

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

проф. Целебровский Юрий Викторович

The background of the slide is a collage of four images related to electrical engineering and safety. The top-left image shows a close-up of a metal structure, possibly a ladder or part of a cabinet, with a blue wall in the background. The top-right image shows a row of electrical insulators on a power line tower, with a clear sky and other towers in the distance. The bottom-left image shows the lower legs and feet of a person wearing black safety boots and dark trousers, standing on a metal grate floor. The bottom-right image shows a person wearing blue protective overalls, standing in a field of tall green 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

- интервал времени $1/299792458$ с - А

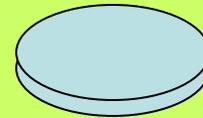
- **Кельвин - К**
Секунда равна 9192631770 периодов излучения между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133

- **Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную 2*10⁷ 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

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 - Φ

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 φ – 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 $V = \frac{Дж}{Кл}$

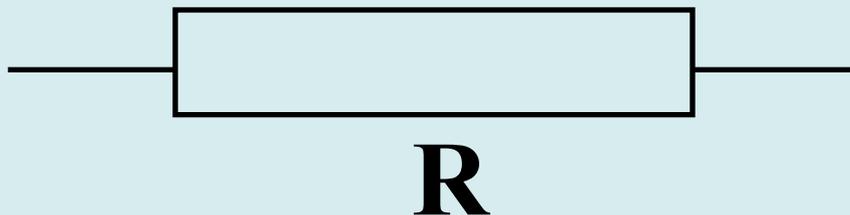
$$ЭДС = -\frac{\partial\Phi}{\partial\tau} [В]; \quad \partial\Phi = \partial q \cdot R \quad [Кл \cdot Ом = Вб]$$

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

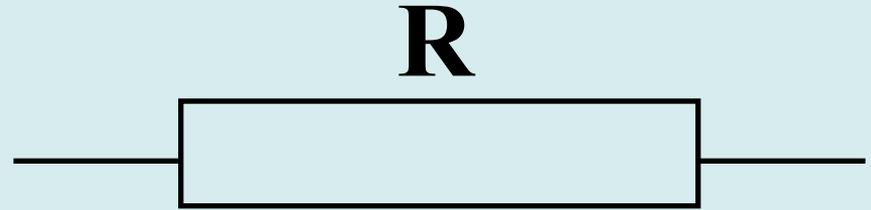
Основные параметры электрических устройств

- 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.

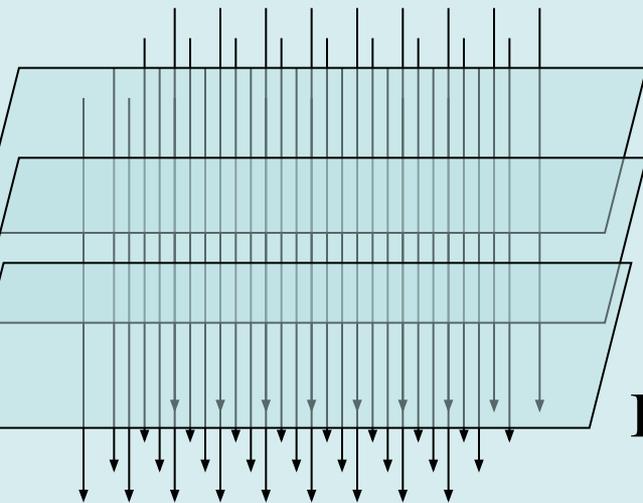
Расчёт сопротивлений



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.



$$R_{пп} = \rho \frac{l}{S}$$

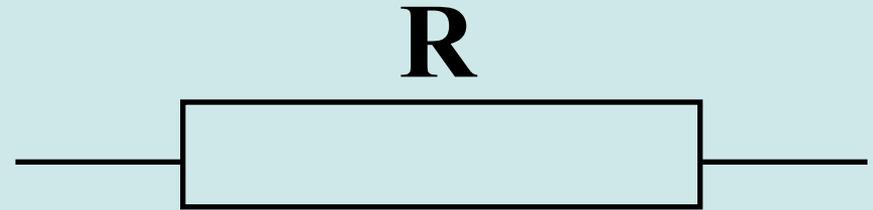
Пример: провода

l – длина образца, м

S – площадь поперечного сечения, м²

ρ – удельное сопротивление материала (сопротивление образца, длиной 1 м и с площадью поперечного сечения 1 м²), 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..

