменных токов напряжение между точками 1 и 2, то есть путь интегрирования должен быть четко указан



Путь интегрирования проводим между внешними зажимами (вне элемента  $d\Phi/dt \approx 0$ ). Результат практически не зависит от пути. Можем использовать напряжение  $u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$

$$D/c \ll T$$

$$D \ll \lambda$$

Условие квазистационарности электромагнитного поля: за время распространения возмущения поля от одной точки до любой другой токи и напряжения практически не меняются.

$D$  - максимальный размер устройства,

$c$  - скорость света,  $\lambda \approx c/f$  - длина волны,

$T$  - время, за которое токи и напряжения заметно меняются.

## 2. Конденсатор на переменном токе:

$j_{np}$  - ток проводимости

$j_{см} = \frac{\partial D}{\partial t}$  - плотность тока смещения, соответствующий изменению электрического поля

$j_n = j_{np} + j_{см}$  - плотность полного тока, причем интеграл через любую замкнутую поверхность  $\oint j_n ds = 0$

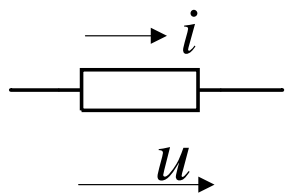
Условие квазистационарности: током смещения можно пренебречь всюду, за исключением конденсаторов.

Теория цепей следует из строгой теории электромагнитного поля как предельный случай квазистатики.

### 1.3 Идеализированные пассивные элементы цепи: сопротивление, емкость, индуктивность

Идеальный элемент наделяется только основным свойством реального элемента, а второстепенные свойства отбрасываются

1. **Сопротивление** - идеализированный элемент, в котором происходит процесс поглощения электрической энергии. Отсутствуют обратимые процессы накопления энергии.

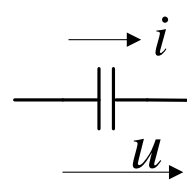


Закон Ома:  $u = ri$  ,  $i = gu$  ,  $r = 1/g$

$$p = ui = ri^2 = gu^2 \geq 0 \quad \text{- мгновенная мощность}$$

$$W_{0 \rightarrow t_1} = \int_0^{t_1} uidt = r \int_0^{t_1} i^2 dt = g \int_0^{t_1} u^2 dt \geq 0 \quad \text{- энергия, поглощенная сопротивлением}$$

2. **Емкость** — идеальный двухполюсный элемент, в котором происходит только накопление энергии электрического поля, а необратимые потери энергии и ее накопление магнитным полем отсутствуют.



$$q = Cu \quad i = C \frac{du}{dt} \quad u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i dt' + u(0)$$

При конечной величине  $i$  заряд  $q$  меняется непрерывно (не может иметь скачков).

$$p = Cu \frac{du}{dt} \text{ - мгновенная мощность}$$

Если  $|u|$  растёт (ёмкость заряжается), то  $p > 0$ .

Если  $|u|$  убывает (ёмкость разряжается), то  $p < 0$ . Энергия, накопленная электрическим полем, отдается во внешнюю цепь

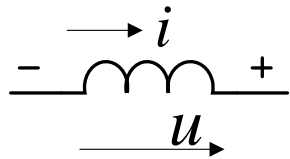
$$\int_{t_1}^{t_2} p dt = C \int_{u(t_1)}^{u(t_2)} u du = \frac{Cu^2(t_2)}{2} - \frac{Cu^2(t_1)}{2} = W_C(t_2) - W_C(t_1) \text{ - приращение энергии}$$



**3. Индуктивность** — идеальный двухполюсный элемент, в котором накапливается энергия магнитного поля.

$\psi$  - потокосцепление самоиндукции (величина магнитного потока через весь контур, обтекаемый током данного элемента).

Закон электромагнитной индукции: всякое изменение магнитного потока приводит к возникновению вихревого электрического поля и появлению на зажимах электродвижущей силы самоиндукции:



$$e = -\frac{d\psi}{dt}$$

$$\psi = Li$$

$$e = -L\frac{di}{dt}$$

ЭДС противодействует изменению тока

Напряжение на индуктивности при том же направлении

отсчета равно  $u = -e = L\frac{di}{dt}$

При конечной величине напряжения ток через индуктивность изменяется непрерывно (без скачков).

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u dt' + i(0) \quad \text{- ток через индуктивность}$$

$$p = Li \frac{di}{dt} \quad \text{- мощность на индуктивности}$$

Если  $|i|$  растет, то  $p > 0$ , энергия магнитного поля накапливается.

Если  $|i|$  уменьшается, то  $p < 0$ , накопленная энергия отдается в цепь.

$$\int_{t_1}^{t_2} p dt = L \int_{i(t_1)}^{i(t_2)} i di = \frac{Li^2(t_2)}{2} - \frac{Li^2(t_1)}{2} = W_L(t_2) - W_L(t_1) \quad \text{-приращение накопленной энергии}$$

$$W_L = \frac{Li^2(t)}{2} \quad \text{энергия магнитного поля, запасенная в момент } t$$

$$W_L \geq 0 \quad \text{всегда}$$