



# ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

The background of the slide is a photograph of a large industrial power plant. Several tall, cylindrical chimneys with alternating red and white horizontal bands are visible against a clear, light blue sky. The plant buildings are multi-story, brownish-tan structures with various windows and architectural details. In the foreground, there are some green bushes and a paved area.

*проф. Целебровский Юрий Викторович*

The background is a collage of four images related to electrical engineering and safety. Top-left: A close-up of a metal structure, possibly a control cabinet or part of a power plant. Top-right: A row of high-voltage electrical insulators with colorful caps (red, green, yellow) on a power line. Bottom-left: A person's legs in black safety boots standing on a metal grate floor next to a red metal structure. Bottom-right: A person's legs in blue safety pants standing in a field of tall grass with small yellow flowers.

**Физические  
величины  
в электроэнергетике,  
их размерности**

# Размерности физических величин

- **Основные единицы:**

- килограмм - кг

- метр - м  
*Килограмм равен массе международного прототипа*

- секунда - с  
*Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за*

- ампер - А  
*интервал времени  $1/299792458$  с*

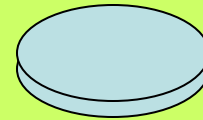
- кельвин - К  
*Секунда равна  $9192631770$  периодов излучения между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133*

- Кельвин равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  ньютон на тройной точки воды

# 1. Температура - Т

Абсолютная температура – это мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа  $E=1,5 kT$   $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж / К,  
постоянная Больцмана

$$W_{\text{кинетич}} = \frac{mv^2}{2}$$



**T**

Абсолютный нуль термодинамической шкалы температур  $\longrightarrow$   $\longrightarrow$

## 2. Электрический ток - $I$

Электрический ток – это скалярная величина, отражающая скорость изменения потока электрического смещения, проходящего через рассматриваемую поверхность.

$$I = \frac{dQ}{d\tau} \quad [I] = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{ампер}, [A]$$

Электрическим **током проводимости** называется направленное движение заряженных частиц в соответствии со знаком их заряда и направлением электрического поля.

Электрическим **током смещения** называется изменение потока электрического смещения во времени

Плотность электрического тока – векторная величина, равная силе тока, протекающего через единицу поперечного сечения:

$$j = dI/dS$$

# 3. Магнитный поток - $\Phi$

Магнитный поток – это магнитное поле, создаваемое электрическим током – направленным движением электрически заряженных частиц. Обычно говорят о магнитном потоке, проходящем через определённую площадь.

Единица измерения – вебер (Вб).

Магнитная индукция – магнитный поток, проходящий через единицу площади –  $B$ .

Единица измерения – тесла (Тл).  $\text{Тл} = \text{Вб}/\text{м}^2$

$$B = \frac{\Phi}{S}; B = \frac{\partial \Phi}{\partial S}$$

Напряжённость магнитного поля –  $H$  - вектор, связанный с индукцией соотношением:

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad \text{Единица измерения – А/м}$$

# 4. Электрическое напряжение - $U$

Потенциал произвольной точки электрического поля  $\varphi$  – это работа по перемещению тела с зарядом в 1 Кл из бесконечности в рассматриваемую точку поля, против сил поля.

Единица измерения – вольт  $V = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$

Электрическое напряжение – разность потенциалов между двумя точками электрического поля, равная работе по перемещению единичного заряда из одной точки в другую против сил поля  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ .

Напряжённость электрического поля –  $E$  - вектор, равный градиенту потенциала (напряжению на единицу длины):

$$E \Rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta l} \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial l} \quad \left[ \frac{B}{m} \right]$$

Напряжённость электрического поля –  $E$  – это также сила, действующая в электрическом поле на тело с зарядом в 1 Кл

# 4. Электрическое напряжение - $U$

Электродвижущая сила - ЭДС – величина, характеризующая (возможную) работу по перемещению заряженных частиц **сторонними (не потенциальными, не связанных с законом Кулона) силами**, возникающая в источниках постоянного или переменного тока (батареи, генераторы)

Единица измерения – вольт  $V = \frac{Дж}{Кл}$

$$ЭДС = -\frac{\partial\Phi}{\partial\tau} [В]; \quad \partial\Phi = \partial q \cdot R \quad [Кл \cdot Ом = Вб]$$

Падение напряжения –  $U$  [В] – работа, совершаемая при протекании электрического тока и затрачиваемая на перемещение заряженных частиц одного знака при противодействии их движению со стороны зарядов противоположного знака.