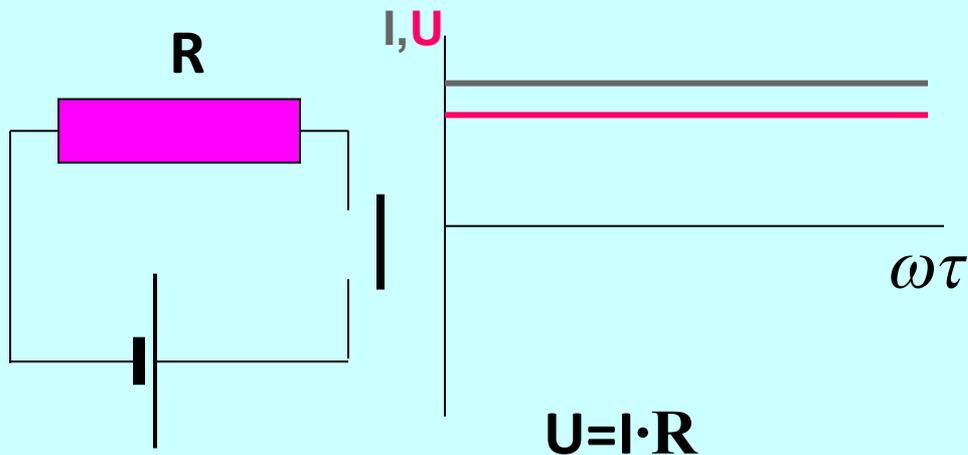


$$R_{rc} = \rho \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \cdot l}$$

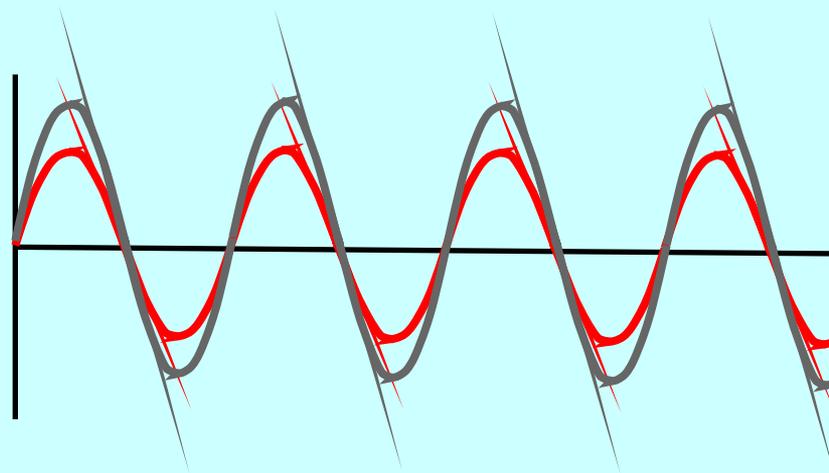
r_2 – радиус внешнего цилиндра
 r_1 – радиус внутреннего цилиндра
 l – длина коаксиальных цилиндров

Пример: телевизионный (коаксиальный) кабель

Активное сопротивление в цепи переменного тока



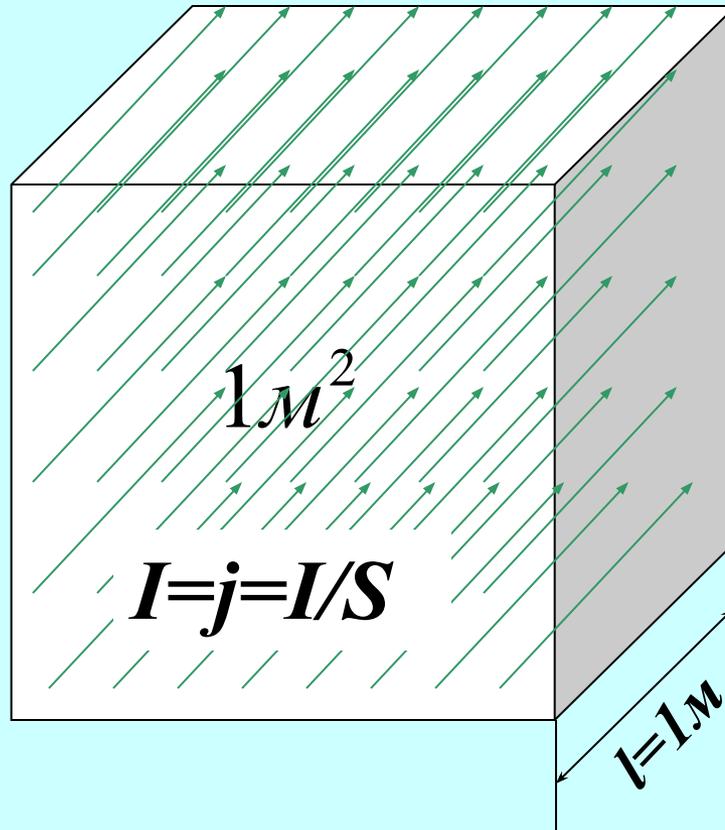
В цепи переменного тока с активным сопротивлением ток совпадает по фазе с напряжением.