Значение *падения напряжения* зависит от скорости перемещения заряда и сопротивления этому перемещению



# Основные параметры электрических устройств

- Электрическое сопротивление – коэффициент пропорциональности между током и падением напряжения:
- $U=R \times I$  (Закон Ома) [ом], [**Ом**], [В/А]



*Электрическое сопротивление характеризует энергию электрического поля, которая преобразуется в тепло при прохождении тока проводимости через вещество.*

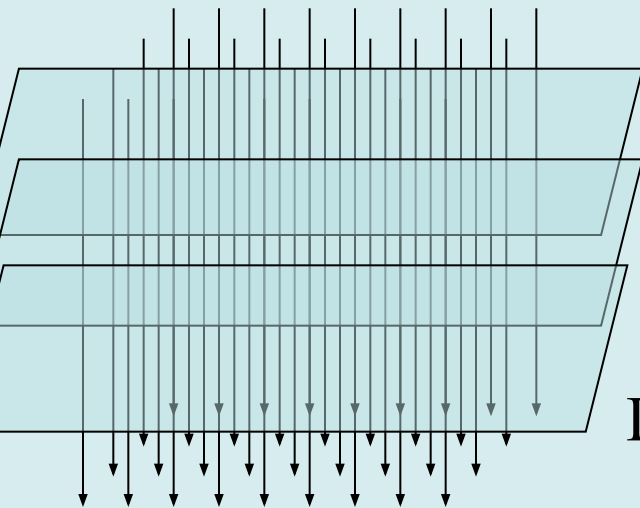
# Расчёт сопротивлений



*Выражения для расчёта сопротивления зависят от вида электрического поля*

## Плоско-параллельное поле

*Плоско-параллельным полем называется поле, у которого силовые линии параллельны, а поверхности равного потенциала (эквипотенциальные поверхности) представляют собой параллельные плоскости.*



$$R_{пп} = \rho \frac{l}{S}$$

Пример: провода

$l$  – длина образца, м

$S$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>

$\rho$  – удельное сопротивление материала (сопротивление образца, длиной 1 м и с площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>), Ом·м

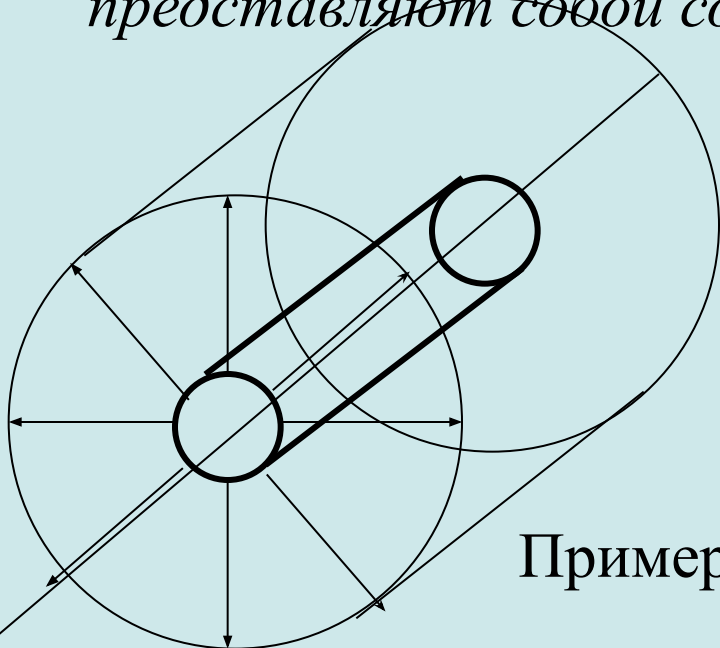
# Расчёт сопротивлений



*Выражения для расчёта сопротивления зависят от вида электрического поля*

## Радиально-цилиндрическое поле

*Радиально-цилиндрическим полем называется поле, у которого силовые линии радиальны, а поверхности равного потенциала (эквипотенциальные поверхности) представляют собой соосные (коаксиальные) цилиндры..*

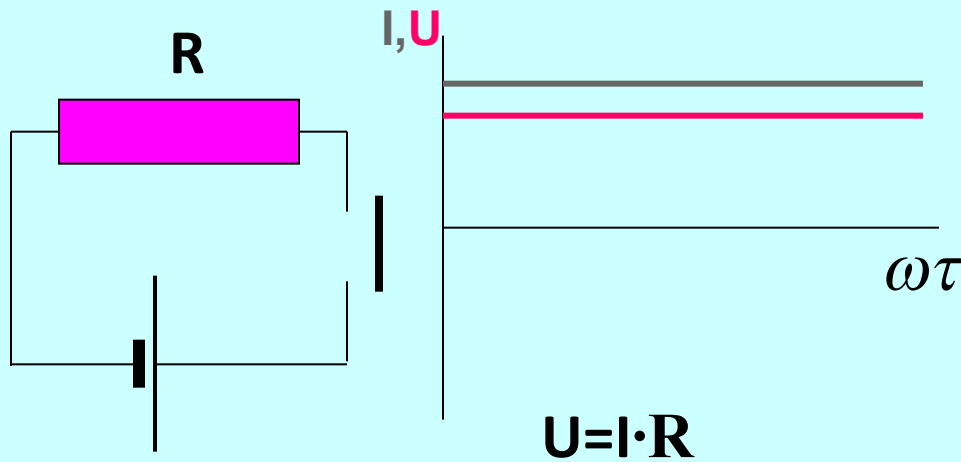


$$R_{rc} = \rho \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \cdot l}$$

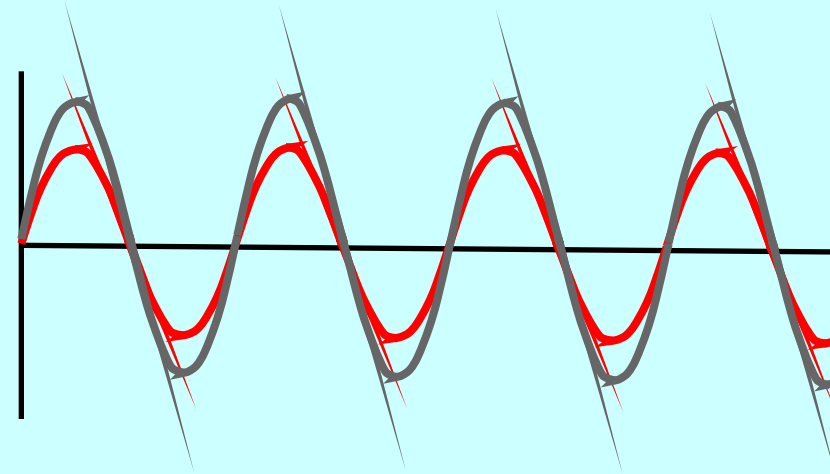
$r_2$  – радиус внешнего цилиндра  
 $r_1$  – радиус внутреннего цилиндра  
 $l$  – длина коаксиальных цилиндров

Пример: телевизионный (коаксиальный) кабель

# Активное сопротивление в цепи переменного тока



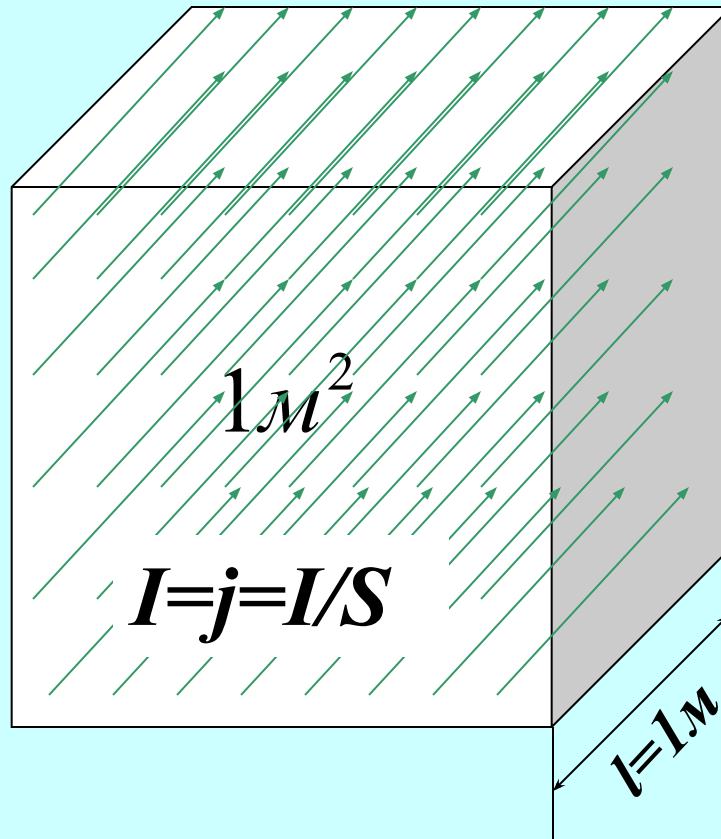
В цепи переменного тока с активным сопротивлением ток совпадает по фазе с напряжением.