Закон Ома в дифференциальной форме

$$U = I \cdot R$$

$$R = \rho$$



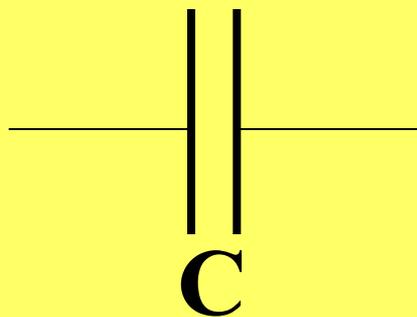
$$U = E = U/l$$

$$E = j \cdot \rho$$

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:

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

ε – диэлектрическая проницаемость среды (материала).

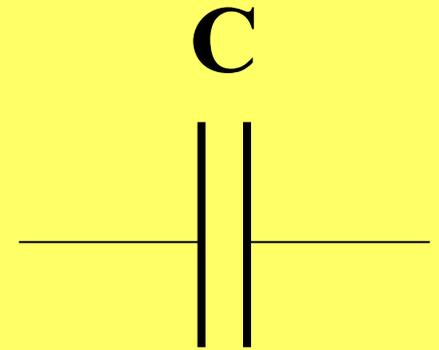
Диэлектрическая проницаемость – это мера поляризации вещества в электрическом поле, снижающая напряжённость поля в веществе и увеличивающая ёмкость конструкции с этим веществом

$$\varepsilon_{\text{пустоты}} = 1$$

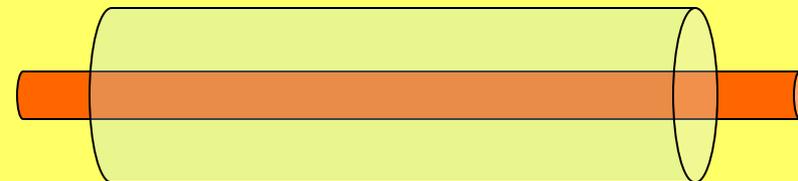
r_2 – радиус внешнего цилиндра

r_1 – радиус внутреннего цилиндра

l – длина коаксиальных цилиндров

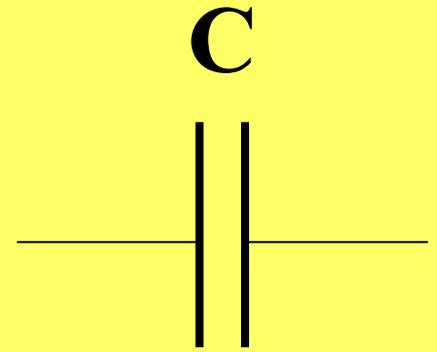


Пример: коаксиальный кабель



Расчёт электрической ёмкости

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



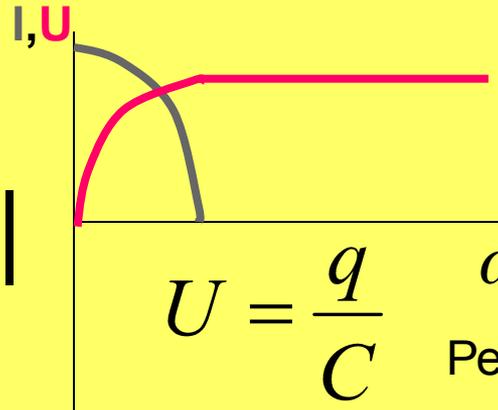
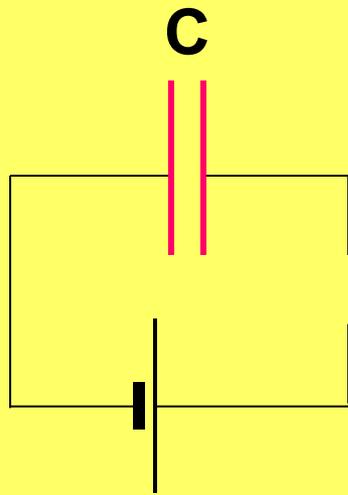
ε – диэлектрическая проницаемость среды (материала);