# Закон Ома в дифференциальной форме

$$U = I \cdot R$$

$$R = \rho$$



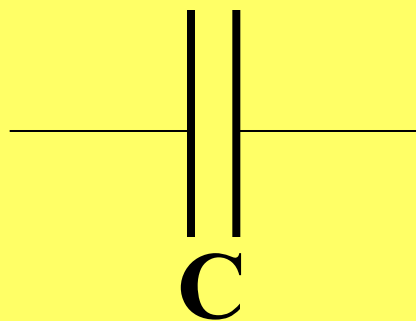
$$U = E = U/l$$

$$E = j \cdot \rho$$

# Основные параметры электрических устройств

- Электрическая ёмкость – коэффициент пропорциональности между напряжением и зарядом:

$$q = C \times U \quad [\text{фарада}], [\Phi], [\text{Кл/В}]$$



*Электрическая ёмкость определяет количество электрического заряда одного знака, накапливаемого в электротехническом устройстве при определённом напряжении.*

# Расчёт электрической ёмкости

Радиально-цилиндрическое поле:

$$C_{rc} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды (материала).

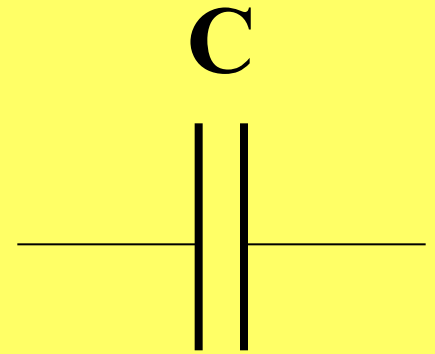
Диэлектрическая проницаемость – это мера поляризации вещества в электрическом поле, снижающая напряжённость поля в веществе и увеличивающая ёмкость конструкции с этим веществом

$$\varepsilon_{\text{пустоты}} = 1$$

$r_2$  – радиус внешнего цилиндра

$r_1$  – радиус внутреннего цилиндра

$l$  – длина коаксиальных цилиндров

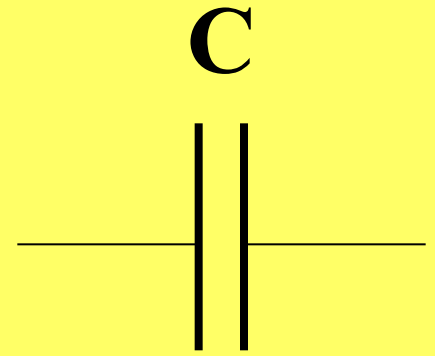


Пример: коаксиальный кабель



# Расчёт электрической ёмкости

Плоско-параллельное поле:  $C_{nn} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d}$



$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды (материала);

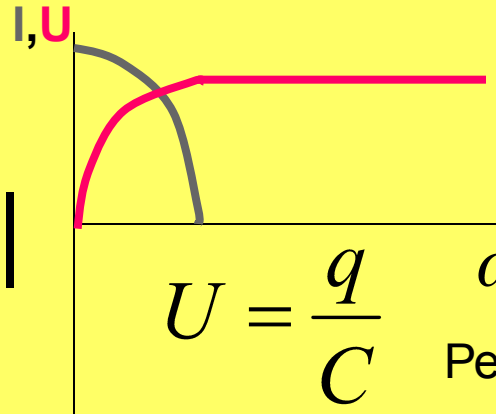
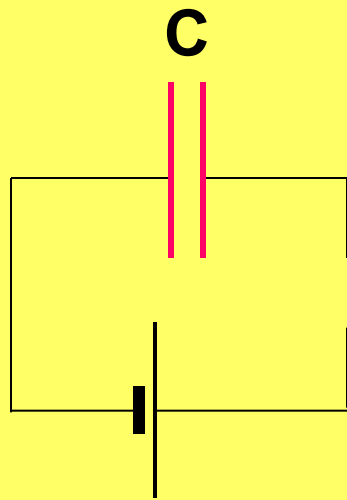
$S$  – площадь эквипотенциальной поверхности (пластины);

$d$  - расстояние между эквипотенциальными поверхностями

Пример: плоский конденсатор



# Электрическая ёмкость в цепи переменного тока



$$i = \omega C U_m \sin\left(\omega\tau + \frac{\pi}{2}\right)$$

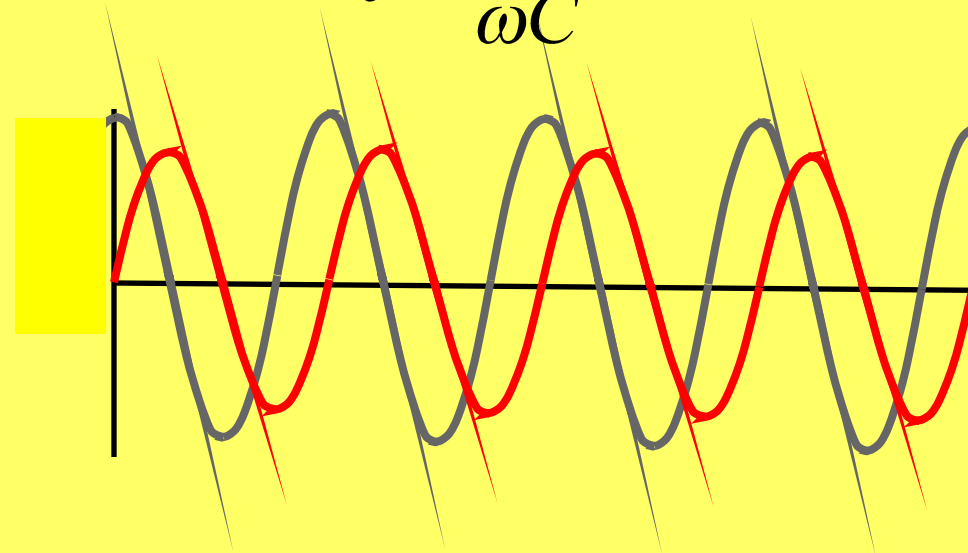
Для амплитудных (и действующих) значений:

$$I = \omega C U_c$$

Реактивное ёмкостное сопротивление:

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

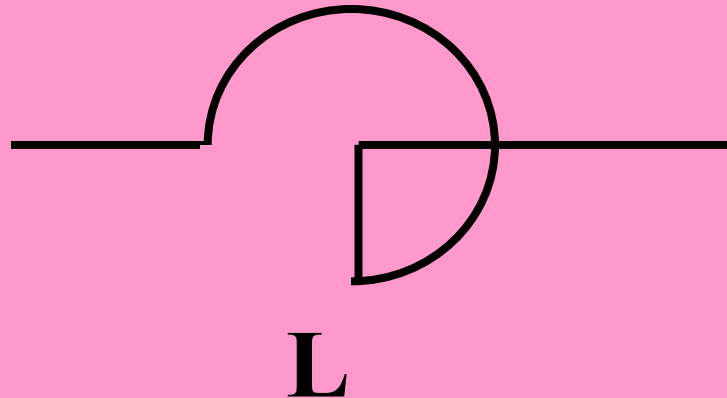
В цепи переменного тока с ёмкостью ток опережает напряжение на  $90^\circ$