S – площадь эквипотенциальной поверхности (пластины);

d - расстояние между эквипотенциальными поверхностями

Пример: плоский конденсатор

Электрическая ёмкость в цепи переменного тока



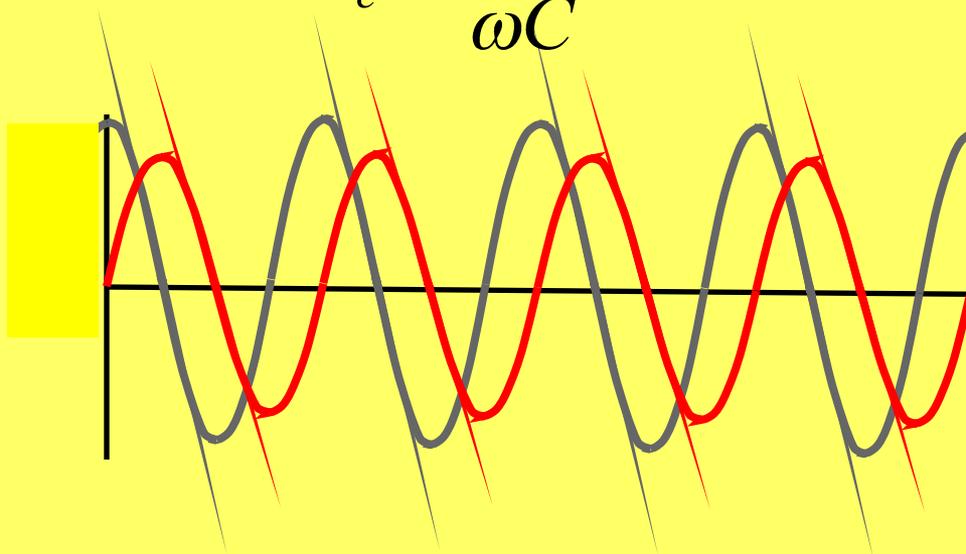
$$i = \omega C U_m \sin\left(\omega\tau + \frac{\pi}{2}\right)$$

Для амплитудных (и действующих) значений:

$$I = \omega C U_c$$

Реактивное ёмкостное сопротивление:

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

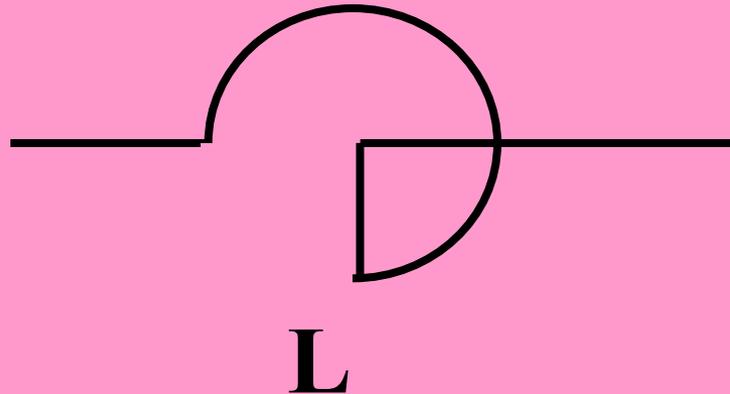


В цепи переменного тока с ёмкостью ток опережает напряжение на 90°

Основные параметры электрических устройств

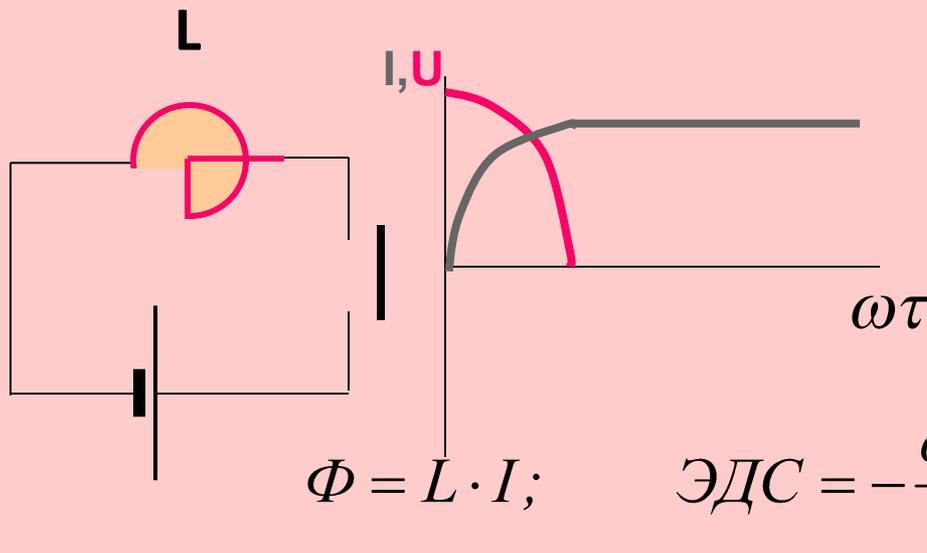
- Индуктивность – коэффициент пропорциональности между током и магнитным потоком:

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



Индуктивность характеризует магнитные свойства электрической цепи, проявляющиеся в её инерционности

Индуктивность в цепи переменного тока



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

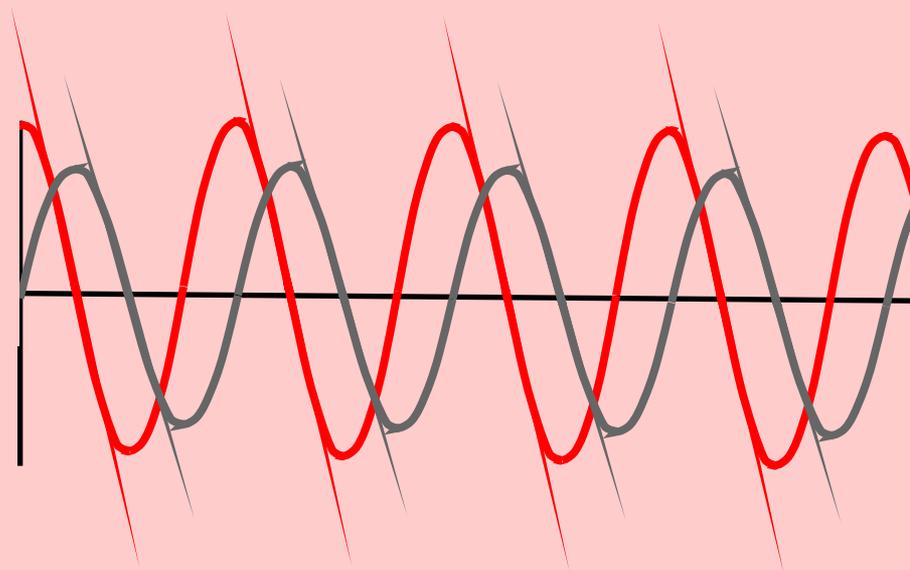
Для амплитудных (и действующих) значений:

$$U_L = \omega L I$$

Реактивное индуктивное сопротивление:

$$x_L = \omega L$$

В цепи переменного тока с индуктивностью ТОК отстаёт от напряжения на 90°



Пример расчёта индуктивности

Индуктивность катушки:

длиной l ,

с числом витков N ,

и площадью поперечного сечения S :

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

μ - 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 τ – 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, $[A^2/m^4]$

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

τ - время, $[c]$

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

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

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

ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Электрическая активная мощность	P	Скорость преобразования электрической энергии в тепло, механическую энергию и др.	ватт, Вт	$P=U \times I$ Вт=Дж/с
Электрическая энергия	W	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	Φ	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	Плотность магнитного потока $B = \mu_0 H$	тесла, Тл	$B = d\Phi / dS$ Тл=Вб/м ²
Сопротивление	R	Коэффициент пропорциональности между током и напряжением (закон Ома- $U=R \times I$)	ом, Ом	$R=U/I$ Ом=В/А
Ёмкость	C	Коэффициент пропорциональности между напряжением и зарядом($q=C \times U$)	фарада, Ф	$C=q/U$ Ф=Кл/В
Индуктивность	L	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.