# Основные параметры электрических устройств

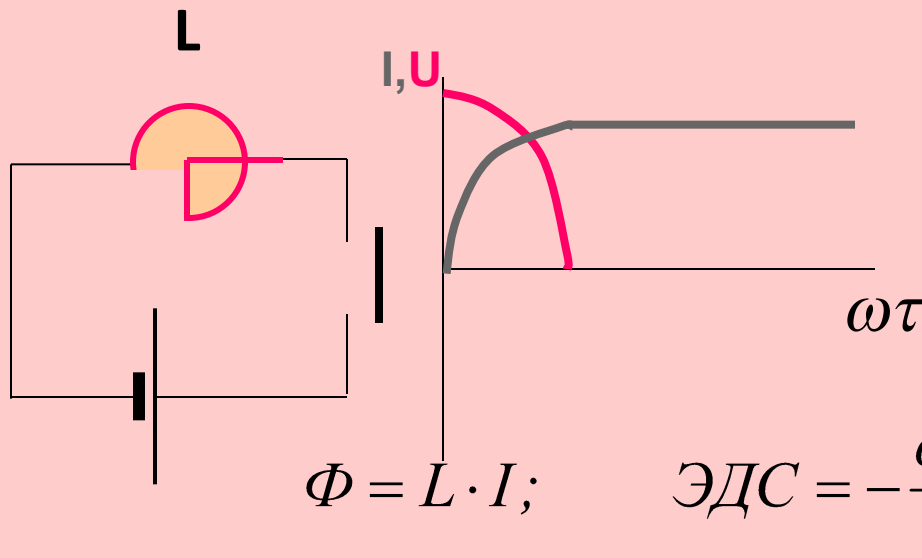
- Индуктивность – коэффициент пропорциональности между током и магнитным потоком:

$$\Phi = LI \quad [\text{генри}], \quad [Г], [Вб/А]$$



*Индуктивность характеризует магнитные свойства электрической цепи, проявляющиеся в её инерционности*

# Индуктивность в цепи переменного тока



$$u = \omega L I_m \sin\left(\omega\tau - \frac{\pi}{2}\right)$$

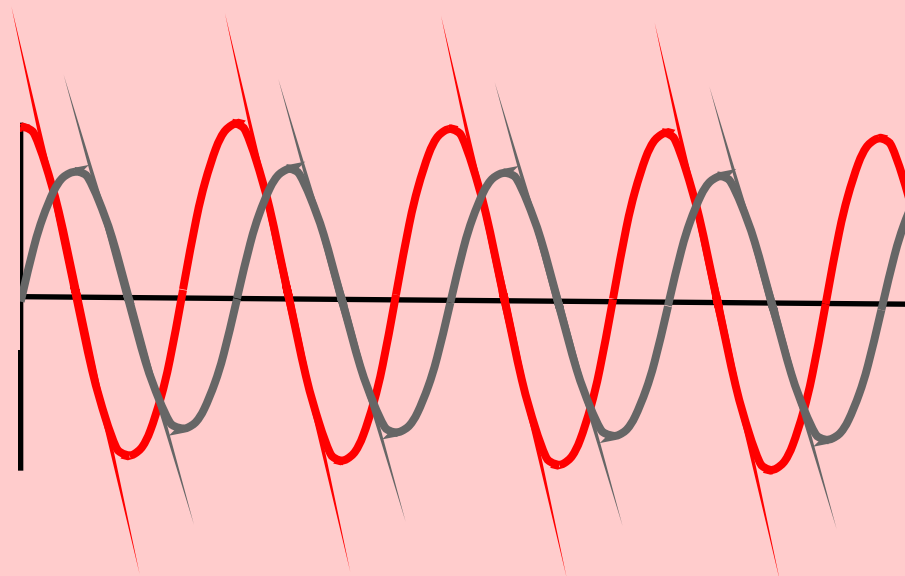
Для амплитудных (и действующих) значений:

$$U_L = \omega L I$$

Реактивное индуктивное сопротивление:

$$x_L = \omega L$$

В цепи переменного тока с индуктивностью ТОК отстаёт от напряжения на  $90^\circ$



# Пример расчёта индуктивности

Индуктивность катушки:

длиной  $l$ ,

с числом витков  $N$ ,

и площадью поперечного сечения  $S$ :

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l}$$

$\mu$  - магнитная проницаемость материала сердечника.

Магнитная проницаемость показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в материале увеличивается по сравнению с индукцией в пустоте.

$$\mu_{\text{пустоты}} = 1$$

# Основные параметры электрических устройств

- Электрическое сопротивление, ёмкость и индуктивность – это коэффициенты пропорциональности между:

- током и напряжением:  $U = R \times I$  (Закон Ома) ;

- напряжением и зарядом:  $q = C \times U$  ;

- током и магнитным потоком:  $\Phi = L \times I$  .

# Электрическая энергия

$$W_{\text{электр.}} = Q \times U$$

$Q$  – электрический заряд.

Для потенциальной энергии  $Q = C \times U$

Для кинетической энергии  $Q = I \times \tau$ , где  $\tau$  – время протекания тока  $I$

$$W_{\text{электр.}} = Q \times U = U \times I \times \tau$$

Электрическая мощность – это скорость преобразования энергии:

$$N = W / \tau = U \times I \text{ [ватт];}$$

$$Вт = В \times А = Дж/с$$

# Тепловое действие тока (закон Джоуля-Ленца)

$$W_{\text{электр.}} = I \times U \times \tau = I^2 R \tau$$

**Уравнение теплового баланса:**

$$j^2 \cdot \rho \cdot \tau = c \cdot d \cdot \Delta T$$

$j^2$  - плотность тока в квадрате,  $[A^2/m^4]$

$\rho$  - удельное сопротивление проводника,  $[Om \cdot m]$

$\tau$  - время,  $[c]$

$c$  - удельная теплоёмкость материала проводника,  $[Дж/кгК]$

$d$  - плотность материала проводника,  $[кг/м^3]$

$\Delta T$  - разница температур горячего и того же проводника до нагрева (холодного),  $[К]$

## ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Наименование величины	Обозначение	Определение	Размерность	Связь с другими величинами
Электрический заряд	<b>q</b>	<i>Свойство материальных объектов создавать электрическое и магнитное (при движении) поля (электромагнитное поле)</i>	<b>кулон, Кл</b>	$q = I \times t$ Кл = А × с
Электрический ток	<b>I</b>	<i>Упорядоченное (направленное) движение электрически заряженных частиц под действием электродвижущей силы</i>	<b>ампер, А</b>	$I = q / t$ Основная единица, А = Кл / с
Электродвижущая сила	<b>ЭДС</b>	<i>Величина, характеризующая действие сторонних (непотенциальных) сил в источниках постоянного или переменного тока</i>	<b>вольт, В</b>	$ЭДС = - d\Phi / dt$ В = Вб / с
Электрический потенциал (точки электрического поля)	<b>φ</b>	<i>Работа по перемещению единичного заряда против сил поля из «бесконечности» в рассматриваемую точку поля</i>	<b>вольт, В</b>	В = Дж / Кл
Напряжение, разность потенциалов	<b>U</b>	<i>Работа по перемещению единичного заряда против сил поля из одной рассматриваемой точки поля в другую <math>U = E \cdot l</math> ; <math>D = \epsilon_0 E</math></i>	<b>вольт, В</b>	$U = \varphi_2 - \varphi_1$
Падения напряжения	<b>U</b>	<i>Разность потенциалов между двумя точками проводника, вызванная протеканием тока.</i>	<b>вольт, В</b>	$U = I \times R$



## ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Электрическая активная мощность	<b>P</b>	Скорость преобразования электрической энергии в тепло, механическую энергию и др.	ватт, Вт	$P=U \times I$ Вт=Дж/с
Электрическая энергия	<b>W</b>	Мера работы электрического тока или энергия взаимодействия неподвижных электрических зарядов	джоуль, Дж	$W=F \times l$ Дж= НЬЮТОН×М $W=U \times I \times t$ Дж=В×А×с
Магнитный поток	<b>Φ</b>	Основная интегральная(суммарная) характеристика магнитного поля, пересекающего определенную поверхность	вебер, Вб	$\sim \Phi = q \times R \sim$ Вб=Кл×Ом $\sim \Phi = U \times t$ Вб=В×с
Магнитная индукция	<b>B</b>	Плотность магнитного потока $B = \mu_0 H$	тесла, Тл	$B = d\Phi / dS$ Тл=Вб/м <sup>2</sup>
Сопротивление	<b>R</b>	Коэффициент пропорциональности между током и напряжением (закон Ома- $U=R \times I$ )	ом, Ом	$R=U/I$ Ом=В/А
Ёмкость	<b>C</b>	Коэффициент пропорциональности между напряжением и зарядом( $q=C \times U$ )	фарада, Ф	$C=q/U$ Ф=Кл/В
Индуктивность	<b>L</b>	Коэффициент пропорциональности между током и магнитным потоком ( $\Phi=L \times I$ )	генри, Гн	$L=\Phi / I$ Гн=Вб/А

***Лекция окончена.***

***Прошу задавать вопросы.***

***Можно в письменном виде.***